

인공호소에서 마이크로 버블 포기에 의한 수리학적 영향반경과 용존산소 분포

Hydraulic Impact Scope and Dissolved Oxygen Distribution by the Micro-bubble Aeration in an Artificial Lake

최선화^{1*} · 박형석²

¹한국농어촌공사 농어촌연구원, ²충북대학교 환경공학과

Sunhwa Choi^{1*} and Hyungseok Park²

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 15634, Korea

²Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

Received 12 December 2016, revised 16 December 2016, accepted 20 December 2016, published online 31 December 2016

ABSTRACT: This study investigated the hydraulic impact scope and dissolved oxygen (DO) concentration distribution by the micro-bubble aeration in the Juksan Lake located in Asan city in Chungcheongnam-do province. A tracing experiment for hydraulic impact scope was used which constituted a 20% rhodamine solution. A 160 m-guideline was installed in the horizontal direction of the micro-bubble jet flow and the rhodamine concentration, water temperature, and DO concentration were measured at depths of 1 m, 2 m, and 3 m at intervals of 10 m. In the Juksan Lake, the effective range of jet flow discharged by the micro-bubble generator was about 40 m, and after then the jet plume moved up to 80 m to 120 m through the advection and diffusion processes of ambient water. DO concentration in the lake was maintained at 7.4–12.6 mg/L during tracking experiment. The DO of the lake sediments improved from 0.2 mg/L to 8.0 mg/L after applying micro-bubble aeration. In conclusion, the micro-bubble aeration can be an effective technology for the management and improvement of water quality in an agricultural reservoir.

KEYWORDS: Artificial lake, Dissolved oxygen (DO), Hydraulic impact scope, Micro-bubble, Rhodamine

요 약: 본 연구에서는 호소 수체에 산소를 포기시켜 주는 마이크로 버블 발생장치를 충남 아산에 위치하고 있는 죽산호에 설치하여 수체에 미치는 수리학적 영향반경과 용존산소 (DO) 농도 분포를 조사하였다. 수체에 미치는 수리학적 영향반경은 로다민 염료를 이용한 추적실험을 하였으며, 마이크로 버블 제트류의 수평방향으로 총 160 m 길이의 가이드라인을 설치하여 10 m 지점마다 수심 1 m, 2 m, 3 m에서 로다민 농도, 수온, DO 등을 측정하였다. 죽산호의 로다민 배경농도는 0.3–0.5 $\mu\text{g/L}$ 이었고, 용액 주입 후 15분 이내에 20–40 m 거리까지 확산되었으며, 거리 50–120 m의 수심 2 m 지점에서 로다민 농도가 3.1–12 $\mu\text{g/L}$ 를 나타냈다. 본 연구결과로부터 마이크로 버블 발생장치의 제트류에 의한 직접적인 영향 범위는 40–50 m이고, 그 이후에는 이류 및 확산에 의한 영향으로 120 m까지 이동하는 것으로 나타났다. 수중 DO 농도는 경과시간과 이격 거리에 상관없이 7.4–12.6 mg/L의 농도를 유지하였고, 마이크로 버블 적용 전의 호소 바닥층 DO 0.2 mg/L에서 운영 후 8.0 mg/L 이상으로 DO가 개선되는 것으로 나타났다. 본 연구 결과에 의하면 마이크로 버블 포기 기술은 농업용 호소의 수질 관리와 개선에 기여할 것으로 기대된다.

핵심어: 인공호소, 용존산소, 수리학적 영향반경, 마이크로 버블, 로다민 용액

*Corresponding author: csh@ekr.or.kr, ORCID 0000-0002-2516-5720

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

국내에는 농업용수 확보를 목적으로 인공적으로 조성된 호소가 전국에 약 17,500여개에 이르고 있다. 최근 기후변화 및 농업용 호소 유역의 도농복합형태 개발 등 오염원 증가로 농업용 호소의 수질오염도는 지속적으로 증가추이에 있다(MAFRA and KRC 2014a). 국내 호소의 수질은 유역환경인자와 강우 시 유역에서 유입되는 오염물질에 의한 영향, 호소 체류시간 등과 같은 수리수문학적 요인에 의해 많은 영향을 받고 있는 것으로 나타났다(Choi 2015).

호소 내에는 유역 내 미처리 생활오수 및 축산폐수 등과 같은 점오염원뿐만 아니라 야적된 축분, 농경지 등에서 유출되는 비점오염원 등이 처리 없이 유입되고 있어 부유물질, 유기물, 영양물질 등 오염물질의 종류가 다양하게 존재한다. 또한, 설치된 저수지는 퇴적층에서 인 등의 오염물질이 재 용출되고 있으며, 이러한 오염물질의 재 용출은 호소 부영양화를 촉진하는 중요한 원인으로 작용하고 있다(MAFRA and KRC 2014b).

