

ORIGINAL ARTICLE

인공호소인 영산호의 용존산소 분포와 수층 성층구조의 연관성 분석

송은숙 · 조기안¹⁾ · 신용식^{2)*}

해양수산정책기술연구소, ¹⁾초당대학교 의약관리학과, ²⁾목포해양대학교 환경·생명공학과

Exploring the Dynamics of Dissolved Oxygen and Vertical Density Structure of Water Column in the Youngsan Lake

Eun-Sook Song, Ki-An Cho¹⁾, Yong-Sik Shin^{2)*}

Research Institute for Coastal Environment and Fishery/Policy, Kwangju 500-844, Korea

¹⁾Department of Medicine Management, Chodang University, Muan, Chonnam 534-701, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering and Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chonnam 530-729, Korea

Abstract

The Youngsan Lake was constructed to supply agricultural water to the extensive rice fields in the basin of the lake in 1981. Hypoxia has often developed in the bottom water of the lake during the warm season although the water depth is relatively shallow (< 16 m). We investigated the spatial and temporal variations of dissolved oxygen (DO) and physical properties such as water temperature, salinity and turbidity to elucidate the effects of change in physical properties on DO dynamics in the lake. Vertical profiles of DO, temperature, salinity, and water density were also explored to verify the development of stratification in relation to DO variation in the water column. Hypoxia ($DO < 2 \text{ mg L}^{-1}$) was not observed in the upper regions whereas hypoxia was detected in the lower regions during the warm season. Thermocline generally developed in the lower regions during the warm season unlike the previous studies in which no thermocline was observed. However, water column was well mixed when freshwater water was discharged from the reservoir through the sluice gate of the dike. DO concentrations also decreased when halocline or pycnocline developed during the dry season suggesting that the vertical stratification of water column affects DO dynamics although the water depth is shallow in the Youngsan lake.

Key words : Dissolved oxygen (DO), Hypoxia, Temperature, Salinity, Stratification, Youngsan Lake

1. 서론

용존산소(dissolved oxygen, DO)는 호기성 호흡에 의존하는 수중 생물들에게는 생태적 그리고 진화적으로 매우 중요한 환경인자이다. 산소는 수중 생물들의 대사

활동의 공급원으로 산소 부족시에는 성장률, 공간적 분포, 거동, 생식, 생존 등에 부정적 영향을 미친다(Diaz와 Rosenberg, 1995; Breitbart 등, 2003; Breitbart 등, 2009; Conley 등, 2009). 일반적으로 용존산소의 농도가 2 mg L^{-1} 일 경우 빈산소(hypoxia)라고 정의하는데

Received 24 October, 2014; Revised 5 January, 2015;

Accepted 14 January, 2015

*Corresponding author: Yong-Sik Shin, Department of Environmental Engineering & Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chonnam 530-729, Korea
Phone: +82-61-240-7312
E-mail: yongsik@mmu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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.

(Vaquer-Sunyer 과 Duarte, 2008), 이러한 빈산소층과 같은 저산소층 형성은 어류나 무척추 생물들의 대량 폐사의 원인이 되고, 서식지를 파괴하고, 질병에 쉽게 감염할 수 있는 조건이 되기도 한다(Burkholder 등, 1995; Lenihan 과 Peterson, 1998; Paerl 등, 1998; Dauer 등, 2000; Jewett 등, 2005; Roberts 등, 2009). 이러한 이유로 최근 일부 전문가들이나 수질관리자들이 용존산소 농도를 여러 다양한 서식지의 수질을 나타내는 기준(criteria)으로 삼고 있다(Batiuk 등, 2009).

하계의 수온 증가, 높은 광량 및 강수가 동반하는 육상기원 영양염의 유입에 따라 식물플랑크톤의 일차생산이 증진된다. 증가된 식물플랑크톤은 동물플랑크톤 및 상위 영양단계에 포식되지 않고 저층에 침전되면 중속 영양 박테리아에 의한 유기물 분해를 통해 저층 용존산소를 고갈시키게 된다(Blumberg 와 Di Toro, 1990; Sundbäck 등, 1990). 유기물의 미생물 분해에 의해 용존산소가 소비되기도 하지만 용존산소의 농도는 산소의 용해도에 영향을 미치는 수온에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Weiss, 1970). 또한 바람, 조석, 열 교환 등의 물리적 작용의 영향으로 수온이나 염분이 변동하면서 형성되는 수층의 밀도 성층-혼합은 수층 용존산소의 수직 분포에 미치는 영향이 크다(Whitmore 등, 1991; Hull 등, 2008; Wang 과 Justić, 2009). 수심이 깊은 담수 호수에서는 특히 표층, 저층의 수온차이에 의한 성층이 빈산소층의 형성에 결정적으로 기여하는 것으로 알려져 있다(Ford 등, 2002; Park 등, 2006; Rao 등, 2008).

전남에 위치하고 있는 영산호는 1981년에 하구둑이 영산강 하류에 건설됨으로써 조성된 인공 호수로 2011년 4대강 살리기 사업 이후에는 승촌보와 죽산보가 상류 수역에 건설되었다. 수심이 깊은 일반적인 호수와 달리 영산호는 수심이 깊지 않아 수층 성층이 확실하게 형성되지 않았음에도 불구하고 봄과 여름철에 저층에서 빈산소층이 발생하는 것으로 보고되고 있다(Choi 등, 2008; Park 등, 2008). 수온이 상승하는 계절에도 수층 성층이 형성되지 않는 이유는 수심이 얇아 물리적 혼합이 상대적으로 용이하고, 하구둑 수문을 통해 저온의 저층수가 하구둑 밖으로 방류되기 때문(Park 등, 2008)인 것으로 알려져 있다. 하지만 최근 조사된 결과에서는 하구인 인근수역의 저층에서 고농도의 염분 수층이 관찰된 바 있

다(Oh, 2013). 영산호는 또한 수심이 얇아 수층 구조가 바람과 같은 기상조건의 영향도 받을 것으로 예상된다. 하지만 기존 연구에서는 밀도 성층 형성의 또 다른 환경인자인 염분이나 바람과 같은 기상조건에 대한 조사가 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 영산호의 용존산소와 염분을 포함한 물리적 환경인자들의 공간적 분포 및 수직적 분포를 월별로 조사, 분석함으로써 수온과 염분의 변화에 따른 밀도 성층 형성의 유무를 확인하고, 물리적 환경인자나 기상 및 수문학적 조건이 용존산소 분포에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 최근 4대강 살리기 사업을 포함하여 여러 대형 개발 사업들이 영산강 유역에서 진행되었지만, 사업 시행 전의 용존산소 분포나 환경조건에 대한 자료 제시는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구와 같은 4대강 살리기 사업 시행 직전의 조사 결과는 사업 전-후의 수질 동태 비교 자료로 활용될 수 있으며, 나아가 부영양화로 인해 수질이 악화된(Yi 등, 2006) 영산호의 용존산소 거동을 이해하는데 기여할 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사 정점

