

우리 나라 저수지의 수중 폭기 장치의 설계 방법 및 용량 분석

Design Methods and Capacity Analysis of Artificial Circulation Systems in Korean Reservoirs

서동일^{1,*} · 석관수² · 이병두² · 정상기²

Seo, Dong-Il ^{1,*} · Seog, Kwan-Soo² · Lee, Byung-Doo² · Jeong, Sang-Gi²

1 충남대학교 환경공학과

2 한국수자원공사

(2004년 2월 23일 접수, 2004년 5월 27일 최종수정논문 채택)

Abstract

Use of artificial circulation system has become popular in Korean reservoirs to control algal blooms and subsequent color, taste and odor problems in drinking water. It was found that the most of aeration system in Korean reservoirs are under-designed compared to existing installations in US and Australia. This was especially true for larger reservoirs greater than $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ in volume since it is common to install the system in the vicinity of intake areas only. Consequently, successful cases of artificial circulation systems operations are limited to few small reservoirs less than $1 \times 10^7 \text{ m}^3$. It is suggested that the design methods need to be developed considering physical characteristics and water quality kinetics inside of reservoirs. Also operation methods of artificial circulation systems need to be established considering the water quality dynamics, stratification and morphological characteristics of reservoirs. Finally, it is suggested to maintain comprehensive and long term monitoring programs to validate the application of artificial circulation system in reservoirs.

Key words: artificial circulation, stratification, drinking water reservoirs, algal blooms, eutrophication

주제어: 인공순환, 성층현상, 상수원 저수지, 녹조현상, 부영양화

1. 서론

우리나라에서 상수원으로 사용되고 있는 대부분의 저수지는 부영양화 현상이 점차로 심화되고 있는 경향이다. 이에 따라 발생하는 수돗물의 색도나 냄새

등의 수질문제를 개선하기 위한 방법으로 다수의 저수지에서는 인공순환장치 (또는 수중폭기장치)를 설치 운영하고 있다. 인공순환 기술은 처음에는 북유럽에서 동절기의 결빙을 제어하기 위하여 개발되었으며 호수의 수질을 관리하기 위하여 사용되기 시작한

*Corresponding author Tel.: +82-42-821-6679, Fax: +82-42-822-6998, E-mail: seodi@cnu.ac.kr (Seo, D.I.)

것은 1960년대 중반부터인 것으로 알려져 있다 (Cooke et. al, 1993). 이 방법을 성공적으로 적용하는 경우 심수층의 산소 농도가 증가하여 호기성 생물의 서식 조건이 개선되고 산화 조건이 형성되어 저니층으로부터 철 또는 망간과 같은 물질이 용출되는 것을 억제할 수 있다. 또한 유체가 수직적으로 유동하면서 표수층의 수온을 감소시키고 조류가 태양광에 노출되는 시간을 감소시킴으로써 조류의 서식조건을 변화시켜 녹조현상을 제어할 수도 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 심수층의 암모니아 농도와 수온이 증가하여 친생성 어류의 서식환경을 악화시키는 부작용이 발생할 수도 있는 것으로 보고 된 바도 있다. 또한 인공순환 시설의 용량이 충분하지 않은 경우 심수층의 영양염류가 표층으로 이동하거나, 식물성 플랑크톤의 서식 범위가 넓어지는 등의 부작용이 또한 발생할 수 있다.

우리나라에는 1991년 연초댐에 인공순환장치가 최초로 도입된 이래 현장수질관리 대안으로서 지속적으로 선호되고 있다. Table 1은 과거 10여 년간 국내에

서 수행된 수중폭기장치관련 연구보고서의 제목 및 주요 내용 등을 정리하고 있다. 그러나 이러한 연구들은 수질에 미치는 효과 분석 노력이 매우 제한적이거나 한시적으로 이루어진 경우가 대부분이어서 현재 까지도 장치에 의한 수질개선효과를 확신하지 못하고 있는 것이 현실이다. 또한 장치가 설치되어 있는 현장에서도 뚜렷한 설계, 운영 및 효과분석에 대한 지침이 갖추어져 있지 않은 상태이다. 저수지의 현장 수질 관리 기술은 오염물질의 유입, 호내 이동 또는 변화 특성에 따라 적용하는 것이 바람직하다. 그러나 우리나라에서는 호수의 수질문제에 대하여 원인과 결과를 연관시켜 자료를 수집하는 예를 찾아보기 어려우며 따라서 해당 저수지의 수질관리를 위하여 여타 저수지에서 사용되는 기존의 방법을 답습하는 경우가 대부분이다. 수질 및 순환에 대한 효과에 대한 검증 또는 확신이 존재하지 않는 가운데 수중폭기장치의 사용은 지속적으로 증가되는 추세에 있으며, 실제로 신규로 건설되는 저수지에도 설치를 예정하고 있는 것으로 알려지고 있다. 본 고에서는 우리나라에 설치