전국의 약 17,500여개의 인공호소 중 69.4%가 설치된 지 50년 이상 된 것이며, 51.7%가 1945년 이전에 설치되어 70년 이상 된 호소이다. 이러한 호소는 오염물질이 장기간 퇴적되어 왔음을 의미하며, 퇴적물 내 오염물질이 재 부유나 확산 등과 같은 과정을 거치면서 수체의 내부오염원으로 작용할 수 있다(MAFRA and KRC 2015a). MAFRA and KRC (2015b)가 수행한 퇴적물에 관한 연구에서도 1960년대 이후 설치된 호소보다는 1960년대 이전에 설치된 호소에서 오염물질 용출이 크게 일어나는 것으로 분석되었다. 이러한 현상의 직접적인 원인은 수중의 용존산소(DO) 결핍이며, 퇴적물 층에서의 SOD(sediment oxygen demand)가 수체의 산소 소모의 대부분을 차지할 수 있다고 보고된 바 있다(Belanger 1981, Takada and Kato 1991, Gelda et al. 1995).

인공 호소와 대형 댐을 대상으로 한 호 내 수질개선기술은 그동안 주로 수중 포기장치 및 물순환 장치, 그리고 녹조 제거를 주 대상으로 하는 가압부상공법 및 녹조 제거선 등과 같은 물리화학적 기술 등이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 처리규모의 한계, 유지관리의 어려움, 경제성, 생태·환경적 영향 등의 문제점 때문에 실용화에 한계가 있었다(MAFRA and KRC 2014b).

최근 2000년대 들어서는 마이크로 버블을 이용한 산소

포기 기술이 개발되어 다양한 분야에서 적용되고 있다. 마이크로 버블 발생기술은 50 μm 이하의 기포를 발생시켜 산소를 직접 포기하는 기술로(Cha 2009), 이러한 미세기포는 1990년대에 일본을 중심으로 발생기술에 대한 연구가 진행되었고, 2000년대에 들어 다양한 분야에 적용하는 연구가 진행되고 있다(Kim and Yamamoto 2013).

마이크로 버블의 소형 발생기술은 사위기, 세척기 등에 사용되고, 대형 발생기술은 주로 대형 댐, 저수지 등 정체성 수역인 호소의 수질개선을 위해 개발되고 있으나, 아직까지 대규모 하천이나 호소를 대상으로 한 적용사례는 매우 미미하며, 규모가 아주 작은 연못이나 양식장 등에서의 적용 사례는 다수 있다(Cha 2009, Kim 2013). 대규모 하천이나 호소의 수질개선을 위해서는 응집부상공정과 연계하여 조류제거를 위해 다수 적용된 사례가 있다.

2015년도에 충남 아산시에 위치하고 있는 죽산호에서 마이크로 버블 포기기에 의해서만 호소 수환경 및 수질개선을 위한 목적으로 처음으로 적용되었다. 마이크로 버블 포기 적용기술을 호소의 수질개선기술로 적용하기 위해서는 발생장치의 제트류에 의한 수리학적 영향 변경 등의 설계 인자가 필요하나 아직까지 국내에서 이런 연구는 진행된 적이 없다. 최근 Lim (2016) 등은 가압식 마이크로 버블 발생장치를 이용하여 공기 중의 산소를 마이크로 버블로 전환하여 공급하면서 폭기조 내 DO 농도 및 산화환원전위(ORP) 변화에 대한 연구를 파일롯 규모(pilot-scale)로 진행하였다.

마이크로 버블을 이용한 수질개선기술은 호소 저층에 충분한 산소를 공급하여 저서층을 호기성 분해수역으로 개선시켜주는 자연친화적 정화기술이라고 판단되며, 향후 폭 넓은 적용이 예상된다. 본 연구에서는 죽산호에 설치되어 운영 중인 마이크로 버블 발생 장치를 대상으로 수체에 미치는 수리학적 영향변경과 호 내 DO 농도를 조사하여 농업용 호소의 수질관리 및 수질개선을 위한 계획수립의 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상지 개황

죽산호는 1942년도에 충청남도 아산시 선장면 죽산리에 설치된 농업용 저수지로서, 현재 농업용수 공급 및 유로 낚시터로 이용되고 있다. 죽산호의 유역은 완만한 구릉지로 논과 밭이 위치하고 있으며, 학성계곡에서 발원한 소하

천이 저수지 상류 우측에서 유입되고 있다. 죽산호의 시설 제원은 Table 1과 같이 총 저수량은 621.3천 m^3 , 저수지 만수면적은 23.8 ha이며, 유효 수심은 약 2-5 m로 하류 쪽으로 갈수록 깊은 수심을 보이고 있다 (MAFRA and KRC 2013). 죽산호의 수질현황 (2012-2014년)은 항목 별로 화학적산소요구량 (COD) 11.2-14.1 mg/L, 총질소 (TN) 1.916-2.344 mg/L, 총인 (TP) 0.112-0.184 mg/L를 나타내고 있어, 호소 수질환경기준의 V등급 이상에 해당하고 있는 호소이다.

