

연초호의 인공 순환 장치 운영에 의한 수질 개선 효과 분석

Effect of Artificial Aeration System on Water Quality of Yeoncho Lake

서동일^{1,*} · 황현동² · 이은형² · 허우명³

Seo, Dong-Il^{1,*} · Hwang, Hyun-Dong² · Lee, Eun-Hyoung² · Heo, Woo-Myung³

1 충남대학교 환경공학과

2 (주)엠큐빅

3 삼척대학교 환경공학과

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

Abstract

Effect of artificial circulation on amelioration of water quality in Yeoncho Lake was analyzed using summer data between 1991-2002. Two sites, intake tower area where aeration systems are concentrated in and near the inlet of reservoir were selected for comparison in this study. Summer averages between may and september showed that aeration system might be beneficial in the improvement of water quality of BOD5, COD, and TN while Chl-a concentration and transparency did show opposite patterns. Wilcoxon' s signed rank test for matched pair indicated slight increase of BOD5 and COD concentrations in the vicinity of intake tower while other variables did not show any significant differences from data of inlet of reservoir. During the study, it was found that the following subjects need to be investigated for more detailed analysis. 1) Dynamic pollutant loading from outside and inside the lake, 2) Biological, Chemical and Physical lake data when aeration systems are in and not in operation and 3) Radius of influence of aeration system.

Key words: Yeoncho Reservoir, Artificial circulation, Destratification, Algal bloom, Wilcoxon' s signed rank test for matched pair

주제어: 연초호, 인공순환, 성층파피, 녹조현상, 윌콕슨 검정

1. 서론

연초댐은 거제지역의 대우조선, 삼성중공업 및 장승포시 등에 생활용수와 공업용수를 공급하기 위해 1979년 12월에 건설된 소규모 용수전용댐으로서 구

천댐과 함께 거제지역의 주요 취수원이다. 그러나 심각한 부영양화 현상으로 인하여 하절기에는 규조류에 의하여 여과지가 자주 막히고, 남조류에 의하여 상수에 냄새가 발생하고, 성층현상에 따른 심수층의 용존 산소 결핍현상으로 퇴적층에서 철과 망간이 용출되어

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

색도가 발생하는 등의 문제점이 해마다 제기되었다.

인공순환장치는 상수원으로 사용되는 저수지의 녹조현상에 의한 부작용을 제어하기 위하여 널리 사용되고 있다(Cooke et. al. 1993). 한국수자원공사에서는 간헐식 양수통형 인공순환장치와 산기판형 인공순환장치를 설치하여 이러한 문제를 해결하고자 하였다(한국수자원공사, 2002). 폭기조의 가동에 따라 조류 발생에 의한 색깔 및 냄새문제는 상당 부분 개선되었고(현지 담당 직원과 개인적 의견 교환), 인공순환장치의 효과분석을 위한 노력이 간헐적으로 이루어진 바는 있으나(한국수자원공사 1991, 1993, 2000, 2002; 서동일 등, 2002) 정확한 효과를 판단하기 위한 객관적인 자료는 아직도 미흡한 상태이다. 연초댐은 1991년 폭기조를 설치한 이래, 상수원 수질관리에 성공적인 사례로 홍보되면서 다수의 저수지에서 인공순환장치를 설치하게 된 계기가 된 지역이다. 위에 열거한 보고서들은 연초댐의 인공순환효과를 분석하기 위하여 순환장치에서 가장 멀리 떨어진 호수 입구 지점과 집중적으로 설치되어 있는 취수탑 부근의 수질을 주로 비교하고 있다. 그러나 인공순환장치의 용

량 및 영향권이 확실하지 않고, 수심이 얕은 지역은 바람에 의한 혼합효과가 작용함으로써 효과분석에 매우 큰 어려움이 있다. 이상적으로는 인공순환장치를 설치하기 이전의 수질자료가 필요하나 이러한 자료는 찾아보기 어려우며 따라서 인공순환에 의한 혼합 또는 수질개선효과를 확인하기 매우 어려운 상황이다. 그러나 인공순환장치의 설치계획은 신규 저수지나 호내 취수시설의 건설과 함께 반복하여 거론되고 있으며 뚜렷한 효과를 확신하지 못하는 상태에서 계속적으로 막대한 예산이 소요되고 있는 실정이다.