Table 1. Reports on aeration systems in reservoirs in Korea

연구자	연구제목	주요내용	발행 년도
한국수도연구소, 한국수자원공사	다목적댐 수중폭기장치 설치타당성 규명연구보고서	수중폭기장치를 실험적으로 제작 설 치, 효과와 타당성 조사	1990
한국수자원공사	수중 폭기에 의한 대청호 수질개선 효과분석 보고서	인공적 순환 폭기 장치 효과 분석	1991
한국수자원공사	연초댐 저수지의 수중폭기에 의한 수질 개선 효과 분석	연초댐에 설치된 수중폭기 장치 수질개선효과 파악	1993
서 동일외, 한국수 자원공사 보고서	수중 폭기에 따른 장래 수질변화 예측 및 효과 규명에 관한 연구 보고서	대청댐 수중폭기장치 수류순환 및 수질상태를 조사, 폭기 장치의 효율적 운영방안을 강구	1993 1994
한국수자원공사	광동·달방댐 수중폭기장치 효과분석 보고서	수중폭기장치 설치 전후의 수질, 식물성플랑 크톤등의 효과를 검증	1996 1997
한국수자원공사	수중폭기장치 설치 및 효과분석 방법	수중폭기장치의 설계방법 및 효과분석 방법을 정리	2000
한국수자원공사 대청권관리단	수중폭기장치 운영관리계획	대청호의 폭기장치 운영방안 정리	2001
한국수자원공사	2001년 수중폭기 효과분석 보고서	수중폭기장치가 설치되어 있는 전국 10개 용수댐의 수질개선효과를 분석	2002
서 동일외, 한국수자원공사	수중폭기 운영관리 최적화 보고서	산기식과 간헐실 인공순환 장치의 설계 방법 제시	2002

되어 운영되고 있는 인공순환장치의 용량과 성능과 비교 효과를 분석하고 향후 상수원의 수질관리를 위해 바람직한 활용방안을 제안하고자 한다.

2. 수중폭기장치

저수지의 수질개선을 위한 수중폭기장치의 종류 및 기능은 매우 다양하나, 크게 성층현상을 파괴하지 않고 저층의 산소 농도를 증가시키는 방법과 인공순환에 의하여 성층현상을 파괴하는 방법으로 대별할 수 있다. 전자는 현재 미국에서 주로 사용되는 방법으로서 심층수폭기(Little, 1995) 또는 순산소 주입(Speece, 1971; McGinnis and Little, 1998) 등의 방법이 사용된다. 우리나라 저수지에는 성층을 완전히 파괴하는 데 사용되는 인공순환장치가 사용되는 경향이 며, Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같은 공기양수통형 간헐식 폭기장치와 산기식 폭기장치의 두 가지를 주로 사용하고 있다.

서동일은 한국수자원공사 보고서(1994)에서 수중 폭기 장치의 가동에 따라 발생할 수 있는 수질 개선 효과를 1) 용존산소 농도 증가, 2)조류의 성장제어 3) 조류의 종조성의 변화 4) 영양염류 농도 등으로 대별하여 정리한 바 있다.

3. 우리나라 저수지의 인공순환장치 효과 분석

Table 2에 나타난 바와 같이 우리나라의 저수지에는 2003년 현재 한국수자원공사(산기식: 202기, 간헐

식: 49기) 251기, 지하채(산기식: 28기, 간헐식: 53기) 81기 등 총 377기가 설치되어 있는 것으로 집계 되었다. Table 3는 한국수자원공사(2002)에서 보고한 내용과 방문 또는 전화문의 등을 통하여 인공순환 장치의 효과를 정리한 내용을 나타내고 있다. 우리나라의 저수지를 크기에 따라 분류할 경우, 대체적으로 다음과 같이 종합할 수 있다.

첫째, 1,000만톤 이하 소규모모형에서는 주로 성층 파괴, 저층의 무산소층 제거, 조류제거 등의 효과가 있는 것으로 나타났다.

둘째, 1,000만톤 이상 5,000만톤 이하의 중규모모형에서는 무산소층 제거와 조류제거, 철·망간의 용출 방지 등에 효과가 있는 것으로 나타났다.

셋째, 5,000만톤 이상의 대규모모형에서는 조류 제거의 효과는 나타나지 않았고 저층의 무산소층 해소로 인한 망간의 용출방지 등의 효과가 나타난 것으로 분석된다.