2.2 마이크로 버블 발생기 설치

마이크로 버블 발생기는 Fig. 1과 같이 수심이 약 4 m 정도 되는 저수지 제방 앞쪽 100 m 간격으로 3지점(A 지점, 36.785000°N, 126.896111°E; B 지점, 36.784196°N, 126.896787°E; C 지점, 36.783896°N, 126.897361°E)을 선정하여 2015년 9월 16일에 설치하였다. 본 연구에 사용된 마이크로 버블 발생장치는 기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생장치로 총 3지점에 각 1 세트 (1 세트에 3기로 구성)씩 구성하여 저수지 바닥에서 상부 수면 쪽으로 1 m 떨어진 지점에 고정식으로 설치하였다. 총 공기 흡입량은 380 L/min이며, 사용동력은 1기당 2.2 kW로 총 19.8 kW를 사용하였다.

기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생장치는 기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생 방식으로 액체에 소용돌이

를 발생시켜 기압 차이로 기체를 흡입하며 소용돌이가 붕괴될 때 방출된 기포가 미세화하는 방식이다. 기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생 방식은 크게 2가지 방식이 있는데, 한 가지는 선회형 마이크로 버블 중 배관의 출구에 날개를 장착하여 선회류를 발생시키는 방식으로 액체는 기포를 포함하고 와류가 붕괴될 때 마이크로 버블이 발생하는 원리이고, 또 하나의 방식은 샤프트에 프로펠러를 장착하여 유체를 관내에서 회전시켜 와류를 발생시키는 방법이다. 기액 2상류 선회형 마이크로 버블 발생 방식은 일본 (주)바이클린 회사에서 개발한 기술로서, 장점으로는 1분에 100 L 정도의 대량의 마이크로 버블이 발생되며, 펌프에 이물질 막힘 현상이 없고, 동력소모가 적다는 특징이 있다. 본 연구에 사용된 마이크로 버블 발생장치는 수중펌프의 토출관에 특수하게 설계된 벤츨리형 제너레이터에 의해 물과 공기의 이상류 회전이 유도되고, 토출구에서 물 벽과 충돌하며 회전에너지가 파괴에너지로 변환하며 미세기포가 발생하는 원리이다 (Kim and Kim 2013).

2.3 로다민 실험설계

죽산호에 설치된 마이크로 버블 발생장치 제트류에 의한 마이크로 버블의 수리학적 영향반경을 평가하기 위해서 로다민 (rhodamine) 염료를 이용한 현장 추적실험을 2015년 10월 5일 오후 1시부터 6시까지 실시하였다. 로다민 용액은 생물체에 사용되는 형광염료로서 하천이나 호

Table 1. Characteristics of the study site, Juksan Lake.

Drainage area (ha)	Total storage ($\times 10^3 m^3$)	Effective storage ($\times 10^3 m^3$)	Water surface area (ha)	Surface area of reservoir (ha)	Average water depth (m)	Construction year
143.0	621.3	615.0	23.8	29.7	2-3	1942

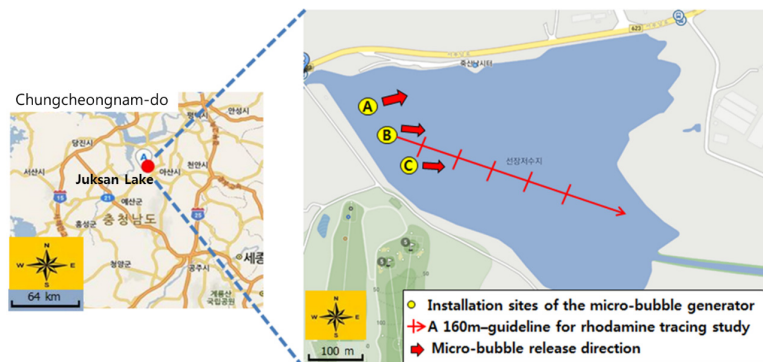


Fig. 1. Map showing installation sites of the micro-bubble generator and guideline laying for the rhodamine tracing study in the Juksan Lake.

소에서 주입된 용액의 확산범위 등의 추적실험 등에 많이 이용되고 있으며, 권장 농도범위 내에서 사용할 경우 자연 생태계에 무해하며, 미국 연방지질조사국 (USGS, U.S. Geological Survey) 규정 (1966)에는 상수원으로 사용 되는 곳에서 형광 염료의 주입량 농도가 10 $\mu\text{g/L}$ 를 넘지 않도록 규정되어 있다.

죽산호의 마이크로버블 추적실험을 위해서 사용된 로다민 용액의 주입량은 저수지 체적인 621,300 m^3 을 적용하여 0.464 kg을 산정하였다. 로다민 염료는 호소수와 희석하여 마이크로 버블 발생기의 공기 흡입구를 통해 약 2 분 간 연속 주입하였다.