서동일은(2004) 우리나라의 저수지에 사용되는 인공순환 장치의 수질 개선 효과를 분석하여 보고한 바 있으며 본 연구에서는 실측자료와 보고서 등의 문헌 자료를 이용하여 연초댐의 인공순환장치의 운영효과를 보다 더 자세히 분석하고자 하였다. 또한 현재 연초댐의 입구와 중앙부분을 각각 폭기조의 비영향권과 영향권으로 구분하는(한국수자원공사 2000, 2002) 것에 대한 문제점을 분석하고 바람직한 효과분석을 위하여 향후 고려해야할 요소에 대하여 검토해 보기로 한다.

Table 1. 연초댐의 물리적 특성(한국수자원공사, 2002)

유역면적(km ²)	11.7
댐체적(m ³)	108 10 ³
댐길이(m)	120
총저수량(m ³)	5.0 10 ⁶
유효저수량(m ³)	4.6 10 ⁶
만수면적(m ²)	631,234
평균수심(m)	7.94
최대수심(m)	16.00

2. 연구 내용

2.1. 연초댐의 개황

Fig. 1(a)는 연초댐 및 유역의 지도를 나타내고 있다. Fig. 1(b)는 본 연구진이 실측한 결과를 기초로 하여 작성한 연초호의 호내수심도를 나타내고 있으며 폭기장치의 위치를 함께 표시하였다. 연초댐의 제원은 Table 1에 나타난 바와 같다.

2.2. 유역의 오염원 현황

Table 2와 Table 3은 연초댐 유역의 인구 및 가축 그리고 토지이용 현황을 각각 나타내고 있다(한국수자원공사 2004). 연초댐 유역은 행정단위로 명동리, 천곡리, 이목리로 구분되며, 명동리에는 명동천과 명하천이, 천곡리에는 주령천과 이남천이 그리고 이목리에는 이목천이 각각 연초호로 유입되고 있다. 이들 유역 중 명동천이 가장 넓고 인구가 많은 편이나 두 번째로 넓은 유역을 차지하는 주령천은 명동천 유역과 인구가 비슷하면서 한우 사육두수가 가장 많은 것으로 나타나고 있다. 따라서 주령천의 오염부하가 상대적으로 가장 크고 명동천과 명하천의 오염부하가 그 뒤를 따를 것으로 분석된다.

폐수배출시설은 총 3개소의 마을단위오수처리장이 유역내에 설치되어 있는 것으로 나타났으며, 기타 분뇨처리장, 폐수배출업소 등은 없는 것으로 조사되었다. Table 4에 나타난 바와 같이 마을단위오수처리장은 그 시설용량에 비해 약 2~3배 정도 많은 양을 처리하고 있으나 처리 효율 및 관련 자료를 얻을 수 없

Table 2. 연초댐 유역의 인구 및 가축현황

하천명	세대수	인구(명)	소	가축(두) 돼지	가금
명동천	66	147	43	10	
주령천	66	144	115		
명하천	33	63	7		33
이남천	24	49	15		
이목천	8	13	1		
합계	194	416	178	10	33

* 한국수자원공사 거제권 관리단(2004년)

Table 3. 연초댐 유역의 토지이용현황

하천명	합계 (km ²)	논 (km ²)	밭 (km ²)	대지 (km ²)	임야 (km ²)	잡종지 (km ²)	기타 (km ²)
명동천	5.274	0.172	0.624	0.043	4.132	0.009	0.030
주령천	2.151	0.128	0.408	0.026	1.401	0.006	0.182
명하천	0.505	0.040	0.000	0.005	0.429	0.001	0.030
이남천	1.381	0.047	0.084	0.004	0.962	0.000	0.285
이목천	2.018	0.049	0.167	0.005	1.386	0.000	0.410
합계	11.329	0.437	1.283	0.083	8.310	0.016	1.200

Table 4. 연초댐 유역의 폐수배출시설현황

처리대상지역	처리공법	시설용량	처리실적 (m ³ /일)	설치년도 (m ³ /일)
천곡리	형기, 호기 접촉폭기	20	30.3	1999. 6
이남리	형기, 호기 접촉순환	20	37.8	1999. 6
명하리	토양식 오수정화방식	25	78.9	2000. 9

었다. 현지 조사 결과에 의하면 연초댐 유역은 저수지와 인접한 지역에서도 농경 및 축산활동이 활발하며 따라서 오염물질들이 직접적으로 연초댐에 유입될 가능성이 매우 높을 것으로 추정된다.