조사 지역인 영산호는 영산강 하류의 하구연을 기점으로 상류인 몽탄대교까지 약 23.5 km 구간을 지칭하며, 34.6 km²의 표면적과 하구둑 만수위 기준으로 저수량이 2.54×10⁸ m³인 인공 담수호이다(ADC, 1984). 1981년 하구인 준공 후 폐쇄적인 환경이 형성되었고, 2011년에 마무리된 4대강 살리기 사업 이후, 현재는 영산강 상류 수역에 죽산보, 승촌보 등이 위치하고 있다. 조사 시기는 4대강 살리기 사업 시행 이전인 2008년 9월부터 2009년 8월까지 월별(2008년 12월 제외)로 실시하였고 조사정점은 영산호 분류 채널을 중심으로 5개 정점을 선정하였다(Fig. 1). 각 정점별로 용존산소와 물리적 환경인자들의 수직적인 분포(vertical profile)를 파악하고자 하였다.

2.2. 용존산소와 물리적 환경인자 조사

용존산소(DO), 수온(temperature), 염분(salinity), 탁도(turbidity)는 YSI-Model 6600 v2 장비를 이용하여 수직적으로 측정하였다. 용존산소, 수온, 염분, 탁도의 측

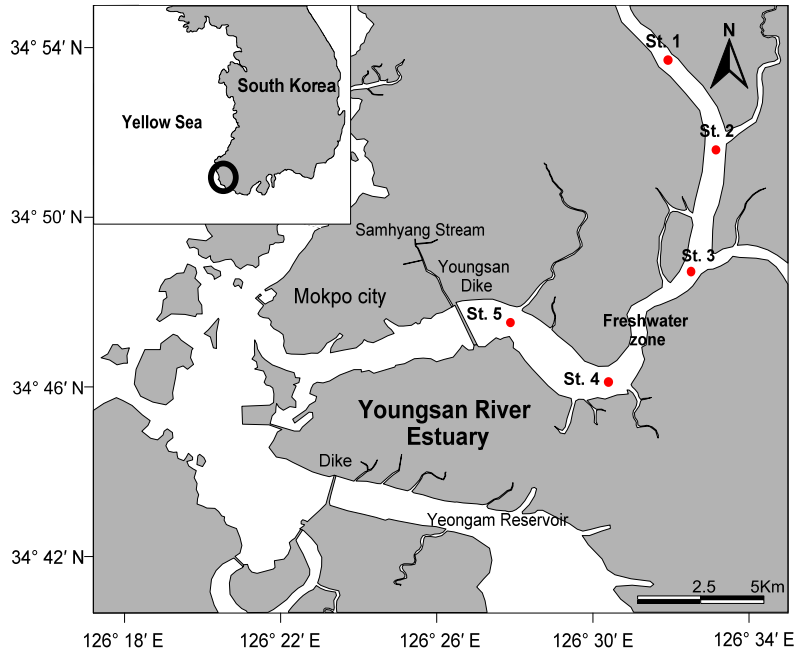


Fig. 1. Sampling stations along the channel of the Youngsan Lake.

정한계치는 각각 0.01 mg L^{-1} , 0.01 psu , $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.1 NTU 이고 정확도는 수온이 $\pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 나머지는 영산호의 현장수치범위에서 2% 이내이다. 장비는 수시로 보정(calibration)을 실시하였고 특히 용존산소는 현장의 대기의 산소 농도를 통해 보정하였고, 현장수에 충분히 안정화 시킨 후 측정하였다. 염분은 Practical Salinity Scale로 제시되었고, 수온과 염분 자료를 이용하여 수층 밀도(kg m^{-3} , ρ)를 계산하였다. 영산호는 수심이 낮아($< 16 \text{ m}$), 수심별로 압력이 일정하다는 가정하에 EOS-80 equation을 이용하여 밀도를 산출하였다.

영산호의 강우 및 풍속 분석을 위해 목포 지역의 기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 제공된 자료를 이용하였다. 담수 방류가 영산호 수층의 혼합에 영향을 줄 수 있으므로 조사 시기의 담수 방류량을 분석하기 위해 농어촌공사 영산강 하구둑 관리소 배수갑문 조작현황 자료를 이용하였다.

성층의 영향을 파악하기 위해 표층 수온에서 저층 수온을 차감한 표층-저층 수온(ΔT), 염분(ΔS), 밀도차이($\Delta \rho$)를 사-공간적으로 도시하여 분석하였다. 또한 성층의 정도를 수심별로 파악하기 위해 1 m 간격에서 변화되

는 밀도의 차이(상부층-하부층 밀도)를 파악하여 용존산소의 수직분포와 비교, 분석하였다. 염분, 수온, 밀도의 수직분포와 용존산소 분포를 도시하여 연관성도 분석하였다.

2.3. 통계 분석

물리적 환경 변화가 용존산소에 미치는 영향을 알아보기 위해 수온, 염분, 밀도, 탁도, 풍속, 용존산소 농도에 대한 linear simple regression 분석을 이용하여 물리적 환경인자들과 용존산소의 연관성을 검토하였고 이를 위해 PASW Statistics 18 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 영산호 기상 및 담수 방류

월별 강우량은 건기인 가을과 겨울철에는 낮았다가 봄철부터 강우 빈도수와 양이 증가했으며 우기인 여름철 특히 2009년 7월에 강우량이 466 mm로 가장 높았고 강우도 빈번하게 나타나 전형적인 아시아 몬순기후의 특성을 보였다(Fig. 2A). 이러한 특성은 대청호와 같은 국내