Lorenzen and Fast(1977)는 확산계수, 기상 그리고 저수지의 형상 등과 같은 저수지의 특성에 따라 차이가 존재하나 일반적으로 공기량/저수지 면적비가 30 SCFM(standard cubic feet per minute)/10⁶ sf(square feet) 또는 9.14(m³/min)/10⁶m²(6.1-12.3m³/min/km²)의 정도가 될 경우 충분한 혼합효과를 발휘하는 것으로 볼 수 있다고 하였다. 또한 Cooke 등(1993)은 공기량과 호수의 크기의 비가 1.0m³/min/km³(체적기준) 이상 또는 6m³/min/km²(면적기준) 이상일 경우 효과적인 혼합효과가 있었던 것으로 보고하고 있다.

Table 4와 Fig. 2는 우리나라, 미국 그리고 호주에서

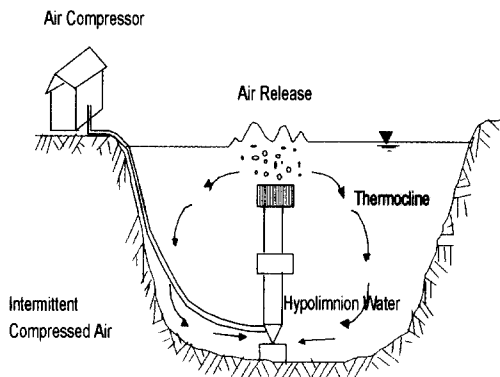


Fig. 1(a). Deep draw aeration system.

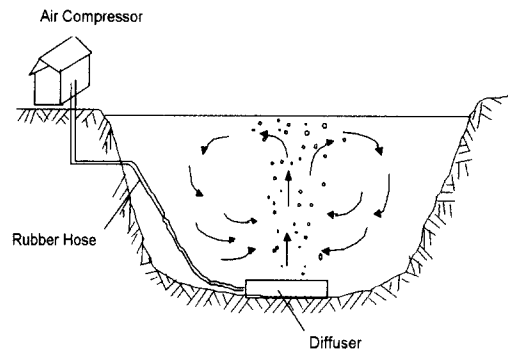


Fig. 1(b). Diffuser block aeration system.

Table 2. Installation of aeration system in Korean reservoirs

	댐 명	관 리	구 분	유효저수량 (m ³)	형 식	대 수	설치일	비 고
1	보령댐	수공	다목적댐	108.7 × 10 ⁶	간헐식	9	'98.11, '99.6	
					산기식	25	'99.6	
2	운문댐	수공	생공용수댐	126 × 10 ⁶	산기식	40	'99	
3	남강댐	수공	다목적댐	299.7 × 10 ⁶	산기식	31	'00	
4	주암댐	수공	다목적댐	352.0 × 10 ⁶	간헐식	8	'01	
5	밀양댐	수공	다목적댐	69.8 × 10 ⁶	간헐식	10	'01	
6	횡성댐	수공	다목적댐	73.4 × 10 ⁶	간헐식	5	'00	
7	대청댐	수공	다목적댐	790 × 10 ⁶	간헐식	8	'90.10, '92.12	
					산기식	25	'98.10	
8	영천댐	수공	생공용수댐	81.4 × 10 ⁶	간헐식	10	'97.12	
9	동북댐	지자체	생공용수댐	91.7 × 10 ⁶	간헐식	15	'96, '97, '98	
10	안계댐	수공	생공용수댐	13.0 × 10 ⁶	간헐식	5	'97.8	
11	회동댐	지자체	생공용수댐	16.2 × 10 ⁶	간헐식	3	'90	
12	사연댐	수공	생공용수댐	20.0 × 10 ⁶	간헐식	9	'96.8, '99	
13	선암댐	수공	생공용수댐	1.5 × 10 ⁶	산기식	25	'97.12	
14	회야댐	지자체	생공용수댐	1.7 × 10 ⁶	간헐식	15	'95, '97	
					산기식	3		
15	연초댐	수공	생공용수댐	4.59 × 10 ⁶	간헐식	7	'91.7, '94.10	
					산기식	9	'97.10	
16	대암댐	수공	생공용수댐	5.0 × 10 ⁶	산기식	50	'99.6	
17	공산댐	지자체	생공용수댐	5.5 × 10 ⁶	간헐식	5	'93	
18	달방댐	수공	생공용수댐	7.5 × 10 ⁶	간헐식	6	'96.8	
19	광동댐	수공	생공용수댐	8.0 × 10 ⁶	간헐식	9	'96.8	
20	팔당댐	건설부	발전용댐		간헐식	5	'88	
21	대전주동	지자체	대전취수탑		간헐식	15	'92	
22	일산호수	지자체	공 원		산기식	25	'97	
계						377		

가동 중인 인공순환장치의 용량과 저수지의 크기를 각각 나타낸 것이다. 일반적으로 우리나라에 설치된 인공순환장치의 공기량은 Lorenzen and Fast가 설정한

기준 (9.2m³/min/km²)보다 높은 경우는 없으나 공기량과 표면적의 비가 대략 6m³/min/km² 정도 되는 선암댐과 대암댐 그리고, 연초댐이 효과를 나타내고 있