로다민 추적실험은 마이크로 버블 발생장치 B를 대상으로 하였으며, 마이크로 버블 제트류의 수평방향으로 10 m 간격으로 하여 총 160 m의 거리에 가이드라인을 Fig. 1과 같이 설치하였다. 로다민 용액을 주입한 후 가이드라인에 따라 거리간격 10 m마다 각 지점별로 수심을 측정 한 후, 그 지점의 수심 1 m, 2 m, 3 m 수층에서 각각 로다민 센서 (YSI 6130, 측정범위 0-200 $\mu\text{g/L}$)를 부착한 다항목 수질측정 장치인 YSI 6600를 이용하여 로다민 농도, 수온, DO 등을 측정하였다. 또한, 실험을 수행하는 동안 기상장치(Davis WS-Pro2_Plus)를 설치하여 풍향 및 풍속을 측정했고, 측정 자료를 로다민 추적실험 결과의 해석에 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 풍향 및 풍속

죽산호에서 로다민 용액을 이용한 추적 실험하는 동안 측정된 풍향 및 풍속은 Fig. 2와 같다. 바람의 방향은 주로 북서쪽에서 남동쪽으로 부는 바람으로 저수지 좌안에서 우안으로 불었으며, 따라서 바람의 방향을 고려하여 가이드라인을 Fig. 1과 같이 설치하였다. 풍속은 평균 0.98 m/s (0.4-1.8 m/s) 이내로 잔잔한 바람으로 실험에 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단되었다.

3.2 로다민 농도

마이크로 버블 포기에 의한 수리학적 영향반경을 조사하기 위하여 로다민 염료 주입 후 경과시간에 따라 T1 (10-15 min), T2 (20-60 min), T3 (80 min 이후)의 3개 구간으로 구분하여 실험결과를 해석하였다. 염료 주입 후 염료가 70 m까지 이동하여 배경농도와 유사한 농도가 되는데 약 15분이 경과되었으며 (T1), 2차로 다시 0 m 지점부터 배경농도와 유사한 농도 지점인 거리 150 m까지의 측정에 소요되는 시간이 20-60분 경과 (T2), 경과시간 80 분 이후부터 배경농도와 유사한 거리 120 m까지의 측정 구간 (T3)의 3개 구간으로 구분하였다. 염료 주입 후 시간

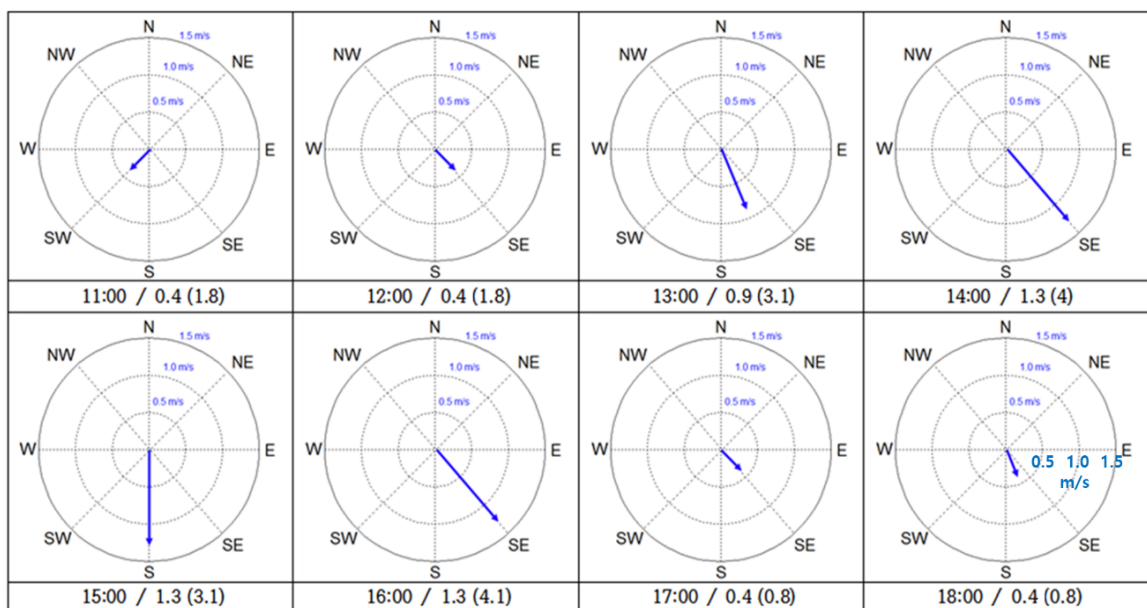


Fig. 2. Wind direction and speed in the Juksan Lake during the experiment (the notation under the diagram indicates monitoring time / average wind speed (maximum wind speed) in m/s).

경과별 수면 농도변화를 Fig. 3에 나타내었고, 경과시간 및 거리에 따른 수심별 로다민 농도변화를 Table 2에 나타내었다.

로다민 용액을 호소에 주입하기 전 죽산호의 배경농도

는 물 속 형광물질의 영향으로 0.3-0.5 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났고, 이러한 측정치는 경기 시흥에 위치한 매화호의 배경농도 0.2-0.3 $\mu\text{g/L}$ 와 유사한 농도로 나타났다 (MAFRA and KRC 2015a).



(a) Start



(b) 2 minutes later



(c) 3 minutes later



(d) 4 minutes later



(e) 5 minutes later



(f) 10 minutes later



(g) 15 minutes later



(h) 30 minutes later

Fig. 3. Change of water surface with time after the rhodamine injection in the Juksan Lake.