2.3. 연초댐 유역의 수문 현황

Fig. 2와 Fig. 3은 연초댐 유역의 월평균 기온, 강수량을 나타내고 있다. 연초댐 유역은 동절기에는 5°C

이하이나 조사된 기간 동안 영하의 기온을 기록한 경우는 없었으며 하절기도 1994년을 제외하고는 최고 25°C 가량으로 온화한 특성을 나타내고 있다. 1991년~2002년 동안의 연초호유역의 년평균 강우량은 1,935mm로 우리나라의 평균 강우량에 비하여 매우 풍부한 편이다.

연초댐은 월류형으로서 유역의 수문상황에 의하여 수위가 조절되고 유역에서 유입되는 오염물질과 유량에 의하여 호내 수질이 크게 영향을 나타내는 특성을

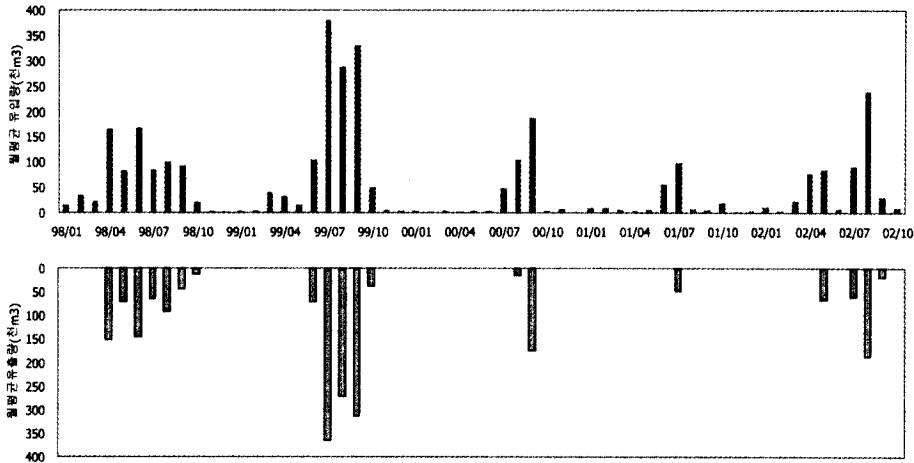


Fig. 4. 연초댐의 유출입량(1998-2002).

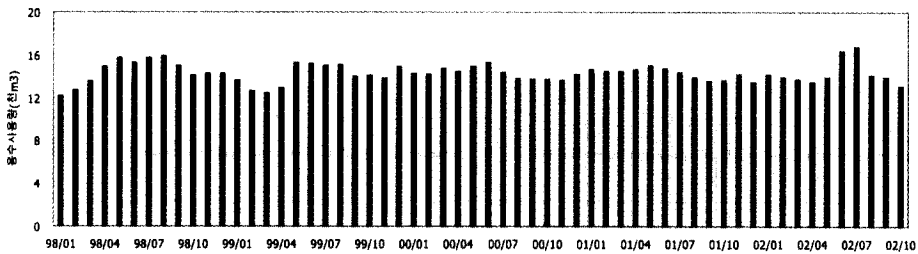


Fig. 5. 연초댐 유역의 용수사용량(1998-2002).

지니고 있다. Fig. 4는 1998년부터 2002년 기간의 연초댐의 유·출입량과 용수사용량을 나타낸 것으로 월평균 유입량은 최소와 최대량은 각각 2,370m³과 381,410m³으로서 그 비는 160가량이다. 1998년과 1999년의 강수량은 각각 2,749mm와 3,399mm로 매우 높았으며 이 두 해의 하절기에 다량의 유출이 발생한 것을 알 수 있다. 그러나 2000년과 2001년은 강수량이 1,679mm와 1,449mm로서 앞의 시기보다 다소 적었으며 따라서 유출이 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있다. 이는 두 기간에 대하여 호내의 체류시간이 매우 다르다는 점을 시사하며 따라서 연초호의 수질변화에 매우 중요한 요소로 작용할 것으로 추정된다. 한편, 거제지역으로 공급되는 용수사용량은 평균 14,000m³/일로 하절기에 다소 증가하나 대체로 일정한 편으로 나타났다.

