저수심 저수지에 적용 가능한 무동력 수류순환시스템의 수질개선 효과 Water Quality Improvement of Non-Powered Water Circulation System for Shallow Reservoirs

장여주 · 임현만* · 정진홍* · 박재로* · 장향연 · 박나리 · 김원재*,†

Yeo-Ju Jang · Hyun-Man Lim* · Jin-Hong Jung* · Jae-Rho Park* ·

Hyang-Youn Chang · Na-Ri Park · Weon-Jae Kim*,†

과학기술연합대학원대학교 스마트도시·건설융합

*한국건설기술연구원 국토보전연구본부

University of Science and Technology (UST), Smart City & Construction Engineering

*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT),

Department of Land, Water and Environment Research

(Received August 7, 2018; Revised October 20, 2018; Accepted November 5, 2018)

Abstract : A large number of reservoirs in Korea have experienced eutrophication and deterioration of water quality including the occurrence of algal blooms, anaerobic state near the bottom due to excessive oxygen consumption, and the elution of nutrients from the sediment. Non-powered water circulation system inducing downward flow from wind-driven current has been developed for domestic reservoirs with shallow water depth. One of the functions of the system is to improve water quality by breaking thermal stratification and prohibiting anaerobic condition near the bottom. The monitoring results of the test-bed, which have been observed for 1 year, showed clearly that the circulation system could maintain DO (dissolved oxygen) concentration higher than 5 mg/L in deep layer (hypolimnion) and also mitigate DO supersaturation about 17% in surface layer (epilimnion).

Key Words : DO Improvement, Eutrophication, Stratification, Water Circulation, Water Quality Improvement

요약 : 한국의 저수지들은 부영양화 및 수질악화 문제를 지속적으로 겪고 있으며, 녹조의 대발생, 저층의 산소소비량 증가와 빈 산소화(혐기화) 및 저질층에서의 영양염류 용출 등의 문제가 발생한다. 얇은 수심을 갖는 국내 저수지의 수질문제를 저감하기 위한 무동력 수류순환시스템을 개발하였다. 해당 시스템은 바람과 수류에너지를 이용하여 표층수의 하강순환을 유도함으로써 수층의 성층화와 저층의 빈산소화를 방지하고 수질을 개선한다. 해당 시스템을 적용한 테스트베드를 구축·운영한 결과, 1) 심층의 빈산소화를 개선하여 DO(용존산소)를 5 mg/L 이상으로 유지하며, 2) 표층의 DO 과포화를 약 17% 감소시키는 효과가 관찰되었다.

주제어 : DO 개선, 부영양화, 성층현상, 물순환, 수질개선

1. 서론

최근 국내의 수많은 호수와 저수지에서 다양한 수질오염 물질의 유입으로 인한 부영양화와, 정체수역 증대와 유속 감소 및 일조량 증가로 인한 녹조의 대량 발생 등이 사회적 문제가 되고 있다.¹⁾ 일반적으로 저수지와 같이 정체된 물은 식물성 플랑크톤의 증식으로 인해 부영양화의 발생 가능성이 높으며, 인위적인 오염물질이 유입될 경우에는 부영양화가 빠르게 진행되어 저수지 본래의 이수 목적을 상실하는 경우를 흔히 볼 수 있다.²⁾ 최근 들어 산업의 고도화와 인구 증가 및 밀집화, 생활수준의 향상으로 저수지로 유입되는 인위적인 오염물질의 양이 크게 늘고 있어 수질이 악화되어 가는데 반하여, 이를 보전하고 개선하는 방안은 미흡하여 수질관리에 차질을 빚고 있다.³⁾

국내에는 18,000여 개의 저수지가 있으며, 그 중 90% 이상은 5 m 이하의 얇은 수심을 갖고 있다.⁴⁾ 수심이 얇은 저수지는 일반적으로 전 수층이 잘 혼합되고 수체 전체에 걸

쳐 DO (dissolved oxygen) 농도가 풍부한 것으로 알려져 있으나,⁵⁾ 실제로는 수심이 2 m 이하의 얇은 저수지에서도 농도 및 온도성층이 발생하며 저층의 DO가 2 mg/L 이하인 빈산소화가 발생할 수 있다는 연구결과도 보고되고 있다.⁶⁾ 국내 대부분의 저수지의 경우 생성연도가 오래되었고, 깊은 유기물 퇴적층을 가지며, 유역 내 임야의 면적이 상대적으로 넓고, 인위적인 방류시설이 없어 부영양화가 지속적으로 진행되고 있다.⁷⁻⁹⁾ 이러한 저수지 대부분은 농업용수원 또는 식수원으로 이용되기 때문에 수질개선의 중요성 또한 점점 부각되고 있는 실정이다.^{10,11)}