Table 2. Rhodamine concentration ($\mu\text{g/L}$) with the distance from the injection point and water depth

Time after the injection (min)	Water depth (m)	Distance from the injection point (m)													
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
T1 (10-15)	1		0.5	13.5	11.7	14.0	0.6	0.4	0.4						
	2		0.5	13.7	11.0	3.1	0.5	0.3	0.4						
	3		0.5	10.2	11.0	1.0	0.4	0.3	0.3						
T2 (20-60)	1	1.5	4.2	4.4	1.2	1.4	2.1	2.5	3.3	2.0	2.3	0.7	1.0	1.4	0.5
	2	6.2	2.1	2.5	3.7	0.7	7.3	8.4	7.6	12.0	5.9	6.3	5.7	3.1	0.5
	3	6.2	2.5	2.0	3.9	4.1	4.8	4.5	1.8	1.7	1.7	1.7	2.6	1.2	0.5
T3 (over 80)	1	0.4		0.5		0.5		0.4		0.6		0.7		0.5	
	2	0.5		0.4		0.4		0.5		0.7		0.6		0.4	

로다민 용액 주입 후 첫 번째 측정 (T1 구간)에서 주입된 용액은 마이크로 버블 제트류의 영향으로 20-40 m 거리까지 이동하였으며, T2 구간에서는 거리 50-120 m의 수심 2 m 지점에서 3.1-12 $\mu\text{g/L}$ 의 높은 농도로 측정되었고, 특히 거리 80 m 지점에서 12 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높은 농도를 나타냈다. 측정 약 15분 후, 거리 40 m 부근에서 로다민의 농도는 0.7 $\mu\text{g/L}$ 로 마이크로 버블 발생장치 인근의 농도 6.2 $\mu\text{g/L}$ 보다 훨씬 낮았으며, 이는 제트류의 역류(backwater) 현상에 의한 것으로 판단된다. 실제 촬영영상을 분석해본 결과, 로다민 주입 15분경과 후에 마이크로 버블 발생장치 주변에서 염료가 하층으로부터 올라오는 것이 확인되었다. T3 구간에서는 거리 80-100 m 구간에서만 미세하게 로다민 농도가 계측되었다.

죽산지에서의 로다민 추적실험 결과를 종합해보면, 마이크로 버블 제트류는 15분 후 평균 이동속도 약 5 cm/sec로 30-40 m까지 이동하였고, 대부분의 제트류 운동량은 이 지점에서 소멸되는 것으로 판단된다. Jet는 좁은 구멍에서 액체나 기체 등이 고속으로 분출되는 상태를 말하며, 운동량(MV)에 의해 흐름을 발생시키며, 운동에너지는 주변의 유체와의 혼합 및 난류에 의해 손실되거나 운동량은 보존된다.

거리 40 m 이후부터는 후방에서 계속 유입되는 제트류의 영향으로 이류(advection)와 주변 수체와의 농도 차이에 따른 확산(diffusion)의 효과로 약 1시간 후 80-120 m 지점까지 평균 이동속도 2-3 cm/sec로 이동하는 것을 알 수 있었다. 그 이후 시간부터 로다민을 포함한 수체(plume)는 3차원 확산을 통해 희석되었으며, T3 조사구간에서는 배경농도와 유사하였다. 이러한 결과로부터, 마이크로 버블 제트류의 물리적 영향범위는 약 80-120 m로 판단되며, 거

리 120 m 이후부터는 바람과 물 흐름에 의한 난류 확산의 영향으로 염료가 미세하게 유동되다가 150 m 지점에서 완전 소멸되는 것으로 판단된다.

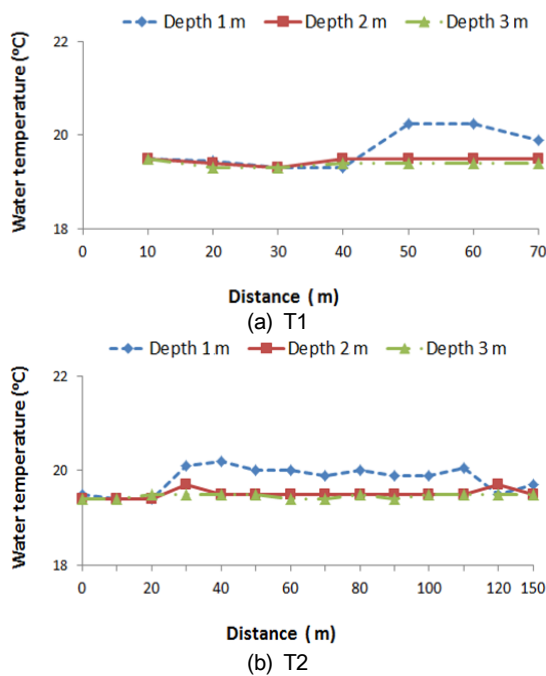
본 연구결과로부터 마이크로 버블 발생장치를 호소 수질개선기술로 적용하기 위해서는 최소 직경거리 120 m 구간마다 1기의 설치가 필요하며, 죽산호 만수면적 23.8 ha을 기준으로 했을 때 최소 5 세트를 설치해야 호소 전체에 마이크로 버블이 공급될 것으로 판단된다.