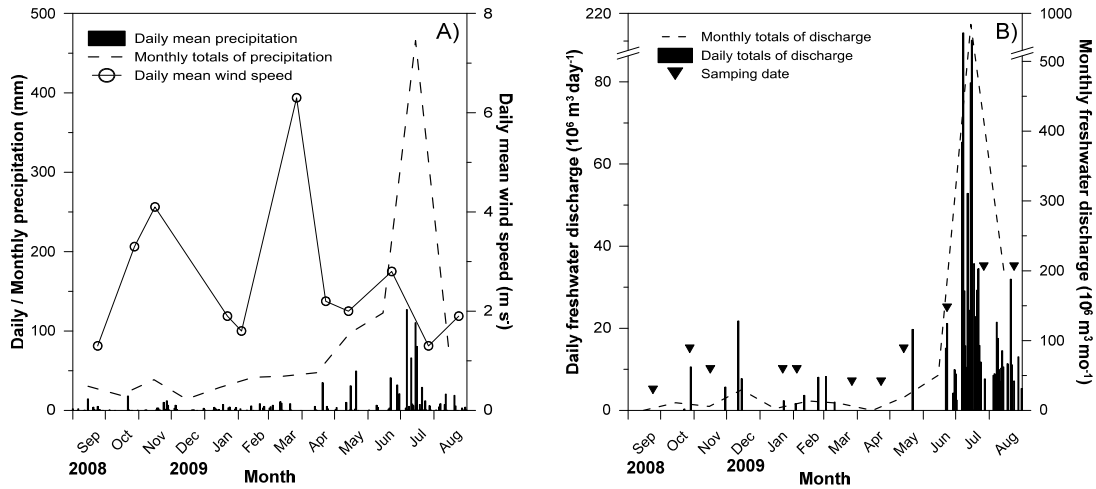


Fig. 2. Hydrological properties including daily and monthly totals of precipitation, daily means of wind speed recorded in sampling date (A), daily and monthly totals of freshwater discharge through the sluice gates of embankment (B).

의 다른 호소에서도 나타난다(An 등, 2001). 일 평균 풍속은 3월에 최대치(6.3 m s^{-1})를 보였고, 두 번째 최대치(peak)는 11월에 4.1 m s^{-1} 로 나타났고 6월에도 풍속이 2.8 m s^{-1} 로 다소 증가하였다. 풍속의 증가는 안정화된 수층을 혼합해주는 역할을 한다(Ahrnsbrak 등, 1998). 실제로도 3월에는 수온이나 염분이 일정 깊이까지 낮은 수직적 변화($< 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 0.5 psu)를 보여 풍속의 증가가 수층 혼합에 영향을 미쳤을 가능성을 보여준다. 월별 방류량은 6월부터 증가하여 강우량이 많았던 7월에 가장 높았고, 방류 빈도수 또한 증가하였다(Fig. 2B). 영산호에서 하구언을 통한 담수 방류가 수층의 혼합에 기여한다고 알려져 있다(Park 등, 2008). 담수 방류가 미치는 영향을 검토하기 위해 현장조사를 실시한 일자를 그래프(Fig. 2B)에 표시하여 분석하였다. 현장조사일 이전 일주일 이내에 실제로 방류가 된 일자를 살펴보면, 현장조사가 이루어진 2월 5일의 이틀 전인 2월 3일에 $1.68 \times 10^6 \text{ ton}$ 의 담수가 방류되었고, 6월 22일과 23일에 15.16×10^6 , $21.14 \times 10^6 \text{ ton}$ 의 담수 방류가 이루어졌고, 현장조사는 23일에 실시한 것으로 나타났다. 7월 24일에 $11.82 \times 10^6 \text{ ton}$ 의 담수가 방류 되었고, 3일후인 27일에 현장조사가 이루어졌으며, 8월에는 22일과 24일(현장조사일)에 각각 $11.11 \times 10^6 \text{ ton}$, $7.15 \times 10^6 \text{ ton}$ 의 담수가 방류되었다.

3.2. 용존산소의 공간·시간적 변동

수온은 수층에서 산소의 용해도에 영향을 미치고 수온이 높을수록 산소의 용해도가 낮아지는 것으로 알려져 있다(Weiss, 1970). 본 연구결과에서도 표층의 용존산소는 수온이 낮은 겨울철에 높았고(특히 정점 3) 봄철로 가면서 감소하였다(Fig. 3A). 여름철 특히 6월에는 상류 정점에서 낮은 농도를 보였고, 8월에는 전체적으로 낮은 용존산소 분포를 나타냈다. 또한 상관성 분석에서 표층의 수온과 용존산소 농도가 유의한 음의 관계를 보이는 것으로 나타났다(Table 1). 저층에서는 표층에 비해 상대적으로 낮은 용존산소 농도를 보였다(Fig. 3B). 2008년 9월에는 중, 하류 정점에서 그리고 11월에는 중류 정점에서 매우 낮은 농도를 보였고 6월과 8월에도 중류 정점에서 낮은 농도를 보였다. 수온과의 관계에서도 표층과 유사하게 유의한 음의 상관성을 보였다(Table 1). 수온 성층의 지시인자인 표층과 저층의 수온차는 가을과 봄, 여름철에 높았고 겨울철에는 낮은 분포를 보였다(Fig. 3C). 가을철 특히 9월에 중류 정점에서 성층이 형성되면서 저층의 용존산소도 감소하였고, 겨울철에는 성층이 약화되거나 수온 역전이 일어나면서 용존산소도 증가하는 경향을 보였다. 봄철로 들어서면서 다시 성층이 형성되기 시작하였고 동시에 용존산소도 감소하는 것으로 나타났다. 표층과 저층의 수온차와 용존산소의 상관

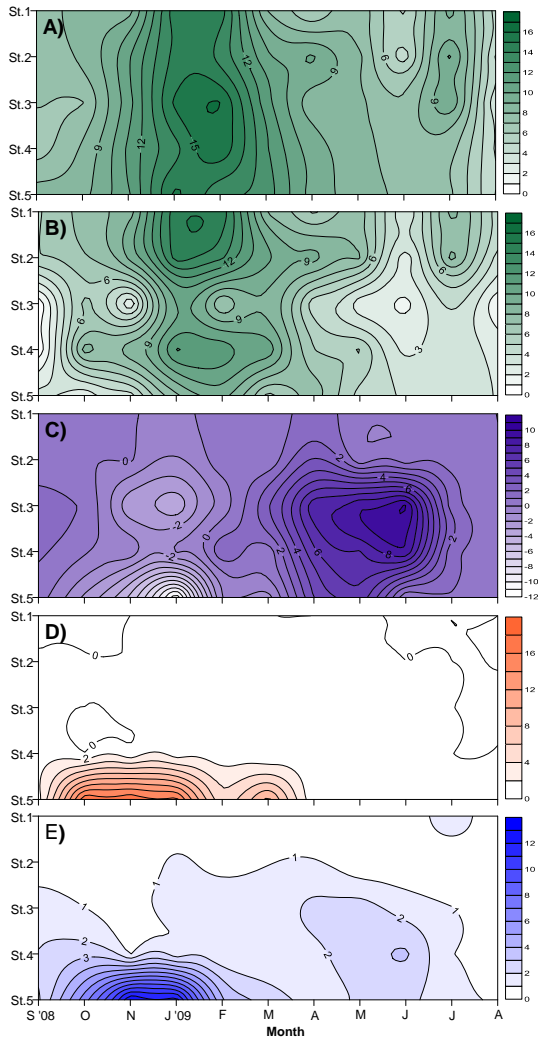


Fig. 3. Temporal and spatial distributions of DO concentrations at the depth 0.5m from surface (A) and bottom (B) respectively and the difference of temperature (C), salinity (D) and water density (E) between the surface and bottom water.