저수지의 부영양화가 지속됨으로써 표층에는 과도한 조류가 발생하게 되고, 정체현상으로 인해 수류순환이 원활히 이루어지지 않아 대발생이 지속된다.¹²⁾ 이때 표층에서는 과도하게 번성한 조류의 영향으로 DO 과포화 상태가 발생하고, 사멸된 조류가 침강하여 분해됨에 따라 저층에서는 빈 산소화 및 혐기화 상태가 나타나게 된다. 또한 마이크로시스틴, 아나톡신 등 독성물질 유발, 맛·냄새 유발물질(2-MIB,

† Corresponding author E-mail: wjkim1@kict.re.kr Tel: 031-910-0303 Fax: 031-910-0291

Geosmin) 발생, 침강된 유기체로부터 영양염류(인·질소 등) 용출의 문제도 수반하며, 저층의 빈산소화는 중금속(Mn, Fe) 용출에 기인하는 흑수 및 적수 현상, 저층으로부터의 유해가스(메탄, 황화수소, 암모니아 등) 발생 등의 원인이 되기도 한다.¹³⁾

이를 방지하기 위한 대책으로 1) 인위적 수류순환을 통한 성층현상 파괴, 2) 폭기를 통한 직접적인 산소 공급, 3) 살조제 및 응집제 투여, 4) 퇴적물의 준설, 5) 조류 및 수초의 직접 제거 등이 시행되고 있다.^{14,15)} 이 중 성층현상을 막기 위한 방법으로는 인공폭기와 대류식 순환방식 및 밀도류 확산방식 등이 적용되고 있다. 인공폭기는 호수 바닥에 설치된 공기주입관을 통하여 압축공기를 공급하여 심층수를 상승시키고 수체의 전체적인 혼합을 도모함으로써 성층현상의 파괴 및 심층의 무산소 상태를 완화하는 방법으로, 호수의 성층 파괴 및 심층의 DO농도를 증가시키는 효과가 있다. 다만, 수심이 얇은 호수에서는 오히려 수직순환에 의해 심층의 영양염류가 표층으로 쉽게 공급되어 조류의 성장에 도움을 줄 가능성 또한 존재한다.¹⁶⁾ 대류식 순환방식은 임펠러를 이용한 물순환 방식이고,¹⁷⁾ 밀도류 확산방식의 경우 표층과 심층의 물을 수온약층에 확산시키는 방식으로,¹⁸⁾ 위에서 기술한 방식들은 모두 추가적인 동력공급을 필요로 하기 때문에 설치장소에 제한이 따르고 경제성 측면에서 비효율적이라는 단점이 지적되고 있다. 심층폭기의 경우 성층을 파괴하지 않고 무산소 상태의 심층에 직접 공기를 주입시킴으로써 금속이온(철, 망간 등)을 산화시키거나 저질층에서의 인 용출을 줄이는 방법으로, 시설 및 유지비용의 문제로 대규모로 도입하기에는 어려움이 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁶⁾

따라서 기존 기술이 추가적인 동력공급을 필요로 함과 동시에 대부분의 기술이 수류를 상향류로 순환시키는 단점을 보완·개선하여, 자연에너지를 사용하는 무동력 시스템으로서 조류가 집중적으로 번성하고 DO가 풍부한 표층수를 심층으로 하강시킴으로써 정체된 수역의 수질개선에 기여하

는 기술을 개발하고자 하였다. 해당 기술은 바람에 의해 생성된 표층수를 심층으로 하강 유도하여 수류를 순환시키는 원리를 채택하고 있어, 영양물질을 고농도로 함유하고 있는 심층수를 상승시킬 때 발생하는 문제점을 개선함과 동시에, 빈산소화된 심층에 DO가 풍부한 표층수를 공급하여 심층폭기 방식과 동일한 효과를 낼 수 있도록 하였다. 또한, 한국에서 가장 일반적인 5 m 이내의 얇은 수심의 저수지⁴⁾에 적용이 용이하도록 디자인하여 범용성을 높였으며, 추가적인 동력공급 없이 자연에너지만으로 구동 가능하도록 하였다. 해당 시스템의 성능을 관찰하기 위하여 테스트 베드를 구축하고, 실시간으로 장기간에 걸쳐 모니터링하여 수질개선 효과를 도출하였다. 또한, 부수적으로 국내 저수심의 저수지에서 발생할 수 있는 농도 및 온도성층에 대하여 파악할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 무동력 수류순환시스템의 원리 및 구조