3.3 수온

로다민 용액 주입 후 경과시간에 따른 측정구간 내의 수심별 수온($^{\circ}\text{C}$)변화를 Fig. 4에 나타내었다. 측정시간 동안의 외기온도는 21.9-23.9 $^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었고, 평균 풍속은 0.98 m/s로 바람이 거의 없는 날씨였다. T1 구간은 0-40 m 거리에서의 평균 수온은 19.4 $^{\circ}\text{C}$, 50-70 m 거리구간에서는 20.1 $^{\circ}\text{C}$ 로 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 차이를 보였고, 수심 2 m 수층에서의 수온은 19.3-19.5 $^{\circ}\text{C}$ 로 거리에 상관없이 일정한 수온을 보였다. 수심 3 m 지점에서도 19.3-19.4 $^{\circ}\text{C}$ 로 수심 2 m와 유사한 결과로 나타났다. T2 구간은 0-20 m 거리에서 19.4-19.5 $^{\circ}\text{C}$ 로 표층과 하층의 수온차이가 거의 없었고, 거리 30-110 m에서는 수심 1 m에서는 19.9-20.2 $^{\circ}\text{C}$ 인 반면에 수심 2 m, 3 m 수층에서는 19.4-19.5 $^{\circ}\text{C}$ 로 거리에 따른 수온의 변화가 거의 없었다. 이처럼 마이크로 버블 발생장치로부터 40 m까지의 거리에서 수심에 상관없이 일정한 수온을 보인 이유는 마이크로 버블 제트류에 의한 상, 하층간 수직 혼합 효과로 예상되며, 장치에 의한 직접적인 혼합범위는 거리 40 m 이내라고 판단된다.

Table 3. Dissolved oxygen (mg/L) with the distance from the injection point and water depth.

Time after the injection (min)	Water depth (m)	Distance from the injection point (m)													
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	150
T1 (10-15)	1		8.4	7.8	7.4	9.3	10.8	12.0	9.2						
	2		7.6	7.2	7.2	7.7	7.2	7.7	7.2						
	3		7.1	7.1	7.1	7.4	7.1	6.9	6.6						
T2 (20-60)	1	8.2	7.8	7.7	11.0	12.3	10.3	11.4	9.8	11.0	10.5	11.3	12.6	11.7	11.7
	2	7.7	7.7	7.8	9.4	9.4	7.9	8.9	7.8	8.4	7.7	8.7	9.1	10.7	8.8
	3	7.7	7.5	7.9	7.9	8.1	7.7	7.6	7.3	7.8	7.6	7.9	8.2	8.8	8.8
T3 (over 80)	1	9.0		9.1		12.0		11.4		13.1		10.4		10.4	
	2	8.6		9.1		10.1		10.1		9.9		9.9		11.0	

**Fig. 4.** Water temperature with the distance from the injection point and water depth at the 10-15 minutes (a) and 20-60 minutes (b) after the rhodamine injection.

3.4 DO 농도 분포 특성

3.4.1 로다민 추적실험 시 DO 농도

로다민 용액 주입 후 경과시간에 따른 측정구간 내의 DO 농도변화를 Table 3에 나타내었다. T1 구간에서의 수심에 따른 DO 농도는 수심 1 m 수층에서는 거리 30 m 이전까지는 7.4-8.4 mg/L의 농도를 보이다가 거리 40 m 이후부터는 9.3-12.0 mg/L의 농도를 나타냈다. 수심 2 m와 수심 3 m 수층에서는 거리에 관계없이 6.6-7.7 mg/L의 농

도로 측정되었다. T1의 거리 30 m 지점에서 모든 수층에서 유사한 DO 농도로 측정되어 이 지점에서 마이크로 버블에 의한 수직적 완전혼합이 이루어지는 것으로 판단된다. T2 구간에서는 거리 20 m 지점까지 수층에 따른 DO 차이가 거의 없었으며, 그 이후부터 수심 1-2 m에서는 DO 농도가 상승하였고, 수심 3 m에서는 마이크로 버블 발생장치 지점 및 표층과 유사한 농도를 나타냈다. 수심 1 m 수층에서는 거리 30 m 이후부터 DO 농도가 상승하여 10.3-12.6 mg/L의 높은 농도를 보였다. 수심 2 m 수층에서도 거리 30 m 이후부터 DO 농도가 상승하여 8.4-10.7 mg/L의 농도를 보였다. T3 구간에서는 T2 구간과 동일하게 거리 20 m 지점까지 수층에 따른 DO 차이가 거의 없었고, 거리 30 m 이후부터 수층 1 m에서 DO 농도가 10 mg/L로 증가하는 결과를 보였다. 로다민 추적실험 동안 DO 측정 결과를 종합해보면, 마이크로 버블 발생장치 인근인 10-30 m 지점에서 상, 중, 하층 DO 농도가 유사하였고, 30-40 m 이후보다 DO가 낮아지는 경향은 T1, T2, T3 구간에서 모두 유사하였다. 이러한 결과는 마이크로 버블 발생장치에서 포기된 마이크로 버블에 의해 상층과 하층의 물이 섞이면서 나타난 수직혼합 효과에 의한 영향으로 판단된다. 이러한 경향은 Fig. 4의 수온 조사결과에서 거리 0-30 m 범위에서 수심에 관계없이 수온이 거의 비슷한 결과와 일치하였다.