Table 3. Summary of effectiveness of aeration system in reservoirs in Korea

		성층파괴	용존산소	조류	BOD	질소	인	철	망간
소규모 (1,000만m ³ 이하)	선암댐	△	○	○	×	×	×	×	×
	회야댐	-	-	△	-	-	-	-	-
	대암댐	○	○	○	×	×	×	-	-
	공산댐	효과분석중							
	달방댐	○	△	○	×	×	×	×	×
	광동댐	×	○	○	×	×	×	×	×
대규모 (5,000만m ³ 이하)	안계댐	×	○	○	×	×	×	○	○
	회동댐	가동중지, 효과없음, 용량부족으로 판단됨							
	사연댐	효과분석중							
대규모 (5,000만m ³ 이상)	보령댐	○	△	-	×	×	×	○	○
	운문댐	-	○	-	×	×	×	-	○
	남강댐	시험 운전중							
	주암댐	시험 운전중							
	밀양댐	시험 운전중							
	횡성댐	시험 운전중							
	대청댐	정확한 효과분석 못함							
	영천댐	△	○	○	×	×	×	○	○
	동북댐	-	-	-	-	-	-	-	-
기타	팔당댐	-	-	-	-	-	-	-	-
	대전추동	△	△	-	-	-	-	-	-
	일산호수 공원	자세한 분석은 하지 않았으나 별로 효과가 없다고 판단됨							

* 한국수자원공사 보고서 (2002) 및 각 댐의 실무자 전화 및 방문 조사

는 것으로 보고된 바 있다. 그러나 이러한 분석 결과는 우리나라의 대부분의 저수지에서 인공순환장치의 용량이 현저하게 낮게 설계되어 있는 있다는 것을 시사한다. 실제로 대규모 댐의 경우 호수 전체를 대상으로 인공순환장치가 설계되지 않고 취수탑 주위에 집중하여 설치하는 것이 대부분이다. 따라서 실제적으로 호수의 성층을 파괴시킴으로써 용존산소농도를 증가시키거나 조류의 성장을 제어하기 보다는 장치 주변에 대하여 국지적인 난류 현상을 유발하는 효과

를 나타낼 수밖에 없다. 그러나 이러한 경우 취수탑 주변의 탁수현상을 가중시키거나 식물성플랑크톤이 서식할 수 있는 수심을 증가시킴으로써 상수원수의 수질이 오히려 악화되는 부작용이 발생하는 경우도 다수 보고된 바 있다.

4. 우리나라의 인공순환장치 설계 방법

본 장에서는 기존의 문헌에 나와 있는 자료를 토대

Table 4. Physical characteristics and capacity of aeration system

명 명	수심		총저수량 × 10 ⁶ m ³	면적 km ²	공기량			상하층의 수온차이			비고
	평균	설치			(m ³ /min)	체적비	면적비	가동 전	가동 후	효과(%)	
선암댐	7.6	10.0	2.0	0.26	1.73	0.86	6.63		0.30	90.0	산기 25
대암댐	6.0	10.0	9.0	1.50	3.86	0.43	2.58	2.30	0.30	87.0	산기 50
달방댐	15.7	45.0	7.7	0.49	1.65	0.21	3.37	12.80	10.10	21.1	간헐 6
광동댐	10.6	10.0	11.0	1.04	3.00	0.27	2.88	13.10	8.50	35.1	간헐 9
안계댐	12.6		17.6	1.40	1.50	0.08	1.07	3.80	8.00	-	간헐 5
보령댐	18.2	37.5	116.9	6.44	4.13	0.04	0.64	9.00	7.90	12.2	간헐 9 산기 25
운문댐	16.8	30.0	135	8.00	3.25	0.02	0.41	12.20	6.60	45.9	산기 40
대청댐	23.1	6.0	1490	64.3	3.25	0.00	0.05	3.00	2.60	13.3	간헐 8 산기 25
영천댐	13.9	10.0	96.4	6.90	2.25	0.02	0.33	13.70	3.70	73.0	간헐 10
연초댐	7.9	15.0	4.96	0.63	3.37	0.68	5.39	6.40	0.90	85.9	간헐 7 산기 9

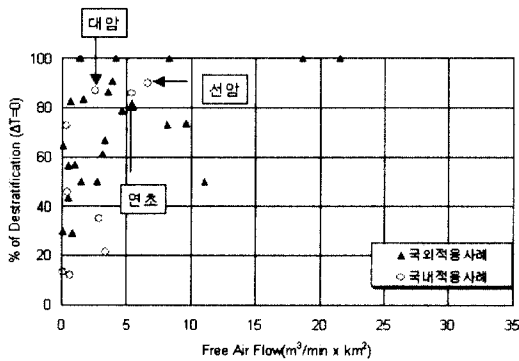


Fig. 2. Destratification efficiency and capacity of aeration system (서동일 외, 2002).