2.4. 연초댐의 인공순환장치 현황

한국수자원공사에서는 연초댐의 수질문제를 해결하고자 1991년 7월에 간헐식 인공순환장치 5기를 설치하였고 1994년 10월에 상류에 2기를 추가로 설치하였다. 공기양수통은 분당 3~4회 분출을 기준으로 할 때 1일 5,500~9,600m³의 심층수를 표층으로 양수할 수 있는 것으로 산정된 바 있다. 그러나 댐 중양을 따라 설치된 인공순환장치의 연속가동에도 불구하고 여름철 녹조현상이 취수탑과 만곡부에서 반복적으로 나타났다. 1997년 10월에는 취수탑 주변에 산기식 인공순환장치 9기를 추가로 설치하였다(한국수자원공사, 2001). 연초댐의 인공순환장치의 가동은 상하층의 온도차이가 4°C 이상 되기 시작하는 4월 초부터 자연적으로 성층현상이 해소되는 10월까지 연속적으로 가동되었다. 연초호에 설치되어 있는 수중 폭기시설의 제원은 Table 5~Table 7에 나타난 바와 같

Table 5. 간헐식 인공순환장치 사양

NO.	양수통형식	양수통길이(mm)	Air Hose 길이(m)	기 타 사 양
1	가변형	9,000	94	<ul style="list-style-type: none"> • 양수통재질: FRP • 양수통직경: 500mm • 양수기통 두께: 7mm • Air Chamber Volume : 83.47l • 잠수용 특수고무호스 - 사용압력: 7kgf/cm² - 내경: 25mm
2	가변형	9,000	116	
3	고정식	8,000	242	
4	고정식	8,000	416	
5	고정식	8,000	416	
6	고정식	8,000	694	
7	고정식	8,000	942	

Table 6. 산기식 인공순환장치의 사양

수량	형식	규격	Air Hose 길이(m)	기타사양
9기	Air Diffuser	폭: 31.75mm 길이: 31.75mm 두께: 5.54mm 무게: 8.03kg	1,100	<ul style="list-style-type: none"> • 고압자중호스 - 외경: 23.8mm - 내경: 15.3mm - 무게: 0.56kg/m

Table 6. 연초담에 사용되는 공기압축기의 현황

수량	형식	대당규격	설치년도
4대	Screw 공냉식	토출압: 7kgf/cm ² 토출량: 6.74m ³ /min at 1 atm 동력: 37kw(50HP) 구동: 벨트(3V 7) 기동방법: 스타-델타기동(Y-)	<ul style="list-style-type: none"> • 1, 2 호기 : '91. 2 • 3, 4 호기 : '94. 10

다. 서 동일 등(2004a, 2004b)은 두 가지의 폭기 장치의 설계 방법을 이론적으로 개발하여 보고한 바 있다.

3. 연구 결과

Fig. 6은 본 연구기간 중 실측한 연초호의 강우량, 수온 및 엽록소-a 농도 분포를 각각 나타내고 있다. 여기서 저수지는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 호수 입구(Site 1), 호수중앙(Site 2), 취수탑 부근(Site 3)으로 구분되어 측정되었다. Site 1은 연초호 폭기장치의 영향이 가장 적을 것으로 예상되는 지역이며, Site 2와 Site 3은 각각 간헐식 및 산기식 폭기장치가 집중 설치된 지역이다. 서 동일 등(2002)은 여러 가지 수

질변수에 대한 조사 내용을 보고한 바 있다. 그림에 나타난 바와 같이 각 지역의 수온 및 엽록소 농도 분포는 큰 차이를 나타내고 있지 않다.

Fig. 7은 1991년부터 2003년까지 조사된 연초댐의 수질변화 (상, 중, 하층 평균수질) 특성을 나타내고 있다. 전반적으로 BOD, COD, TN 그리고 TP 등 수질 변수는 1991년과 1995년 사이에는 전반적으로 감소하는 경향을, 1996년과 1998년 기간에는 다소 높은

수준을 나타내며 1999년 이후에는 계절적으로 변화가 심한 특성을 나타내고 있다. 그러나 이러한 효과는 유역의 오염부하 변화와 연초댐에 저수된 수체의 체류시간에 따라 큰 영향을 받는 영향으로 추정되며 단 순히 폭기조에 의한 영향으로 보기는 매우 어렵다.