3.4.2 마이크로 버블 적용 전후 DO 농도 비교

마이크로 버블 포기에 의한 호소의 DO 농도 개선효과를 평가하기 위하여 마이크로 버블 발생장치 운영 전과 운영 후로 구분하여 DO 농도를 조사하였다. 마이크로 버블 발생장치는 2015년 9월 16일에 설치하여 하루 24시간씩

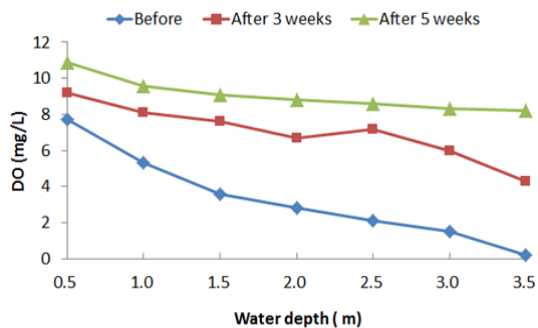


Fig. 5. Dissolved oxygen (DO) concentration with the water depth and the operating period.

계속 가동하였다. DO 측정은 호소 전체적으로 18개 지점을 선정하여 수심 50 cm 간격으로 측정하였고, 지점별 평균 DO 농도는 Fig. 5에 나타내었다. 가동 전에는 DO 평균 농도가 표층에서는 약 7.7 mg/L로 나타났고, 수심에 따라 거의 수직적으로 감소하여 호소 저서층에서는 약 0.2 mg/L로 거의 무산소 상태를 보이고 있었다. 마이크로 버블 가동 3주 후에는 수심 3 m까지의 모든 수층에서 DO 농도가 평균 6.0 mg/L 이상을 보였고, 퇴적층에서도 DO 약 4.3 mg/L의 농도를 나타내었다 (Fig. 5). 가동 5주 후에도 수심에 상관없이 전체적으로 DO 농도가 8.0 mg/L 이상의 높은 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

호소처럼 정채된 수역에서 퇴적유기물이 지속적으로 쌓이게 되면 SOD가 수층의 산소 소모에 큰 비중을 차지할 수 있게 된다. 기존의 여러 연구결과에서 퇴적물 층에서의 SOD (sediment oxygen demand)가 수체의 산소 소모의 대부분을 차지할 수 있다고 보고하였다 (Belanger 1981, Takada and Kato 1991, Gelda et al. 1995, Kang and Song 2000).

퇴적층의 산소요구는 생물의 호흡 등의 대사에 필요한 생물학적 퇴적층 산소요구 (biological sediment oxygen demand, BSOD)와 환원된 무기물 (CH_4 , NH_3 , HS^- , Fe^{2+} , Mn^{2+} 등)이 저층 표면 또는 수층에서 산화될 때 발생하는 화학적 퇴적층 산소요구 (chemical sediment oxygen demand, CSOD)로 구성된다 (Belanger 1981, Tomaszek 1991, Gelda et al. 1995). 호소의 수환경에서 BSOD가 SOD의 대부분을 차지하며, 특히 퇴적물에 존재하는 미생물의 호흡에 의해 소모되는 DO가 BSOD의 대부분을 차지한다고 보고되었다 (Tomaszek 1991). 화학적 퇴적층 산소요구는 퇴적 유기물질이 많거나, 산소 고갈시 혐기성 호흡에 의해 환원된 물질들이 수층으로 많이 용출될수록

증가하는데 수층에서는 큰 비중을 차지하지 못하지만 저층에서는 화학적 산소소모가 비교적 크게 나타날 수도 있다고 하였다 (Sommaruga 1991, Gelda et al. 1995, Kang and Song 2000).

국내에서도 관련된 연구결과가 있는데, 소양호의 심수층에서 많은 퇴적유기물 축적으로 인해 무산소층이 형성된 사례에 대해 보고된 바도 있다 (Kim and Cho 1989). 국내 농업용수 공급을 목적으로 조성된 인공호소도 설치된 지 50년 이상 된 노후화된 저수지가 70%를 차지하고 있어 오랜 기간 오염물질의 퇴적으로 인해 퇴적층의 산소소모가 상당할 것으로 판단된다. 호소 퇴적층의 DO 공급으로 수환경을 개선시키면 퇴적 오염물질에서 기인된 내부부하에 의한 수질오염을 상당량 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 공기 중의 산소를 호소 수체에 포기시켜주는 마이크로 버블 발생장치를 충남 아산에 위치하고 있는 죽산호에 설치하여 수체에 미치는 수리학적 영향반경과 DO 농도를 조사하였다. 마이크로 버블 포기장치 제트류에 의한 직접적인 영향은 40-50 m이고, 그 이후 이류 및 확산에 의한 영향으로 120 m까지 이동하는 것으로 판단되며, 수중 DO 농도는 경과시간과 이격거리에 상관없이 7.4-12.6 mg/L의 농도를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 마이크로 버블 발생장치 운영이전에는 호소 DO 농도가 표층에서는 평균 7.7 mg/L인 반면에 호소 저서층에서는 0.2 mg/L로 거의 무산소 상태를 보이고 있었으나, 가동 5주 후부터는 수심에 상관없이 전체적으로 DO 농도가 8.0 mg/L 이상의 높은 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