분석에서는 일부 정점에서 유의한 음의 관계(Table 1)를 보임으로써 계절에 따른 수온약층 형성이 용존산소의 감소에 기여할 수 있음을 보여주고 있다. 이러한 수온약층의 진화가 용존산소의 계절적 분포에 미치는 영향은 수심이 깊은 다른 호수에서도 보고된 바 있다(Sun 등, 2003; Edwards 등, 2005).

일반적으로 해수에서는 염분이 높을수록 산소의 용해

도가 낮아지는 것으로 알려져 있지만(Weiss, 1970), 본 연구에서는 염분이 높아질수록 용존산소의 농도도 증가하는 것으로 나타났다(Table 1). 이러한 현상은 특히 상부 정점들과 표층에서 목격되었는데 이들 정점과 표층의 최대 염분은 2.0 psu로 상대적으로 낮은 수치를 보여 계절에 따른 염분의 변화가 크지 않았음을 알 수 있다. 또한 염분과 표-저층 염분차의 변화는 계절에 따른 수온 변화와 밀접한 음의 관계($r < -0.75$, $P < 0.05$)를 보임으로써 염분과 수온이 서로 자동 연관성(autocorrelation)을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 영산호의 상류수역이나 표층에서는 염분보다는 수온의 계절적 변동이 산소 용해도에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 하지만 영산호의 하구인 인근 수역(정점 5) 저층에서는 염분이 최대 18.5 psu까지 증가하는 것으로 관측되었다. 이러한 고염분의 영향으로 정점 5의 인근 수역에서 표층, 저층의 높은 염분차가 나타나면서 염분 성층이 형성되었다(Fig. 3D). 그리고 이들 성층 형성과 저층의 용존산소 감소가 가을과 봄철(3월)에 서로 유사한 경향을 보였다. 또한 겨울철(1월)에 발생한 강력한 염분 성층이 같은 시기에 수온역전 형성이 가능하게 했을 것으로 사료된다. 수온과 염분 성층이 모두 반영된 밀도 성층 분포는 비록 유의한 음의 상관성을 보여주지 않았지만(Table 1), 11월(중류)과 겨울철을 제외하고 영산호 중, 하류의 저층 용존산소 감소 형태와 유사하게 나타났다(Fig. 3E). 용존산소의 계절적 분포는 풍속과 유의하지는 않았지만 일부 정점에서는 양의 상관성을 보였고, 탁도와는 정점 2에서 유의한 음의 관계를 나타냈다(Table 1). 이는 탁도를 결정하는 부유물질들 특히 유기물들에 대한 미생물적 분해(Mallin 등, 2004)가 용존산소의 시간적 분포에 영향을 줄 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

3.3. 수층 구조와 용존산소 분포의 연관성

Fig. 4는 중-하류 수역(정점 3-5)에서 수심별 성층의 구조(1 m 간격) 즉 밀도의 분포와 용존산소 분포에 대한 결과이다. 정점 3의 저층에서는 2008년 가을철에 밀도 약층과 수온역전의 영향으로 밀도역전 현상이 발생하였고 이시기에 저층의 용존산소가 급격히 감소하는 결과를 확인할 수 있다. 2009년에도 봄-여름철 특히 5월과 6월에 중간층에서 밀도약층이 시작되고 동시에 용존산소의 농도도 감소하기 시작하는 것으로 나타났다. 정점 4에서

Table 1. Correlation coefficients (r) of dissolved oxygen (DO, mg L⁻¹) to the physical parameters in the surface and bottom water. Coefficients less than 0.35 were omitted and denoted by “—”

Layer	Station	T (°C)	ΔT (°C)	S (psu)	ΔS (psu)	Δρ (kg m ⁻³)	Turbidity (NTUs)	Wind speed (m s ⁻¹)
Surface	1	-0.82**	—	0.58*	0.88**	0.82**	—	—
	2	-0.85**	—	0.52*	0.71**	—	-0.52*	—
	3	-0.87**	-0.44	0.43	0.69**	—	—	—
	4	-0.95**	—	0.59*	—	—	—	0.36
	5	-0.93**	-0.60*	0.61*	0.55*	—	-0.44	0.36
Bottom	1	-0.85**	—	0.82**	0.88**	0.87**	—	—
	2	-0.89**	—	0.81**	0.75**	—	-0.60**	—
	3	-0.69**	-0.37	0.42	—	-0.35	0.46	0.38
	4	-0.82**	-0.39	—	—	—	—	0.49
	5	-0.84**	—	—	—	—	-0.42	—

T, water temperature; ΔT, ΔS, Δρ, temperature, salinity and density difference between the surface and bottom water

*0.05 ≤ P < 0.1; **P < 0.05

도 2008년 9월에 중-저층에서 층별 수온차가 증가하면서 용존산소의 양도 감소하였다. 2009년 봄과 여름철, 특히 4월부터 6월까지 중층 및 저층에서 밀도약층이 형성되고 이에 따라 용존산소도 감소하는 것으로 나타났다. 정점 5에서는 2008년 가을철과 2009년 봄철에 저층에서 다소 강한 성층이 관찰되었고 이시기에 저층의 용존산소도 확연하게 감소하였다. 이러한 결과는 밀도성층과 같은 물리적 순환의 형태와 용존산소의 분포가 연관성이 있음을 시사한다고 할 수 있다. 최근(2011년)에 영산호를 대상으로 조사한 결과(Oh, 2013)에서도 수온약층의 시작깊이에 따라 용존산소 빈산소층의 형성 깊이가 달라지는 것으로 나타났다.