바람과 수류에너지를 이용하여 표층수의 하강순환을 유도함으로써 수층의 성층화와 저층의 빈산소화를 방지하고 수질을 개선하기 위한 무동력 수류순환시스템을 개발하였다. 전체적인 이미지 및 명칭은 Fig. 1의 (a)에 나타내었다. 상부에는 1) 바람을 맞는 바람판(Wind blade)과 2) 전체 시스템을 부력에 의하여 띄우는 부력체(Float)가 있으며, 하부에는 3) 표층류를 하강시켜 물순환을 유도하는 패널시스템(Panel system)이 위치한다. 4) 중앙에는 중심축이 위치하여 전체 시스템의 이동을 방지하고, 풍향이 바뀔 때 따라 이를 중심으로 회전한다. 이 시스템은 호수 및 저수지에서 부유한 상태로, 바람에 의해 형성된 취송류의 흐름과 항상 수직하게 위치하여 수류하강 및 순환을 유도한다.

취송류는 풍향과 동일한 방향으로 유도되지 않고 우측이나 좌측으로 편향되게 나타나는데, 이는 지구의 자전에 의

Fig. 1. Principle of non-powered water circulation system: (a) feature of water circulation system and (b) biased flow of wind-driven current.

Table 1. Design specifications

Classification	Size	Material	Weight
Float	$\phi 500 \times H1000 \times 2$	SUS	100 kg
Wind blade	$W6000 \times H300 \times 1$	SUS	50 kg
Panel system	$W3000 \times H2500 \times 2$	SUS	100 kg
Center shaft	$\phi 50 \times L2500$	SUS	5 kg

해 발생하는 전향력에 의한 현상이다. 북반구의 경우 바람에 의해 발생한 취송류는 우측으로 편향되며, 국내에서는 평균 18.6° 우측 편향된 흐름으로 관찰된 바 있다.¹⁹⁾ 이를 응용하여 바람에 대응하는 바람판과 수류에 대응하는 패널 시스템이 각각의 흐름과 수직으로 대응하도록 약 15° - 20° 정도 어긋나게 제작함으로써(Fig. 1(b)), 취송류의 하강 유도 효과를 극대화하였다. 참고로, 본 논문에서 별도로 제시하지는 않았으나 수류순환시스템에서 바람판과 패널시스템의 적정한 이격 각도를 결정하기 위해서 0° 또는 15° 로 변화시키면서 선행적으로 유체역학분석을 실시하였다. Flow-3D 모델을 이용하였으며, 가로 100 m, 세로 100 m, 수심 3 m의 수체를 모의범위로 설정하고, 정중앙에 수류순환시스템을 위치시켰다. 일정한 풍향을 갖는 5 m/sec의 바람이 연속적으로 부는 조건에서 수체의 표면에 형성된 취송류가 수류순환시스템의 이격 각도에 따라 어떠한 거동을 보이는지 분석하였다. 모의 결과, 15° 의 이격각을 갖는 경우에는 하강류 발생범위가 수류순환장치로부터 전방부의 4.8 m까지 이른 반면, 0° 의 경우에는 3.2 m에 그쳐 15° 의 이격각을 가질 때의 수류순환 효과가 더 우수한 것으로 모의되었다.

시스템 전체는 부식을 방지하기 위하여 스테인레스 스틸(stainless steel) 재질로 제작하였으며, 전체 시스템의 제원은 Table 1과 같다. 바람판의 길이는 6 m, 높이는 0.3 m로 하였으며, 폭 3 m, 길이 2.5 m의 하강유도패널을 좌우 양쪽에 대칭되게 설치하였다. 하강유도패널의 중앙에는 회전축의 역할을 하는 중심축(center shaft)을 설치하였다.

2.2. 무동력 수류순환시스템 테스트베드 구축

수질개선 효과를 관찰하기 위하여 경기도 파주시에 위치한 공릉저수지에 수류순환시스템의 테스트베드(Test-bed)를 구축하였다. 표층(수표면으로부터 30 cm 이내 하부 지점) 및 심층(저층으로부터 0.5 - 1.0 m 상부 지점)에 실시간 수

Fig. 3. Monitoring and control sites in Gongneung reservoir.