로 우리나라의 인공순환 장치의 설계에 사용되는 방법을 정리하고자 한다. Table 5와 Table 6은 대청댐과 연초댐의 간헐식 인공 순환 장치 설계시 사용되었던 방법과 수식을 각각 나타낸다. 또한 Table 7과 Table 8은 한국수자원공사 보고서 (2000) 에 나타난 인공순환 장치의 설계방법을 설명하고 있다.

위에 열거된 방법들은 저수지에 성층현상이 나타났을 때 무산소층이 되는 심수층을 수표면으로 양수

하여 대기의 공기와 접촉시켜 산화시키는 것을 목적으로 수립되었으며, 공기량 계산은 저수지의 산소소비량에 대응한 산소공급량에 근거하고 있다. 따라서 위 설계 기법은 호수가 완전 혼합되어 있는 상태를 대상으로 하며 호수의 성층현상이 고려되어 있지 않다는 문제점이 지적된다. 필요 공기량의 계산에 있어서 공기에 의한 수체의 이동이 1:1로 대응하는 것으로 가정하고 있으나 실제로 공기의 공급량과 이에 의해 유도되는 수체의 흐름은 유체역학적으로 매우 복잡하게 반응하며 특히 공기의 흐름이 연속적이지 않은 경우는 고려해야 할 요소가 더욱 많다. 또한 Table 6의 식들은 이론적으로 유효하지 않거나 (5) 단계와 (7) 단계의 경우, 수식의 단위가 일치하지 않고 있다. Table 7에 사용된 수심별 경험계수는 특정 회사의 제품에만 해당하는 값이며 다른 기종에 대해서는 사용할 수 없는 값들이다. 따라서 기존의 인공순환장치의 설계에는 출처와 역할이 분명하지 않은 식들이 상당수 사용되고 있는 것으로 분석되고 있으며 설계방법의 타당성을 부여하기 위해서는 이러한 사항들이 속히 정리되어야 하며, 합리적인 운영을 위해서는 설계 방법을 이용한 결과를 확인하는 작업이

Table 5. Design method of deep draw aeration system in Daecheong Lake (한국수자원공사, 1990)

차례	방법
(1) 1회 당 양수량	$1\text{회당 양수량 } v = \frac{\pi}{4} D^2 \times L$ v: 1회당 양수량(m ³ /회), D: 양수통 내경 (m) L: 양수통 유효길이 (m)
(2) 분출간격	분출간격, T: 공기분출시간 간격(sec) $T = \frac{V \times (\Delta P + 10)}{10 \times q} \times 60 \times 1.1$ V: 공기실 용적 (liter), q: 공기의 공급량 (liter/min) P: 수면으로부터 공기 분사구 까지의 수압 (m)
(3) 1일 양수량	$Q = v \times \frac{60 \times 1440}{T} = v \times 60 \times 1440 \times \frac{10 \times q}{V \times (\Delta P + 10) \times 60 \times 1.1}$
(4) 호수의 교반수량*	$\text{적점 교반수량} = 25^2 \times \frac{\pi}{4} \times \frac{1}{3} \Delta P$
(5) 설치대수 산정	$N = \alpha \frac{Q}{A}$ N: 양수통의 갯수, A: 양수통 1기당 양수능력 (m ³ / 대) Q: Hypolimnion의 1일당 발생수량 (m ³ /d) = V/T V: Hypolimnion 의 체적 (m ³), T: 수온성층 발생기간 (day) a: 여유계수 = 1.2

* 25: 호수면에서의 교반영향 범위 (m) 확산실험에 의한 경험치, 교반능력은 양수통 설치 수심에 따라 결정되므로 가능한 깊은 위치에 설치하는 것이 바람직하다고 해당 보고서는 권하고 있음.

필요하다. 한국수자원공사(2000)에서는 수중폭기 장치의 효과 검증 방안을 정리한 바 있으나 설계방법과 연계하여 분석하는 경우는 아직 찾아 볼 수 없다. 서동일 등은(2004a, 2004b) 간헐식 폭기장치와 산기관식 폭기장치의 설계방법을 개발한 바 있으나 현장의 자료를 이용하여 개발된 방법들을 확인하는 작업이 필요한 것으로 보고한 바 있다.

5. 우리나라 저수지 수중 폭기장치 운영 방법

Table 9는 우리나라 저수지의 수중폭기장치의 운영방법을 조사하여 정리한 것이다(서동일 등, 2002). Table에 나타난 바와 같이 우리나라 저수지의 수중폭기 장치는 현장의 수질변화나 성층현상의 변화와 관계없이 현장 관리자의 경험에 의하여 간헐적으로 운영되거나 봄철부터 가을철까지 계속적으로 운영되는 경우가 대부분이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 대부분의 저수지에서 수중폭기장치가 과소하게 설계되

었고 따라서 호수의 수질이나 성층현상에 크게 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 분석된다.