하지만 본 연구에서는 성층이 형성되지 않았을 때도 종종 용존산소가 감소되는 경우도 목격되었으며, 이는 성층 외에 생물, 화학적 인자가 작용했을 가능성이 있다. 가령 2008년 9월에는 수심에 따른 염분, 수온, 밀도의 변화를 보면, 수심이 깊어질수록 염분 농도와 밀도가 소폭 증가하고 수온도 소폭 낮아지는 경향을 보인 반면 용존산소의 농도는 큰 폭으로(특히 정점 3) 감소하였다(Fig. 5). 9월은 특히 강우량이 적었고 수문을 통한 담수 방류도 없었던 것으로 조사되었다(Fig. 2). 따라서 문순 기간 동안 유입되었던 유기물들이 중, 하류에 오랜 시간 동안 체류했을 것이고 미생물의 분해를 거쳐 용존산소가 고갈

되었을 가능성이 있다. 정점 3에서는 주로 미생물의 유기물 분해로 재생산되는 암모늄(1.12 mg L⁻¹)과 인산염(0.48 mg L⁻¹)의 농도가 상류 정점이나 다른 시기에 비해 높은 것으로 나타났다. 국내 다른 호소(대청호)에서도 여름 문순의 집중강우(7, 8월)이후인 9월에 저층의 빈산소층이 확장되는 것으로 보고된 바 있다(An, 2000). 10월에는 정점 1과 3에서 수온의 수직적 변화가 크게 나타나지 않았지만 정점 5에서는 저층(12 m)에서 다소 큰 폭으로 염분과 수온이 증가(수온 역전)하였다. 수온 역전 현상은 과거(2002-2003년)에 실시된 조사결과(박 등, 2008)에서도 보고된 바 있다. 이러한 물리적 환경변화에 따라 용존산소도 감소하는 것으로 나타나 염분 증가에 따른 밀도 성층 형성이 용존산소의 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 성층이 용존산소 감소에 미치는 영향은 다른 호소에서도 보고되고 있다(Patterson 등, 1985). 11월에도 10월과 유사하게 정점 5의 수심 12 m에서 염분이 급격히 증가하였으며 수온 또한 증가했고 용존산소의 농도도 감소한 것으로 나타났다. 하지만 10월과 달리 정점 3에서는 수심에 따라 수온이나 염분의 농도가 소폭 증가하면서 용존산소의 농도가 점차 감소하여 바닥에서는 거의 고갈되었다. 저층에서의 염분, 수온 증가 및 용존산소 감소는 하구언 하류에 위치한 해수가 하구언 하부 지하수로를 통해 유입되면서 수온상승과 미생

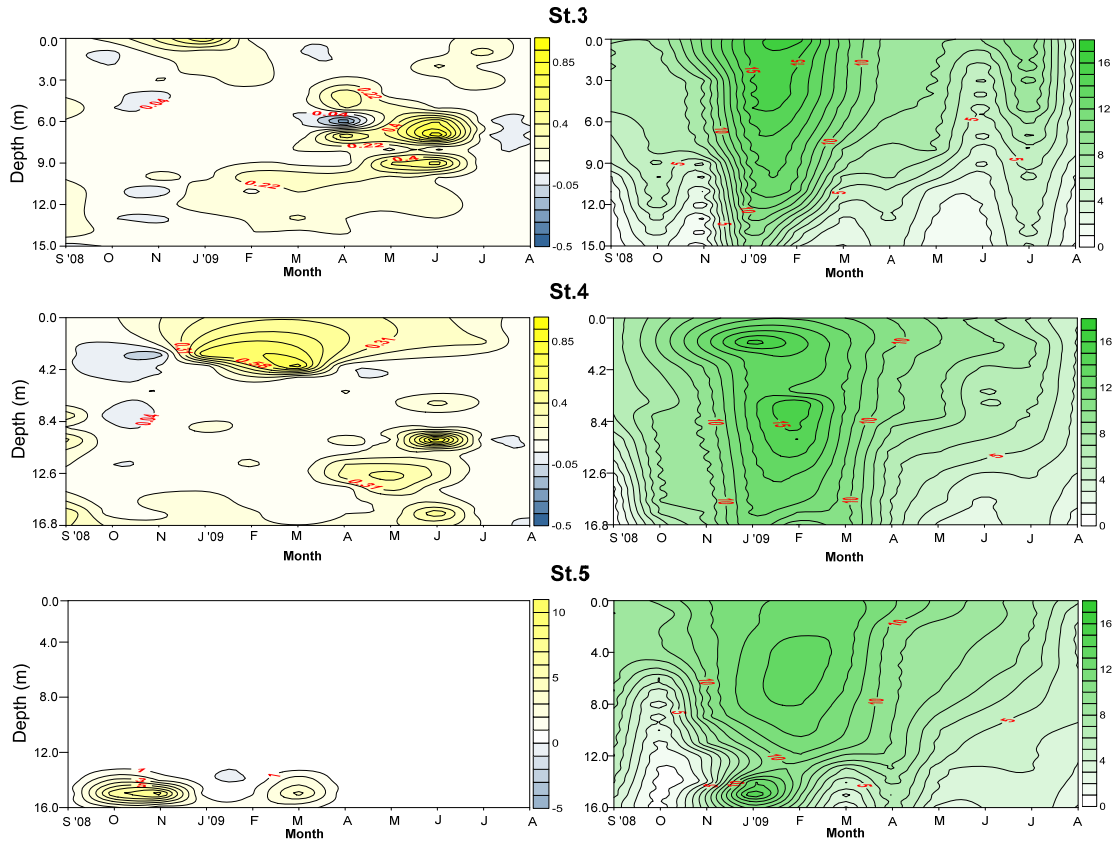


Fig. 4. Vertical distributions of water density gradient at the interval of 1 m water depth and DO concentrations over the sampling period at Stations 3, 4, and 5.

물 작용으로 용존산소가 고갈되면서 나타났을 가능성이 있지만 정확한 기작은 추가 조사를 통해 확인할 필요가 있을 것으로 사료된다.

2009년 1월과 2월에서도 염분의 농도가 증가할 때 수온이 높아졌고 용존산소의 농도가 감소하면서 11월의 경우와 유사한 경향을 보였지만 빈산소층은 형성되지 않았다(Fig. 5). 2월에는 11월과 1월에 목격되었던 저층의 수심별 염분, 수온의 차이가 크지 않았는데 이는 현장조사 2일 전에 이루어진 담수 방류의 영향인 것으로 판단된다. 선형연구에서도 하구둑 수문을 통해 저층수가 하구둑 밖으로 방류되면서 수층을 혼합시키는 것으로 보고된 바 있다(Park 등, 2008).

2009년 3월의 경우, 정점 3의 수심 10 m에서 염분이 다소 증가하고 수온이 감소하기 시작하였으며 용존산소

도 동일한 수심에서 감소하기 시작하였다(Fig. 6). 정점 5에서는 10월에서 2월까지와 마찬가지로 염분의 농도가 증가했으며, 수온 또한 증가하여 수온 역전 현상을 보였고 용존산소의 농도 또한 감소하였다. 3월에는 다른 조사 일자들에 비해 풍속이 증가하여 6.3 m s^{-1} 를 기록하였고, 표층 수온, 염분, 용존산소의 균일한 수직분포를 고려했을 때 강한 바람이 표층, 중층의 물리적 혼합에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 수표면의 바람은 수층의 순환을 일으키면서 산소를 저층에 전달하는 역할을 하는 것으로 보고되고 있다(Ahrnsbrak 와 Wing, 1998).