질측정 센서를 장착한 모니터링시스템을 구축하였다. 모니터링은 2016년 10월부터 2017년 8월까지 약 11개월에 걸쳐 실시하였다. 해당 저수지는 만수 시 면적 0.4 km^2 , 평균 수심 2.2 m이며, 상류지역에 산지, 골프장, 경작지 및 주거지가 위치하고 있어 지속적으로 부영양화가 진행 중인 곳이다(Fig. 2).

수류순환시스템의 설치지점(monitoring site)과 대조지점(control site)의 위치는 Fig. 3과 같다. 설치지점은 유속이 느리고, 충분한 수심이 확보되어 수류순환시스템 하부보다 0.5 m 이상 깊은 곳을 선정하였고, 대조지점의 경우 설치지점에서 100 m 이상 떨어진 곳으로 선정하였다.

2.3. 무동력 수류순환시스템 모니터링

모니터링은 현장 측정과 실험실 분석으로 구분하여 실시하였다. 실시간 분석기기로는 기술과학경(株)에서 제작한 다항목 측정기를 사용하였다. 실시간 분석항목은 수온, DO, DO saturation, pH, 전기전도도(Conductivity), TDS (Total dissolved solid) 및 회전각(Compass) 등이다. 기상자료는 테스트베드가 구축되어 있는 공릉저수지 최인근의 파주기상대의 정보를 활용하였다. 세부 내용은 Table 2에 정리하였다.

Fig. 2. Test-bed of water circulation system: (a) installation and (b) scenery of test-bed.

Table 2. Monitoring items

Measurement methods	Items (Unit)	Model (Manufacturer)
Real-time monitoring	Water temperature (°C)	M-100 (Technology & Environment Corp.)
	DO (mg/L)	
	DO saturation (%)	
	pH	
	Conductivity (μS/cm)	
	TDS (mg/L)	
	Compass (°)	
Weather information	Battery (V)	Korea Meteorological Administration ²⁰⁾
	Air temperature (°C)	
	Rainfall (mm)	
	Sunshine duration (hr)	
	Wind velocity (m/sec)	
	Wind direction (°)

Fig. 4. Real-time monitoring results of surface and deep layers at test-bed.

실시간 모니터링 결과는 1시간 간격으로 수집하여 인터넷을 통해 온라인으로 확인하도록 함으로써 장소에 구애받지 않고 테스트베드의 운영현황을 파악할 수 있는 모니터링 체계를 구축하였다(Fig. 4).

3. 결과 및 고찰

3.1. 실시간 모니터링 결과 시계열 분석

수류순환시스템이 풍향 및 수류의 방향에 대응하여 적절하게 회전하는지를 검증하기 위하여 회전각(compass)을 분석하였다(Fig. 5). 모니터링 결과를 통해 약 0°부터 350°까지 지속적으로 변화하는 것을 확인하였으며, 일반적으로 일주기를 갖고 회전운동을 하는 것으로 관찰되었다.

장기적 효과의 확인을 위해서 2017년 3월 10일부터 2017년 5월 20일까지 측정된 수질항목(회전각, DO농도 및 포화도, 수온, pH, 전기전도도) 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 해당 시기에 회전각(compass)은 240 - 320° 사이에서 규칙적인 일주기 회전을 보여주었다. 다만 5월 이후 심각한 가뭄으로 인해, 저수지의 수위가 크게 낮아지고 시스템의 하부가 저수지 바닥에 고착됨으로써 회전이 실질적으로 정지하는 현상이 발생하였다. DO농도는 표층에서 약 4 - 18 mg/L, 심층에서 0 - 15 mg/L의 값을 나타내었으며, DO포화도는 표층에서 약 40 - 200%, 심층에서 약 0 - 150%의 값을 나타내었다. 수온의 경우 심층 대비 표층이 높고, 약 6°C부터 25°C까지 점점 상승하는 결과가 나타났으며, 전 구간에서 하루를 기준으로 상승 및 하강이 반복되는 일주기를 보여주었다. pH 또한 심층 대비 표층이 높으며, 심층은 약 7.0 - 9.0, 표층은 약 7.5 - 9.0의 값을 나타내었다. 전기전도도는 표층과 심층이 비슷한 수치를 나타내었고, 일부구간에서 심층이 표층과 역전되는 현상을 보여주었다.