연초호의 인공순환 장치의 효과를 파악하는 데 있어서 가장 중요한 요소는 장치 설치 전의 수질자료와 과거 및 현재의 유역의 오염부하 유입 변화 특성 관

Table 8. 호수입구와 취수탑부근의 하절기 수질항목 평균값 비교(1991-2002, 5-9 월 평균)

항목	수온 (°C)	DO (mg/l)	BOD5 (mg/l)	COD (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)	pH	투명도 (m)	Chl-a (µg/l)
취수탑	23.25	7.66	2.67	3.39	0.70	35.92	7.33	1.50	17.24
호수입구	23.54	7.23	2.92	3.66	0.73	35.70	7.35	1.52	16.86
차이	-0.30	0.43	-0.25	-0.26	-0.02	0.21	-0.02	-0.03	0.38
차이(%)	1.3	5.6	9.3	7.8	3.4	0.6	0.3	1.8	2.2

Table 9. Wilcoxon 의 부호 서열 검증 방법 분석 결과

n = 48	+ Rank Sum	- Rank Sum
수온	597	579
DO	719	457
BOD5	401	775
COD	369	807
TN	464	712
TP	514	662
pH	522	654
투명도	563	613
Chl-a	662	514

런 자료, 퇴적물에 의한 영향등 호내의 오염물질 생성관련 자료 등이다. 그러나 우리나라의 저수지에는 이러한 자료들이 가용한 경우는 거의 없는 편이며 연초호의 경우도 예외는 아니다. Table 8과 Table 9는 Fig. 7에 나타난 자료 중 1991년부터 2002년 사이 5월부터 9월의 수질 자료들만을 선별하여 나타낸 것이다. Table 8에 나타난 바와 같이 취수탑 부근의 수온은 호수입구에 비하여 약간 감소된 것으로 나타나고 있으며 수질은 BOD5, COD 그리고 TN 농도가 각각 9.3%, 7.8% 그리고 3.4% 감소된 것으로 나타나고 있다. 그러나 TP, 투명도와 Chl-a의 농도는 취수탑 부근에서 오히려 약간씩 악화된 것으로 나타나고 있다. 그러나 이러한 분석 방법은 계절적으로 차이가 큰 숫자에 의하여 전체의 평균이 영향을 받을 수 있는 가능성이 존재한다.

투약에 의한 병세의 호전 여부 또는 처리장의 건설에 따른 하천의 수질개선 여부를 검사하기 위한 방법으로서 대응하는 자료쌍에 대한 Wilcoxon의 부호 서열 검증 방법(Wilcoxon's signed rank test for matched pairs)이 적절하게 사용될 수 있다(Neave and Worthington, 1988). Table 9는 대응하는 자료의 차이를 순위에 의해 열거하고 증가 또는 감소된 경우에

해당하는 순위를 합산한 후 이 값을 Wilcoxon test를 위한 한계치와 비교하여 통계적으로 의미가 있는지의 여부를 결정하는 방법이다. 자료의 개수가 48일 때, 취수탑 부근의 수질이 호수입구의 자료와 비교하여 개선되었다고 판단하는 1%와 5% 유의수준은 각각 362와 426이다. 표에 나타난 바와 같이 수질항목들의 - Rank Sum은 426보다 모두 크게 나타나고 있어서 개선효과는 신뢰성이 없는 것으로 분석되고 있다. 이와는 반대로 BOD5와 COD의 증가에 대한 서열의 합이 각각 401과 369로서 5% 유의수준에서 이 항목의 수질농도가 증가되었다는 것을 의미한다.

BOD5와 COD를 제외한 대부분의 수질변수는 양 지역간 거의 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 폭기조의 용량이 충분하여 전체의 호수에 걸쳐 영향을 나타내고 있거나, 이와는 반대로 폭기조가 수질변화에 영향을 나타낼 정도로 충분하지 않을 수 있는 가능성을 모두 시사하고 있다. 서동일(2004) Fig. 8에 나타난 바와 같이 연초호의 인공순환장치 용량이 Lorenzen and Fast(1979)의 자료와 호주(Water Resources Commission, 1986)의 자료와 비교

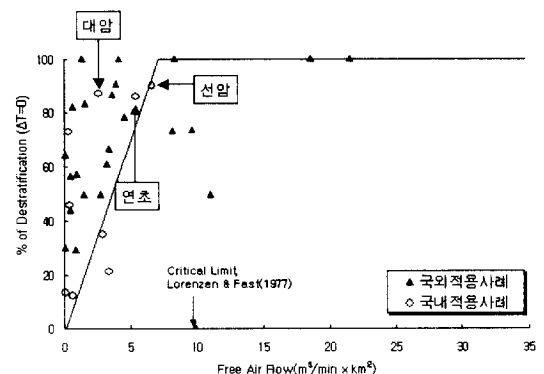


Fig. 8. 주입공기량과 호수의 크기에 따른 성층파괴효과 (서동일, 2004).