4월부터는 복사열의 증가로 표층의 수온이 증가하면서 성층이 형성되기 시작하고 수온 역전이나 갑작스런 염분의 증가가 관찰되지 않았으며 동시에 용존산소는 수심별로 서서히 감소하는 결과를 보였다. 5월에는 표층 수

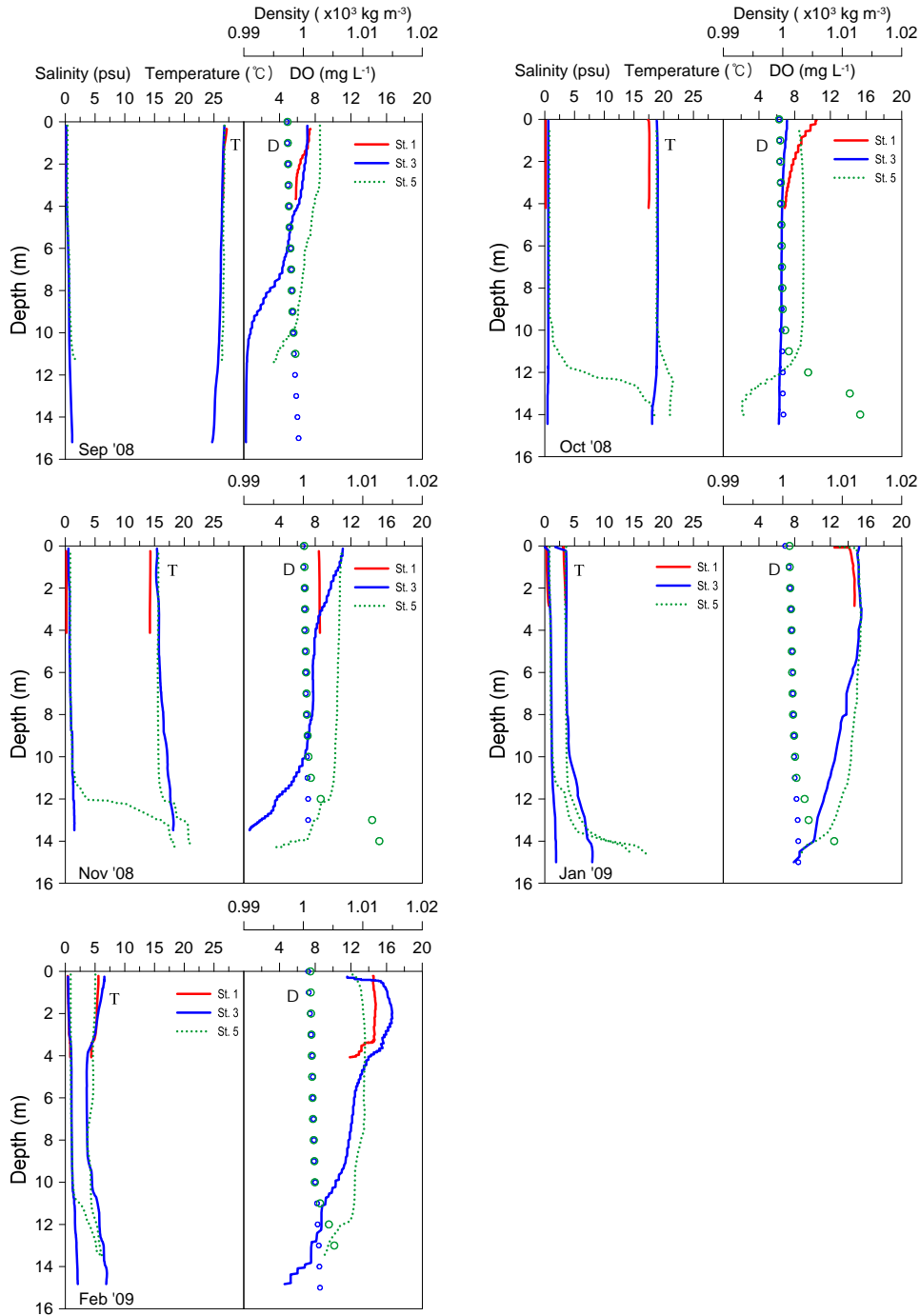


Fig. 5. Vertical profiles of salinity, water temperature, density, and DO during fall and winter from September 2008 to February 2009 at Stations 1, 3, and 5 denoted by red, blue, green color respectively. T and D designate salinity and density denoted by symbol “○”.