Fig. 6에 도시하고 있는 모니터링 시기 중에서 두 특징적인 기간에 대해 집중적인 분석을 실시하였다. 첫 번째 분석에서는 가뭄으로 인한 회전운동 정지 이전과 이후를 구분하여 수질인자별 거동을 파악하였다. DO농도(또는 DO포화도)의 경우, 시스템이 구동하는 기간에는 심층의 농도가 최소 5 mg/L 이상으로 유지되었으나, 정지된 가뭄기간에는 DO가 0 mg/L, DO포화도가 0%에 근접하는 결과가 관찰되었다. 이는 수류순환시스템의 구동을 통해 심층의 DO를 일정수준 이상으로 유지시켜 빈산소화를 방지할 수 있음을 시사하는 결과로 판단된다. pH 그래프의 경우, 시스템의 구동정지 이전에는 심층과 표층의 농도 차이가 약 0.44였으며

Fig. 5. Time-series variation of compass according to rotation of water circulation system at test-bed.

Fig. 6. Time-series variation of water quality items at test-bed: (a) compass, (b) DO, (c) DO saturation, (d) water temperature, (e) pH and (f) conductivity.

Fig. 7. Weather information at test-bed: (a) rainfall, air temperature and sunshine duration and (b) wind velocity and wind direction.

격차가 벌어지더라도 순환에 의해 다시 좁혀지는 현상을 보였으나, 구동 정지 이후에는 그 차이가 평균 0.91로 커졌으며 특히 시스템 정지 초반에 최대 1.88의 차이를 보여 수류순환 효과가 급감했음을 확인할 수 있었다.

두 번째 분석에서는 ①과 ②로 표시된 점선 네모구간을 집중적으로 검토하였다. 해당 구간은 표층과 심층의 DO가 크게 벌어지고, 전기전도도의 역전현상이 나타남과 동시에, pH에 있어서도 차이가 두드러지는 구간에 해당한다. 종합적인 검토를 위해 기상 데이터를 추가로 분석하였으며(Fig. 7), 해당 데이터는 기상청에서 운영하는 기상정보개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 참고하였다.²⁰⁾ ① 구간은 강우 발생 직후이며, 기온이 추세선보다 높고 큰 폭으로 상승하였으며, 일조량 또한 증가하였다. 이로 인해 표층 조류의 활성이 커져 DO의 농도 및 포화도가 크게 증가하였으며, 조류의 광합성으로 인해 수층의 CO₂가 감소하여 pH 또한 상승하는 결과를 가져온 것으로 판단된다. 전기전도도의 경우 강우유출수의 유입에 의한 부분적 희석 효과로 표층에서 하강한 것으로 사료된다. ② 구간은 가뭄에 의한 저수위로 인해 시스템의 회전이 정지하고 표층수의 하강 유도가 제 기능을 상실함에 따라 심층의 급격한 빈산소화가 나타난 시기이다. 해당 시기는 고온 및 고일사량 기간에 해당하는 것으로 나타났고, 조류의 영향으로 인해 표층의 pH는 약 9.0까지 상승하였으며, 심층은 약 7.0으로 분석되었다. 심층의 전기전도도가 표층 대비 높아지는 결과를 보였는데 이는 저층에서 DO의 심각한 감소로 인하여 영양염류 및 중금속의 용출이 발생하는 데에 따른 것으로 판단된다.

추가적으로, 본 테스트베드가 구축되어 있는 지점의 수심이 약 3 m에 해당하며, 이처럼 얇은 수심의 저수지에서도

온도 및 여러 수질인자의 농도성층이 뚜렷하게 형성되는 것이 확인되었다. 이는 얇은 수심을 갖는 저수지에서도 농도 및 온도 성층이 형성됨을 주장한 기존 연구를 뒷받침하는 결과이며,⁶⁾ 온도성층보다는 DO나 pH 등의 농도성층의 경향이 더 강한 것으로 나타났다.

3.2. 가뭄에 의한 저수위 시기의 모니터링 결과 상세분석

Fig. 6에서 살펴본 바와 같이, 5월 이후 저수심으로 인하여 시스템의 구동이 중단되고 측정된 수질항목에서 표층과 심층의 차이가 급격히 벌어지는 결과가 나타났다. 따라서 저수심 시기의 DO와 전기전도도를 좀 더 면밀히 살펴보기 위해 Fig. 8에 4월 30일부터 5월 20일까지 21일간을 일별로 세분화한 그래프를 기상정보와 비교하여 나타내었다.