호내의 성층특성은 기상, 강우 그리고 저수지의 운영상황 등에 따라 변화한다. 따라서 수중폭기장치를 이용하여 저수지의 성층현상을 파괴하기 위한 총공기량과 설치 대수 등은 저수지의 성층 정도에 따라 많은 차이를 나타낸다. 또한 수중폭기장치의 운영 중 소요되는 에너지 비용은 주입 공기량에 따라 좌우되며, 에너지비용을 최소화하기 위해서는 시간적으로 변화하는 성층현상에 따라 적절한 공기 공급량을 결정하는 것이 필요하다. 서동일(2002) 등은 저수지내 수심별 온도, 용존산소농도 그리고 Chl-a 분포를 자동측정장치를 이용하여 실시간으로 측정함으로써 폭기조의 가동여부를 결정하는 방법을 채택할 수 있으며 이는 폭기장치의 효과분석에도 사용될 수 있다고 제안한 바 있다. 현재에는 자동측정장치에서 수심별 수온, pH, DO 등 여러 항목을 동시에 연속적으로 측정하여 실시간으로 데이터를 전송하면 무선 모뎀에서

Table 6. Design method of aeration system in Yeoncho Lake (한국수자원공사, 1993)

차례	방법
(1) 대상저수지의 용량	호내 수심 분포, 여름철 수심별 수온, DO 등을 측정하여 산정
(2) 산소소비량	봄철 성층현상 발생시 산소결핍을 측정
(3) 대상유량	일일총산소소비량(mg/d)을 폭기기의 주입률로 나누어 산정
(4) 유입유출 tube 반경*	$r = \sqrt{\frac{Q_w}{\pi v}}$ v: 물방울 이동 속도 (1.2m/s), Q _w = 유량(m ³ /sec)
(2) 산소소비량	봄철 성층현상 발생시 산소결핍을 측정
(5) 유입 · 유출 및 마찰손실**	$\text{유입손실} = \frac{K_L \times 8 Q_w^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot g} \quad \text{유출손실} = \frac{8 Q_w^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot g}$ $\text{마찰손실} = \frac{fL \times 8 Q_w}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot c}$ K _L : 유입상수 (0.5), f: 마찰계수 (0.02), Q _w : 유량(m ³ /sec) D: 관직경(m), g: 중력가속도(m/sec ²), L: 공기유출지점 수심(m)
(6) 공기-물혼합체의 밀도	$\text{유입손실} = \rho_{aw} = \frac{L \times \rho_w}{L + \Delta H}$ ρ _{aw} : 공기-물 혼합체의 밀도(kg/m ³), w: 물의 밀도(kg/m ³) ΔH: 유입, 유출, 마찰손실수두(m)
(7) 공기량**	$Q_{ave} = \frac{10.4 Q_a \ln \frac{L + 10.4}{10.4}}{l}$ $Q_a = \frac{(Q_w + \rho_w) - (Q_w + \rho_{aw})}{(\rho_{aw} + 0.662) - \rho_a}$ Q _{ave} : 평균공기량(m ³ /min), Q _a : 공기량(m ³ /min)
(8) 콤프레사 압력 및 동력산정	요구압력 PR(kg/cm ²) = ΔP + h + L(1.0/10.1) ΔP: 산기공에서의 압력 (0.4~0.7kg/cm ²)

*문헌에는 $r = \sqrt{\frac{Q_w}{v \cdot \pi}}$ 로 나와 있으나 $Q_w = \pi^2 \times v$ 이므로 위와 같이 수정.

** (5) 단계와 (7) 단계의 식들은 단위가 일치하지 않음.

전송되는 데이터를 받아 운영 PC로 전송할 수 있는 시스템이 상용화되어 있다. 이러한 수심별 수온 등의 데이터를 이용하여 효과적인 운영을 위한 공기량 등을 계산하고(서동일 등, 2004a, 2004b), 공기압축기의 유압밸브를 통제하여 실시간으로 현장 상황에 맞는 공기량을 공급함으로써 효율적인 운영이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 우리나라의 저수지에 사용되고 있는 인공순환 장치의 설계와 운영은 이론적인 근거가 다소 미흡하고 효과에 대한 검증이 충분하지 않았던 것을 문제점으로 지적할 수 있다. 이는 장치의 설계에 있어서 제품의 공급자나 사용자가 장

Table 7. Design method of diiffuser block aeration system(한국수자원공사, 2000)