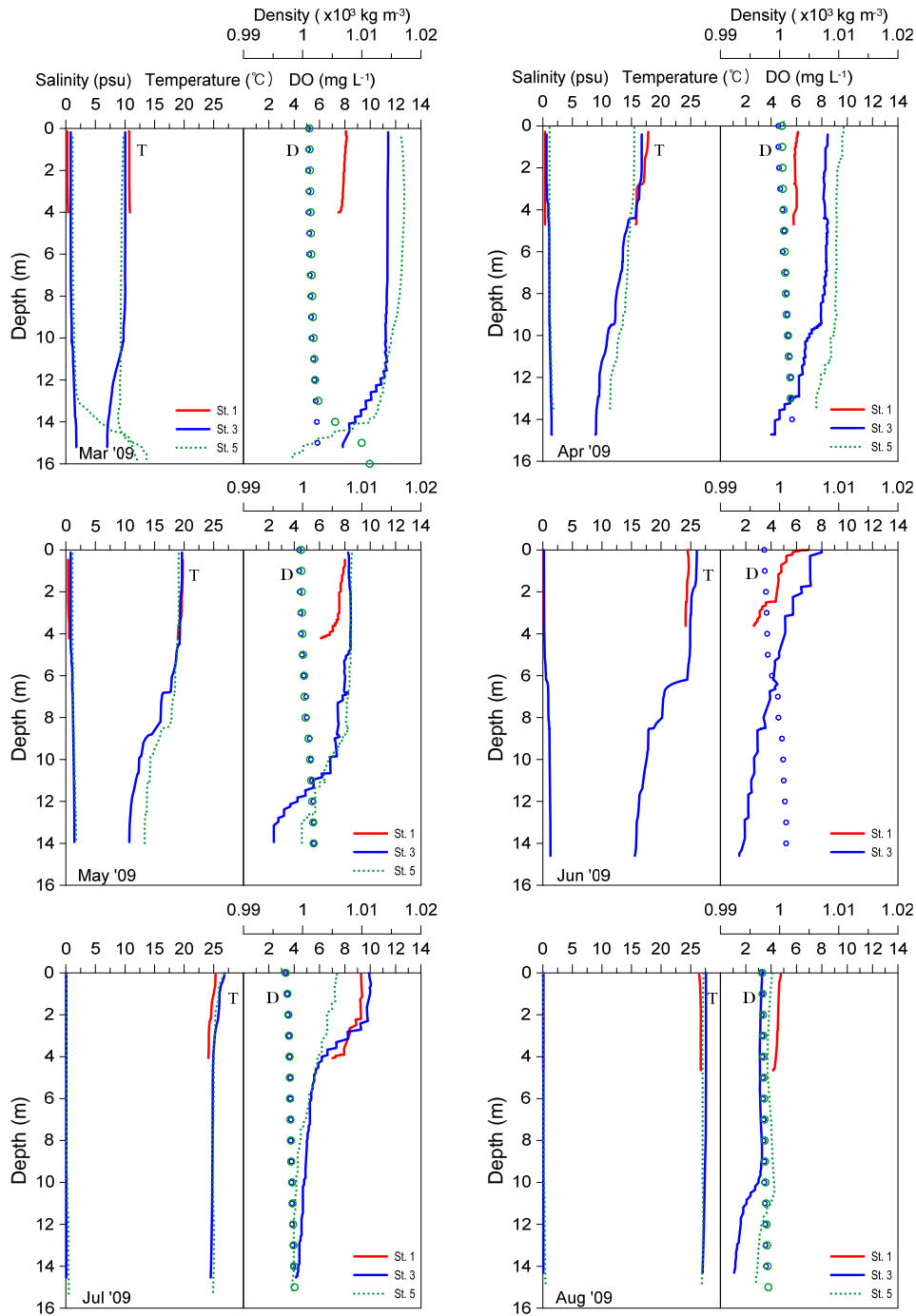


Fig. 6. Vertical profiles of salinity, water temperature, density, and DO during spring and summer from March 2009 to August 2009 at Stations 1, 3, and 5 denoted by red, blue, green color respectively. T and D designate salinity and density denoted by symbol “o”.

온의 상승 폭이 증가하면서 성층이 강화되었고 이에 따라 용존산소의 농도도 급격히 감소하는 형태를 보이고 있다. 6월에는 현장조사일자에 담수가 방류되었지만 정점 3에서 수온약층이 6 m 정도에서 형성되었고, 용존산소도 수심별로 점차적으로 감소한 것으로 나타났다. 상류인 정점 1에서도 다른 계절과 달리 저층에서 빈산소층이 형성되었다. 7월과 8월에도 담수 방류의 영향으로 수층 성층이 형성되지 않았지만 저층의 용존산소 농도는 낮게 나타났다. 6월과 8월에는 현장 조사일자에 담수가 방류되었지만 시간별로 조사한 결과, 실제 현장조사를 실시한 이후에 담수 방류가 이루어진 것으로 나타났다. 하지만 6월의 수층 구조가 8월의 형태와 다른 것은 조사 일 전의 강우량 차이(Fig. 2)가 큰 것 그리고 현장조사 전 7일간의 담수 방류가 6월에는 15.16×10^6 ton(1회), 8월에는 54.44×10^6 ton(4회)으로 큰 차이가 나기 때문으로 사료된다. 7월에는 가장 많은 105.25×10^6 ton(8회)의 담수 방류를 기록하였다. 또한 7월과 8월에는 성층 구조가 유사함에도 불구하고 7월에 용존산소의 농도가 높게(특히 표층에서) 나타난 것 역시 강우와 담수 방류량 및 방류 빈도수의 차이(Fig. 2)에서 비롯되었을 것으로 추정된다. 실제로 An(2000)은 하천기에 강우에 따른 담수 유입량이 많을수록 수층의 용존산소의 양이 증가한다고 보고한 바 있다. 따라서 영산호의 용존산소의 거동을 이해하기 위해서는 강우, 바람, 열교환, 생물 화학적 기작과 같은 자연적인 요인들 뿐만 아니라 하구둑을 통한 담수 방류의 시기, 빈도수, 배제량 등과 같은 인위적인 요인들도 파악해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

인공적으로 형성된 영산호의 용존산소 거동을 이해하기 위해 용존산소와 수온, 염분, 밀도, 탁도와 같은 물리적 환경인자들에 대한 시·공간적 분포와 수직 분포를 조사하였다. 영산호의 빈산소층(hypoxia, $DO < 2 \text{ mg L}^{-1}$) 형성은 과거에도 보고된 바 있고, 본 조사에서도 주로 하류 수역에서 수온이 상승하는 계절에 형성되는 것으로 나타났다. 수온은 다른 물리환경인자들에 비해 용존산소 농도(표, 저층)와 높은 음의 상관성($R < -0.69$, $P < 0.05$)을 보였다. 하지만 기존 연구에 보고된 결과와는 달리 수심이 얇은 수역($< 16 \text{ m}$)임에도 불구하고, 하류 정점의

수층에서 수온 혹은 염분에 의한 밀도 성층이 형성되고 있음을 확인하였다. 일반적으로 수온약층은 봄과 초여름(2009년 3월-6월)에 형성된 반면 염분약층은 가을과 겨울철(2008년 10월-2009년 2월)에 형성되었다. 이들 밀도 약층 형성으로 인한 수층의 성층(안정화)은 저층 용존산소의 감소에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 풍속 증가로 인한 수층 혼합은 일부 시기(3월) 동안만 관찰되었다. 이에 반해 하구둑을 통한 담수 방류는 중, 하류 수층의 성층을 감소시키는 역할을 하는 것으로 확인되었다. 수층의 성층이 소멸되어 혼합되는 시기에도 표층과 저층의 용존산소 농도차가 나타나는데 이는 강우나 다른 생물학적, 화학적 작용이 관여한 것으로 추정된다. 이러한 결과는 인공호소인 영산호의 용존산소 분포 혹은 빈산소층 형성 기작을 이해하는데 기여할 것이다.

감사의 글

논문의 질 향상에 도움을 준 익명의 심사위원들에게 감사의 마음을 전함. 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0025136).