국내의 인공 호소는 전체 70% 이상이 설치된 지 50년 이상 된 노후화된 저수지가 대부분이다. 노후화된 저수지는 오염물질의 오랜 퇴적으로 인해 호소 저서층의 오염도가 높으며, 이러한 오염물질의 재 용출로 인한 내부부하가 저수지 수질에 미치는 영향이 클 것으로 예측된다. 호소 퇴적층 오염물질의 관리를 위해서는 준설, 캠퍼 등 다양한 방법이 소개되고 있으나 이러한 방법들을 현장에 직접 적용하기에는 경제성 및 2차 오염문제 등으로 실용화가 아직은 어렵다고 생각된다. 마이크로 버블을 이용한 산소 포기방법은 장치 설치 및 유지관리가 매우 용이하며, 2차 오염이 없는 친환경적인 수질개선편리시설이라고 판단된다. 호소 퇴

적층에 DO를 공급하는 방법은 수환경을 전체적으로 개선하여 호소 부영양화 및 녹조 발생을 사전에 예방할 수 있는 효과적인 방법으로 판단된다.

References

- Belanger, T.V. 1981. Benthic oxygen demand in Lake Apopka, Florida. *Water Resources* 15: 267-274.
- Cha, H.S. 2009. Present state and future prospect for micro-bubble technology. *Bulletin of Food Technology* 22: 544-552. (in Korean)
- Choi, S.H, Kim, H.D., Lee, T.H. and Park, W.Y. 2015. Study on main factors affecting water quality using a multivariate statistical analysis in the agricultural lakes. *Journal of the Korea National Committee on Irrigation and Drainage* 22: 82-97. (in Korean)
- Gelda, R.K., Auer, M.T. and Effler, S.W. 1995. Determination of sediment oxygen demand by direct measurement and by inference from reduced species accumulation. *Marine and Freshwater Research* 46: 81-88.
- Kang, Y.M. and Song, H.G. 2000. Effect of bottom sediments on oxygen demand of overlying water in onshore of Lake Paldang. *Korean Journal of Limnology* 33: 23-30. (in Korean)
- Kim, B.C. and Cho, K.S. 1989. The hypolimnetic anoxic zone and the metalimnetic oxygen minimum layer in a deep reservoir Lake Soyang. *Korean Journal of Limnology* 22: 159-166. (in Korean)
- Kim, G.R. 2013. Water treatment using by micro-bubble- domestic application-. *Journal of the Korea Fisheries Infrastructure Promotion Association* 4(3): 37-42. (in Korean)
- Kim, H.J. and Yamamoto, T.C. 2013. Implement of water quality environment using by micro-bubble - abroad application -. *Journal of the Korea Fisheries Infrastructure Promotion Association* 4(3): 43-48. (in Korean)
- Kim, J.B. and Kim, G.R. 2013. Implement of water quality environment using by micro-bubble. *Journal of the Korea Fisheries Infrastructure Promotion Association* 4(3): 30-36. (in Korean)
- Lim, J.Y, Kim, H.S., Park, D.S., Cho, Y.G., Song, S.J., Park, S.Y. and Kim, J.H. 2016. Characteristic of mixing and DO concentration distribution in aeration tank by microbubble supply. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 17: 251-259 (in Korean)
- MAFRA and KRC. 2013. The Study on Water Quality Monitoring of the Agricultural Reservoirs (2013). Rural Research Institute, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Korea Rural Community Corporation (KRC), Ansan, Korea. pp. 50-142. (in Korean)
- MAFRA and KRC. 2014a. 2013 Annual Report on Agricultural Production. Rural Research Institute, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Korea Rural Community Corporation (KRC), Ansan, Korea. (in Korean)
- MAFRA and KRC. 2014b. The Study on Convergence Technologies Development and Application for Agricultural Water Treatment (I). Rural Research Institute, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Korea Rural Community Corporation (KRC), Ansan, Korea. (in Korean)
- MAFRA and KRC. 2015a. The Study on Convergence Technologies Development and Application for Agricultural Water Treatment (II). Rural Research Institute, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Korea Rural Community Corporation (KRC), Ansan, Korea. pp. 166-171. (in Korean)
- MAFRA and KRC. 2015b. The Study on Management and Control of the Agricultural Reservoir Sediments. Rural Research Institute, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA) and Korea Rural Community Corporation (KRC), Ansan, Korea. (in Korean)
- Sommaruga, R. 1991. Sediment oxygen demand in manmade Lake Ton-Ton (Uruguay). *Hydrobiologia* 215: 215-221.
- Takada, K. and Kato, K. 1991. Benthic oxygen consumption in Lake Suwa. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 24: 1091-1094.
- Tomaszek, J. 1991. Oxygen consumption by bottom sediments. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 24: 3045-3049.