차레	방법
(1) 설치댓수 산정	$\text{설치댓수}(N) = \frac{V}{FR} \times K \times A$ <p> $V(\text{m}^3)$: 수질개선이 요구되는 지역의 체적 $FR(\text{m}^3/\text{day})$: 폭기시설 1기당 유량 K: 수심별 보정계수 (제작사의 경험값) A: 여유율(보통 20%적용) </p>
(2) Air Compressor 설치 용량	$\text{중소소용기량}(\text{m}^3/\text{min}) = 1 \text{ 기당공기소요량 설치 대수}$
(3) 공기압축기 소요량 산정	$P_1 V_1 = P_2 V_2$ <p> P_1: 대기압 (압축기 흡입구), V_1: 자유공기 (압축기 흡입구) P_2: 산기관 토출압(kgf/cm^2), V_2: 산기관토출량(m^3/min) </p>

*K: Kinetic variable of the depth(수심별 보정계수, 경험값 - 특정회사의 기종에 한함(저자 주))

Table 8. Design method of deep draw aeration system(한국수자원공사, 2000)

차레	방법
(1) 설치댓수 산정	$\text{설치댓수} = a \times \frac{Q}{Q_B} = a \times \frac{(V/T)}{Q_B}$ <p> a: 안전율(통상 1.2), Q: 심수층의 1일 발생수량($\text{m}^3/\text{일}$) Q_B: 수중폭기장치의 평균양수능력($\text{m}^3/\text{기.일}$) V: 심수층의 체적(m^3), T: 성층 발생 기간(일) </p>
(2) 양수통의 Air Chamber 필요 공기압	대기압 + 수두압력 < Air Chamber 압력 분당 필요 공기량, $Q = q \cdot N$ q : Air Chamber 체적, N : 분당 분출회수
(3) 양수통 Air Chamber 필요 공기량	$1\text{일 필요 공기량} = Q \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{기}} \times 1,440 \frac{\text{분}}{\text{일}}$ <p>총필요 공기량 = 1일 필요공기량 폭기 장치 기수</p>
(4) Air Compressor 1대의 공기공급량	$P_1 Q_1 = P_2 Q_2$ <p> P_1: 대기압, Q_1: 대기압상태에서의 공기량 P_2: 절대압, Q_2: 절대압상태에서의 공기량 </p>
(5) Air Compressor 필요 댓수	콤프레사 소요댓수 = (수중폭기장치 1일 필요공기량)/(Air Comp. 1대의 공기공급량) 콤프레사 필요 댓수 : 콤프레사의 교대운전 및 예비 수량을 감안하여 소요 댓수(이론)의 2~3배로 필요 댓수 산정

치가 제공하는 순환 효과와 수질 개선 효과에 대한 종합적인 정보가 확보되지 않은 상태로 사업을 진행 하였기 때문인 것으로 분석된다. 효과의 분석을 위해서 다양한 연구가 진행된 바 있으나 모두가 한시적으로 진행되었거나 호수의 수질 변화를 유발하는 주요 인자들을 함께 고려하지 않음으로서 정확한 정보를 제공하지 못하거나, 효과 분석을 위한 장치가동 전의

수질자료가 전무한 상태 등 종합적인 확인작업이 진행되지 않는 점들이 문제점으로 지적된다. 또한 대부분의 저수지에서는 성층현상이 발생하기 시작하는 4월부터 10월경까지 장치를 연속적으로 가동함으로써 막대한 동력비용을 요구하며 장치의 수명이 짧아지는 문제점을 나타내고 있다. 따라서 저수지의 성층 현상과 폭기장치의 특성을 연관지어 고려하여 장치를

Table 9. Operation methods of aeration system of reservoirs in Korea

저수지명	운영방법
대청댐*	조류발생기와 수온 상승으로 인한 하층 DO 고갈, 조류 발생 등을 고려하여 수중폭기 장치의 운영기간은 5월에서 10월까지, 조류발생 상황이 11월까지 이어질 경우 1개월을 연장 운영, 기타 절·망간의 과다 검출시와 탁수 발생시 등은 상수처리에의 효과 등을 고려하여 가동 여부를 결정
광동댐	5월부터 10월까지 주간에만 가동
달방댐	5월부터 10월까지 야간에만 가동
영천댐	8월초부터 10월초까지 가동
안개댐	5월부터 11월까지 연속가동
선암댐	4월부터 10월까지 가동
사연댐	2001년 3월부터 9월까지 가동, 7월말까지는 고장으로 가동, 중단 반복
보령댐	5월부터 지속가동
대암댐	4월부터 10월까지 가동
운문댐	2001년도에 5월 21일~6월 4일, 10월 4일~10월 10일, 총 22일 가동.
횡성댐	시험가동중 남강댐 대량의 조류 발생시 가동 시작, 2001년에 약 일주일씩 2번 가동
주양댐	시험가동중 밀양댐 2001년 1달 정도 가동, 운영기준을 무산소층 발생에 두고 가동
동북댐	3월부터 11월까지 연속가동 회야댐 4월부터 10월까지 연속가동
공산댐	1994-1999년은 하절기 조류 대량 발견 시 가동, 2000년 4월부터 계속 가동
팔당댐	특별한 지침 없음 회동댐 현재 거의 가동 중지
일산호수공원	연중 24시간 가동

*한국수자원공사 대청권관리단 (2001), 수중폭기장치 운영관리계획, pp. 13.