REFERENCE

- ADC (Agricultural Development Corporation), 1984, A report on the sea dike construction for 2nd development and reclamation for agricultural use, Ministry of Agriculture and Forestry.
- Ahmsbrak, W.F., Wing, M.R., 1998, Wind-induced hypolimnion exchange in Lake Ontario's Kingston Basin: Potential effects on oxygen, *J. Great Lakes Res.*, 24, 145-151.
- An, K.-G., 2000, Dynamic changes of dissolved oxygen during summer monsoon, *Korean J. Limnol.*, 33, 213-221.
- An, K.-G., Seo, J., Park, S.S., 2001, Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung Reservoir, *Korean J. Limnol.*, 34, 327-336.
- Batiuk, R.A., Breitburg, D.L., Diaz, R.J., Cronin, T.M., Secor, D.H., Thursby, G., 2009, Derivation of habitat-specific dissolved oxygen criteria for Chesapeake

- Bay and its tidal tributaries, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 381, 204-215.
- Blumberg, A.F., Di Toro, D.M., 1990, Effects of climate warming on dissolved oxygen concentrations in Lake Erie, *Trans. Am. Fish. Soc.*, 119, 210-223.
- Breitburg, D.L., Adamack, A., Rose, K.A., Kolesar, S.E., Decker, B., Purcell, J.E., Keister, J.E., Cowan, J.H., 2003, The pattern and influence of low dissolved oxygen in the Patuxent River, a seasonally hypoxic estuary, *Estuaries*, 26, 280-297.
- Breitburg, D.L., Hondorp, D.W., Davias, L.A., Diaz, R.J., 2009, Hypoxia, nitrogen, and fisheries: integrating effects across local and global landscapes, *Annual Review of Marine Science*, 1, 329-349.
- Burkholder, J., Glasgow Jr., H., Hobbs, C., 1995, Fish kills linked to a toxic ambush-predator dinoflagellate: distribution and environmental conditions, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 124, 43-61.
- Choi, K., Cho, K., Kim, K., Ko, E., 2008, Distribution Characteristic of dissolved oxygen in the Yeongsan Reservoir. *Proceedings of the Korean Society on Water Environment Conferences*, Korea University, Seoul, 349-350.
- Conley, D., Carstensen, J., Vaquer-Sunyer, R., Duarte, C., 2009, Ecosystem thresholds with hypoxia. Pages 21-29 in J. H. Andersen and D. J. Conley, editors. *Eutrophication in Coastal Ecosystems*. Springer Netherlands.
- Dauer, D.M., Ranasinghe, J.A., Weisberg, S.B., 2000, Relationships between benthic community condition, water quality, sediment quality, nutrient loads, and land use patterns in Chesapeake Bay, *Estuaries*, 23, 80-96.
- Diaz, R., Rosenberg, R., 1995, Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna, *Oceanography and marine biology*, 33, 245-303.
- Edwards, W.J., Conroy, J.D., Culver, D.A., 2005, Hypolimnetic oxygen depletion dynamics in the central basin of Lake Erie, *J. Great Lakes Res.*, 31, 262-271.
- Ford, P.W., Boon, P.I., Lee, K., 2002, Methane and oxygen dynamics in a shallow floodplain lake: the significance of periodic stratification, *Hydrobiologia*, 485, 97-110.
- Hull, V., Parrella, L., Falcucci, M., 2008, Modelling dissolved oxygen dynamics in coastal lagoons, *Ecol. Model.*, 211, 468-480.
- Jewett, E., Hines, A., Ruiz, G., 2005, Epifaunal disturbance by periodic low levels of dissolved oxygen: native vs. invasive species, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 304, 31-44.
- Lenihan, H.S., Peterson, C.H., 1998, How habitat degradation through fishery disturbance enhances impacts of hypoxia on oyster reefs, *Ecol. Appl.*, 8, 128-140.
- Mallin, M.A., Mciver, M.R., Ensign, S.H., Cahoon, L.B., 2004, Photosynthetic and heterotrophic impacts of nutrient loading to blackwater streams, *Ecol. Appl.* 14, 823 - 838.
- Oh, J.J., 2013, A Study of low-oxygen layer and vertical stratified formation in the Youngsan estuary, Master's thesis, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Korea.
- Paerl, H.W., Pinckney, J.L., Fear, J.M., Peierls, B.L., 1998, Ecosystem responses to internal and watershed organic matter loading: consequences for hypoxia in the eutrophying Neuse River Estuary, North Carolina, USA, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 166, 17-25.
- Park, J.-C., Park, J.-W., Shin, J.-K., 2006, The cause of metalimnetic DO minima in Andong Reservoir, Korea, *Korean J. Limnol.*, 39, 1-12.
- Park, Y., Cho, K., Cho, C., 2008, Seasonal variation of water temperature and dissolved oxygen in the Youngsan Reservoir, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24, 44-53.
- Patterson, J., Allanson, B., Ivey, G., 1985, A dissolved oxygen budget model for Lake Erie in summer, *Freshwat. Biol.*, 15, 683-694.
- Rao, Y.R., Hawley, N., Charlton, M.N., Schertzer, W.M., 2008, Physical processes and hypoxia in the central basin of Lake Erie, *Limnol. Oceanogr.*, 53, 2007-2020.
- Roberts, J.J., Höök, T.O., Ludsin, S.A., Pothoven, S.A., Vanderploeg, H.A., Brandt, S.B., 2009, Effects of hypolimnetic hypoxia on foraging and distributions of Lake Erie yellow perch, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 381, 132-142.
- Sun, Y.-J., Cho, C., Kim, B.-C., Huh, I.-A., Yoon, J.-H., Chang, N.-I., Cha, S.-S., Cho, Y.-K., 2003, Seasonal Variability of Thermal Structure and Heat Flux in

- the Juam Reservoir, Korean J. Limnol., 36, 277-285.
- Sundbäck, K., Jönsson, B., Nilsson, P., Lindström, I., 1990, Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: An experimental study., Mar. Ecol. Prog. Ser., 58, 261-274.
- Vaquer-Sunyer, R., Duarte, C.M., 2008, Thresholds of hypoxia for marine biodiversity, Proceedings of the National Academy of Sciences Conferences, University of Hawaii, Honolulu, 15452-15457.
- Wang, L., Justić, D., 2009, A modeling study of the physical processes affecting the development of seasonal hypoxia over the inner Louisiana-Texas shelf. Circulation and stratification, Cont. Shelf Res., 29, 1464-1476.
- Weiss, R.F., 1970, The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 17, 721-735.
- Whitmore, T., Brenner, M., Rood, B., Japy, K., 1991, Deoxygenation of a Florida lake during winter mixing, Limnol. Oceanogr., 36, 577-585.
- Yi, S., Sin, Y., Chang, N., Kim, J., Kim, H., Cho, Y., Jeong, J., 2006, Trophic state and water quality in major lakes of the Sumjin and Youngsan River systems, Korean J. Limnol., 39, 296-309.