해당 구간에서 표층의 DO는 뚜렷한 일주기 변동이 관찰되며, 심층에서도 약한 일주기 변동이 나타났다. 심층의 일주기 변동은 표층과 일정한 시간 지연을 갖고 있는 것으로 나타났다. 해당 그래프에서 표층과 심층의 일주기 변동이 모두 뚜렷한 시기를 중심으로 피크가 나타나는 시간대의 차이를 분석한 결과 10~20시간 전후의 지연이 발생하는 것으로 분석되었다. 5월 9일~10일 및 5월 13일, 강우 직후에 심층 및 표층의 DO농도의 차이가 확연히 감소함과 동시에 표층의 DO포화도가 개선되는 현상이 관찰되었는데, 이는 수류순환 이외에도 강우에 의한 희석효과 및 일조량 감소에 따른 조류 활성 저하 등에 의한 효과가 복합적으로 작용할 수 있음을 시사한다. 또한 5월 6일경 심층의 전기전도도가 급격히 하락하였다. 이 시기에 일평균기온이 19.2°C에서 12.7°C로 약 6.5°C만큼 크게 하락하였는데 심한 기온의 저하가 표층의 조류 활성에 영향을 미침과 동시에, 표층

Fig. 8. Detailed time-series variation at test-bed during drought season: (a) weather information, (b) DO and (c) conductivity.

의 수온이 급감하여 심층의 수온과 미소하게 역전됨으로써 표층과 심층의 밀도차에 따른 수류순환을 유발한 것이 원인인 것으로 사료된다.

본 테스트베드에서는 가뭄과 농업용수 확보가 중첩되는 5월의 저수위 기간을 중심으로, 수심이 시스템의 전고보다 알려져 회전이 중단됨으로써 수류순환 효과가 감소되거나 사라지는 결과가 관찰되었다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 추후 현장상황에 따른 시스템의 운영방식을 구체화하여 적용장소에 맞는 전고를 갖도록 제작하여야 할 것으로 생각된다. 예를 들어 평수기에 초점을 맞추는 경우 갈수기 운영이 정지될 수밖에 없지만 표층의 순환수가 저질층에 가까운 심층까지 도달하여 효과적인 수질개선이 가능할 것이다. 반면, 갈수기의 운영에 중점을 두어 패럴시스템의 전고를 작게 제작할 경우 수심이 낮아지더라도 시스템의 운영

이 가능하나 순환수의 도달 깊이가 상대적으로 짧아져 효율이 저하될 개연성이 있다.

3.3. 대조지점과의 비교분석

수류순환시스템 설치지점(심층)과 대조지점(수심 2.5 m)의 수질을 비교·분석하였다(Fig. 9). 분석된 수질항목은 DO, DO포화도, pH 및 전기전도도를 포함한다. 해당 그래프를 통해서, 대조지점의 경우 DO는 10.4 - 15.4 mg/L, DO포화도는 84.3 - 124.7%로 분석되었으며, 일주기 효과에 따른 DO의 큰 변동폭과 DO 과포화 현상이 나타났다. 본 시스템 설치지점의 경우 DO농도 11.1 - 12.9 mg/L로 변동폭이 완화된 동시에 DO포화도 또한 87.4 - 102.6%로 분석되어 약 17% 감소 및 개선되는 효과가 관찰되었다. pH는 대조지점에서 8.0 - 9.0, 설치지점에서는 8.1 - 8.5로 측정되어 설치

Fig. 9. Water quality comparison between monitoring and control sites: (a) DO, (b) DO saturation, (c) pH and (d) conductivity.

Table 3. Descriptive statistics of water quality items comparing between monitoring and control sites

	Items	Average	5%	95%	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾
Monitoring (n=96)	Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	362.19	361.0	364.0	1.17	0.003
	DO (mg/L)	12.35	11.6	12.9	0.38	0.031
	DO saturation (%)	97.41	91.3	101.6	3.17	0.033
	pH	8.32	8.2	8.4	0.08	0.009
Control (n=384)	Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	361.51	357.0	366.0	2.50	0.007
	DO (mg/L)	12.48	10.9	14.6	1.07	0.086
	DO saturation (%)	101.20	88.5	118.9	8.74	0.086
	pH	8.59	8.4	8.9	0.16	0.019

¹⁾ standard deviation

²⁾ coefficient of variation

지점에서 pH의 상승이 부분적으로 완화되는 것으로 나타났다. 이를 통해 수류순환시스템에 의해 조류의 활성이 억제되고 있음이 시사되었다.