효율적으로 운영함으로써 시설의 설치 및 운영의 효율화를 기하는 것이 바람직하다. 결론적으로 우리나라의 저수지의 인공순환 장치의 설계방법은 대상 호수의 문제점과 장치의 기능을 고려할 수 있도록 대폭 보완되어야 하며, 지속적인 확인 작업을 통하여 인공순환장치의 효과를 검증하는 것이 바람직하다.

참고문헌

서동일, 권오현, 장동순(1993), 수중폭기에 따른 장래수질 변화예측 및 효과규명에 관한 연구 보고서(1차), p. 337, 한국수자원공사보고서.
 서동일, 권오현, 장동순(1994), 수중폭기에 따른 장래수질 변화예측 및 효과규명에 관한 연구 보고서(2차), p. 417, 한국수자원공사보고서.
 서동일, 송무석, 허우명(2002), 수중폭기 운영관리 최적화 보고서, p. 268, 한국수자원공사 보고서.
 서동일, 송무석, 황현동(2004a), 저수지수질관리를 위한 간헐식 양수통형 인공순환장치의 설계방법, 상하수도학회지, 인쇄중.
 서동일, 송무석, 황현동(2004b), 저수지의 수질관리를 위한 산기판형 인공순환장치의 설계방법, 상하수도학회지, 인쇄중.
 서동일, 황현동, 이병두, 석관수(2004c), 연초호의 수중폭기

장치 운영에 의한 수질개선효과 분석, 상하수도학회지, 인쇄중.
 한국수자원공사(1990), 다목적댐 수중폭기장치 설치타당성 조사연구 보고서, p. 380.
 한국수자원공사(1991), 수중폭기에 의한 대청호 수질개선 효과분석 보고서, p. 71.
 한국수자원공사(1993), 연초댐 저수지의 수중폭기에 의한 수질개선 효과분석 보고서, p. 120.
 한국수자원공사 한강사업본부(1996), 광동, 달방댐 수중폭기장치 효과분석 보고서, p. 180.
 한국수자원공사 한강사업본부(1997), 광동, 달방댐 수중폭기장치 효과분석 보고서, p. 131.
 한국수자원공사(2000a), 2000 수중폭기 효과분석 보고서(유지관리 및 운영지침서), p. 176.
 한국수자원공사(2000b), 수중폭기장치 설치 및 효과분석 방법, p. 20.
 한국수자원공사(2002), 2001년 수중폭기 효과분석 보고서, p. 217.
 Brosnan, T. and Cooke, D.(1987) Response of Silver Lake trophic state to artificial circulation, *Lake and Reservoir Management*, 3, pp. 66-75.
 Cooke, D., Welch, E. Peterson, S, and Newroth, P.(1993), *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*, 2nd Ed., Lewis Pub. Co.
 Johnson, P.L.(1984) Thoughts on Selection and Design of Reservoir Aeration Device, *in Lake and Reservoir*

- Management*, Proceedings of the 3rd Annual Conference, pp. 537-541, EPA 440/5/84-001.
- Kamp-Nielson, L.(1975) Seasonal variation in sediment-water exchange of nutrient ions in Lake Esrom, *Verb. Int. Verein. Limnol.*, **19**, pp. 1057-1065.
- King, D.(1970) The role of carbon in eutrophication, *JWPCF*, **42**, pp. 2035-2051.
- Lorenzen, M.W. and Fast, A, A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management, Ecol. Res. Ser. EPA 600/3-77-004, 126 p., USEPA, 1977.
- Lorenzen, M.W. and Mitchell, R.(1975), An evaluation of artificial destratification for control of algal blooms, *American Water Works Assoc.*, **67**, pp. 373-376.
- Little, J.C.(1995), Hypolimnetic aerators: predicting oxygen transfer and hydrodynamics, *Water Research*, **29**(11), pp. 2475-248.
- McGinnis, D.F. and Little, J.C.(1998), Bubble dynamics and oxygen transfer in a Speece Cone, *Water Science & Technology*, **37**(2), pp. 285-292.
- Speece, R.E.(1971) Downflow Bubble Contact Aeration, *J of San. Eng. Div., ASCE*, **97**(SA4), pp. 433-441.
- Shapiro, J.(1973) Blue Green algae: why they become abundant, *Science*, **197**, pp. 382-384.
- Shapiro, J.(1990) Current beliefs regarding dominance by blue greens: the case for the importance of CO₂ and pH, *Verb. Int. Verein. Limnol.*, **24**, pp. 38-54.