하여 보았을 때 호수전체를 혼합시키는 데 충분한 것으로 평가한 바 있다. 따라서 연초댐 내부의 자료를 호수입구 및 취수탑으로 구분하여 수질개선 효과를 분석하는 것은 신뢰성이 충분하지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

거제도의 연초호에 대하여 본 연구진이 2002년 1년간 현장에서 측정된 수질자료와 한국수자원공사에서 1991년 1월부터 2003년 3월까지 실측한 자료를 이용하여 인공 순환 장치의 효과를 분석하여 보았으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 연초호의 수질변화를 파악하는데 가장 중요한 자료는 유역에서 유입되는 오염원과 저니층의 재용출과 같은 호내에서 발생하는 오염물질의 동적특성 그리고 호내에서의 이동 및 변화특성이나, 이러한 자료가 가용하지 않았으며 이에 대한 조사 및 수질모델링 작업이 선행되어야 한다.

둘째, 연초호의 인공순환장치 운영의 효과를 파악하기 위해서는 인공순환장치가 설치되기 전의 수질자료와 현재의 자료가 비교되어야 하나 이에 대한 자료가 존재하지 않았다. 따라서 연초호에서는 인공순환장치의 가동시와 비가동시의 수질 변화 특성을 관찰해야 할 필요성이 있다.

셋째, 인공순환장치의 영향을 파악하기 위한 방법의 하나로 호수입구와 취수탑 부근의 자료를 비교하여 보았다. Wilcoxon test 결과, BOD5와 COD가 5%의 유의수준에서 영향권에서 오히려 악화된 것으로 나타나고 있으며 여타의 수질변수들은 양 지역에 대하여 서로 차이를 나타낸다고 보기 어려운 상황이다. COD 농도가 악화된 이유는 퇴적물의 부유 또는 저수지내의 자생효과 등을 거론할 수 있으나 본 연구에서 확실히 밝혀낼 수는 없었으며 추가의 조사가 필요한 사항이다. 또한, 인공순환장치의 영향반경을 정확하게 알 수 없었으며 따라서 영향권의 구분이 불분명한 상태이다. 인공순환장치의 영향반경은 호내의 성층현상, 저수지의 형상 그리고 장치에서 발생하는 수류 에너지를 함께 고려한 매우 복잡한 유체역학적인 해석이 필요한 부분이며 이에 대한 추가적인 연구가

또한 필요하다.

5. 사사

본 연구는 한국수자원공사 수도관리처의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이와 관련된신 오광진 처장, 정상기 부장, 이병두 과장 그리고 석관수 대리께 감사드립니다.

참고문헌

- 서동일 등(1994), 수중폭기에 따른 장래수질변화 예측 및 효과규명에 관한 연구보고서, 한국수자원공사보고서, p. 417.
- 서동일, 송무석, 허우명(2002), 수중폭기 운영관리 최적화 보고서, 한국수자원공사 보고서, p. 268.
- 서동일(2004), 우리나라 저수지의 수중폭기장치 운영에 의한 수질개선효과 분석, 상하수도학회지, 인쇄중.
- 서동일, 송무석, 황현동, 이은형(2004a), 저수지의 수질관리를 위한 간헐식 양수통형 인공순환장치의 설계방법, 상하수도학회지, 인쇄중.
- 서동일, 송무석, 황현동, 최재훈(2004b), 저수지의 수질관리를 위한 산기판형 인공순환장치의 설계방법, 상하수도학회지, 인쇄중.
- 한국수자원공사(1991), 수중폭기에 의한 대청호 수질개선 효과분석 보고서, p. 71.
- 한국수자원공사(1993), 연초댐 저수지의 수중폭기에 의한 수질개선 효과분석 보고서, p. 120.
- 한국수자원공사 수도관리처(2000), 2000 수중폭기 효과분석 보고서 (유지관리 및 운영지침서), p. 176.
- 한국수자원공사(2002), 2001년 수중폭기 효과분석 보고서, p. 217.
- 한국수자원공사(2004), 연초댐 환경개선사업 기본 및 실시 설계 보고서 (안), p. 105.
- Cooke, G. Dennis, Eugene B. Welch, Spencer A. Peterson, Peter R. Newroth(1993), Restoration and Management of Lakes and Reservoirs (Second Edition), p. 548, Lewis.
- Lorenzen, M. W. and A. W. Fast(1977), *A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management*, Ecol. Res. Ser. EPA 600/3-77-004, p. 126, USEPA.
- Water Resources Commission(1986), Review of the application of aeration/destratification techniques in Australian surface water storages for Steering Committee on Manganese Related Dirty Water Problems, p. 58, Local Authority Operations Division, Queensland, Australia.