해당 내용을 각 수질항목별 평균값, 백분위수 5%, 백분위수 95%, 표준편차(standard deviation, S.D.) 및 변동계수(coefficient of variation, C.V.)로 비교·분석하였다(Table 3). 전체 데이터의 표준편차를 산술평균으로 나눔으로써 변동의 정도를 나타내는 지표 중의 하나인 변동계수를 기준으로 모니터링지점과 대조지점을 비교하였을 때, 전기전도도는 모니터링지점에서 0.003, 대조지점에서 0.007로 분석되어 모니터링지점에서의 변동폭이 줄어들을 알 수 있었으며, DO는 0.031 및 0.086, DO포화도는 0.033 및 0.086으로 모

니터링지점에서 현저하게 변동폭이 감소한 것으로 나타났다. pH 또한 0.009 및 0.019로 분석되어, 종합적으로 대조지점의 수질변동 폭이 모든 항목에서 큰 반면 모니터링지점에서는 완화되고 있음이 확인되었다. 이는 표층과 심층의 격차가 표층수의 하강을 유도하는 수류순환을 통해 희석됨과 동시에, 조류의 활성도가 저하됨에 따라 DO와 pH가 24시간 주기로 증감을 반복하는 일주기 현상도 완화되었음을 시사한다.

4. 결론

국내 저수지의 경우 정체수역의 증가와 다양한 수질오염 물질의 유입 등으로 인해 부영양화가 가속화하고 조류가 지속적으로 발생하는 문제점이 야기되고 있다. 이를 방지하기 위한 기존의 인공순환 기술은 추가적인 전력공급이 필요하며 저수심의 저수지에 대해서는 역효과가 발생할 가능성조차 지적되고 있다. 본 연구에서는 표층수를 심층으로 하강 유도하여 수류를 순환시키는 원리를 적용한 무동력 수류순환시스템을 개발하여 테스트베드를 구축하고 11개월 간 설치지점과 대조지점에서 각각 표층과 심층을 모니터링하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.

- 1) 장기간에 걸친 테스트베드 운영 결과, 본 무동력 수류순환시스템은 풍향의 변화에 따라 회전함으로써 표층수의 하강 유도에 의한 지속적인 수류순환 효과를 갖는 것으로 나타났다.
- 2) 수류순환시스템이 정상적으로 구동되는 동안 심층의

DO는 5 mg/L 이상을 유지하였다. 저수위로 인한 시스템의 정지 기간에는 급속하게 DO는 0 mg/L, DO포화도는 0%에 근접하였다. 이를 통해 본 시스템이 저층의 DO를 일정수준 이상으로 유지하여 빈산소화를 방지하는 효과가 있음을 확인하였다.

3) 설치지점과 대조지점의 실시간 모니터링 결과를 비교했을 때, DO농도는 대조지점에서 10.4 - 15.4 mg/L(변동계수 0.086), 설치지점에서 11.1 - 12.9 mg/L(변동계수: 0.031)로 나타났고, DO포화도는 대조지점에서 84.3 - 124.7%(변동계수: 0.086), 설치지점에서 87.4 - 102.6%(변동계수: 0.033)로 관찰되었다. 이는 수류순환시스템이 DO 과포화를 약 17.7% 감소시켰으며, 변동을 완화하고 있음이 확인되었다.

4) 실시간 모니터링 데이터를 장기 분석한 결과, 수류순환시스템은 수류순환 유발과 표층부의 조류 발생 저감을 통하여, ① 심층의 DO를 5 mg/L 이상으로 유지시켜 빈산소화를 방지하고, ② 표층의 DO포화도가 과도하게 증가하는 비율을 저감하며, 동시에 ③ pH의 과도한 상승을 감소시키는 것으로 관찰되었다.

5) 해당 시스템은 국내의 저수심 저수지에서 조류 발생에 의한 영향을 감소시키고, 수질을 개선하는데 유효한 것으로 판단된다. 다만 현장적용 시에는 연중 수심의 변화를 고려하여, 평수기의 평균수심에 초점을 맞추어 효율성을 높일 것인지 또는 갈수기의 최소수심에도 운전이 가능하도록 할 것인지에 따라 적절한 시스템의 전고 변경이 필요할 것으로 예상된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부의 “그린에너지를 활용한 정체수역 수질개선 융복합 기술”(12기술혁신C02)을 통해 지원받은 과제임.

KSEE

References

- Kim, H. S. and Hwang, S. J., “Analysis of eutrophication based on chlorophyll-a, depth and limnological characteristics in Korean reservoirs,” *Korean J. Limnol.*, **37**(2), 213~226 (2004).
- Lee, T. H., “An analysis of improvement of water quality by a wind-driven flow downward guide apparatus in reservoirs,” Master’s thesis, Hanbat National University, Korea, pp. 1~39 (2011).
- Bang, K. W., Choi, C. S., Lee, J. H., Choi, H. S. and Hong, J. P., “Analysis of water quality improvement effect in reservoir by the downward guide apparatus of wind-driven flow,” *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **8**(2), 43~53(2008).
- Choi, S. H., Lee, J. K. and Ye, H. H., “Physical characteristics of agricultural reservoir in Korea,” *J. Korea Water Resour. Assoc.*, pp. 544~544(2015).
- Søndergaard, M., Jensen, J. P. and Jeppesen, E., “Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes,” *Hydrobiologia*, **506**, 135~145(2003).
- Park, H. S., Choi, S. W., Chung, S. W., Ji, H. S., Oh, J. K. and Jun, H. B., “Evaluation of internal phosphorus loading through the dynamic monitoring of dissolved oxygen in a shallow reservoir,” *J. Environ. Impact Assess.*, **26**(6), 553~562(2017).
- Choi, E. M., “Eutrophication analysis based on watershed characteristics in Korean reservoirs,” Master’s thesis, Kangwon University, Kangwon, pp. 1~58(2016).
- Lee, K. S., Yoon, K. S., Kim, H. J. and Kim, H. I., “A program of water quality management for agricultural reservoirs by trophic state,” *Korean J. Environ. Agric.*, **22**(2), 166~171 (2003).
- Joo, J. C., Choi, S. H., Heo, N. J., Liu, Z. H., Jeon, J. Y. and Hur, J. W., “Analysis of the benthic nutrient fluxes from sediments in agricultural reservoirs used as fishing spots,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(11), 613~625(2017).
- Kim, I. H., “Agricultural lake water quality management system,” *Rural Resour.*, **52**(2), 2~9(2010).
- Song, M. Y., “Current status & policy issues on agricultural water quality management in Gyeonggi Province,” Basic research 2012-09, Gyeonggi Research Institute, p. 1~121(2012).
- Park, H. K., “Survey method relating freshwater phytoplankton for the management of water resources,” *J. Korean Soc. Environ. Engineers*, **29**(6), 593~609(2007).
- Jung J. O., and Kim, Y. W., “Analysis of Sediment Nutrients as Potential Sources of the Lake Water Quality,” *J. Environ. and Health Sci.*, **35**(5), 376~385(2009).
- Lee, S. H., “The Eutrophication of Lakes and Reservoirs and their Management Plans,” *Korean Nat. Committee on Irrigat. and Drainage J.*, **13**(1), 127~139(2006).
- Lee, C. S., Ahn, C. Y., La, H. J., Lee, S. H. and Oh, H. M., “Technical and Strategic Approach for the Control of Cyanobacterial Bloom in Fresh Waters,” *Korean J. Environ. Biol.*, **31**(4), 233~242(2013).
- Kim, B. C., Kim, J. K. and Jun, M. S., System improvement for efficient reservoir management for algae control, Water Management Policy Debate, Research report, pp. 462~522 (2003).
- Park, H. Y., Lee, D. K. and Kim, H. I., “Lake water circulation equipment using convectional phenomenon,” *J. Korean Soc. Fluid Machinery* 2006, pp. 520~525(2006).
- Lee, Y. S., Han, K. H., Kim, Y. K., An, H. C. and Shin, S. W., “The study of operating conditions by establishing density currents generator for improving of water quality on lake water - with focus on DO and water temperature -,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(4), 286~294(2014).
- Lee, M. J. and Kang, Y. Q., “Lagrangian observation and modelling of sea surface wind-induced drift (skin drift),” *J. Korean Soc. Marine Environ. Eng.*, **3**(2), 11~17(2000).
- Korea Meteorological Administration (KMA). Weather data release portal. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>, August(2018).