

수중 광량 모니터링을 통한 하절기 낙동강 본류 소광 특성 연구

강미리^{1a} · 민중혁^{1b,*} · 최정규² · 박수영^{1c} · 신창민^{1d} · 공동수³ · 김한순⁴

¹국립환경과학원 물환경평가연구과

²한국수자원공사 물환경처

³경기대학교 생명과학과

⁴경북대학교 생물학과

A Study on the Light Extinction Characteristics in the Main Channel of Nakdong River by Monitoring Underwater Irradiance in Summer

Mi-Ri Kang^{1a} · Joong-Hyuk Min^{1b,*} · Jungkyu Choi² · Suyoung Park^{1c} · Changmin Shin^{1d} · Dongsu Kong³ · Han Soon Kim⁴

¹Water Quality Assessment Research Division, National Institute of Environmental Research

²Water Environmental Management Department, Korea Water Resources Corporation

³Department of Bioconvergence, Kyonggi University

⁴Department of Biology, Kyungpook National University

(Received 8 October 2018, Revised 12 November 2018, Accepted 15 November 2018)

Abstract

Algal dynamics is controlled by multiple environmental factors such as flow dynamics, water temperature, trophic level, and irradiance. Underwater irradiance penetrating from the atmosphere is exponentially decreased in water column due to absorption and scattering by water molecule and suspended particles including phytoplankton. As the exponential decrease in underwater irradiance affects algal photosynthesis, regulating their spatial distribution, it is critical to understand the light extinction characteristics to find out the mechanisms of algal dynamics more systematically. Despite the significance, the recent data have been rarely reported in the main stream areas of large rivers, Korea. In this study, the euphotic depths and light extinction coefficients were determined by monitoring the vertical variation of underwater irradiance and water quality in the main channel of Nakdong River near Dodong Seowon once a week during summer of 2016. The average values of euphotic depth and light extinction coefficient were 4.0 m and 1.3 m⁻¹, respectively. The degree of light extinction increased in turbid water due to flooding, causing an approximate 50 % decrease in euphotic depth. Also, the impact was greater than the self-shading effect during the periods of cyanobacterial bloom. The individual light extinction coefficients for background, total suspended solid and algal levels, frequently used in surface water quality modeling, were determined as 0.305 m⁻¹, 0.090 m⁻¹/mg·L⁻¹, 0.013 m⁻¹/μg·L⁻¹, respectively. The values estimated in this study were within or close to the ranges reported in literatures.

Key words : Euphotic Depth, Light Extinction, Nakdong River, Underwater Irradiance, Water Quality Modeling

^{1a} 전문위원(Researcher), kmrenv@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-9770-8659

^{1b,*} Corresponding author, 환경연구관(Senior Researcher), joonghyuk@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-2146-001X

² 선임연구원(Senior Researcher), waterchoi@kwater.or.kr, https://orcid.org/0000-0002-7830-1220

^{1c} 환경연구사(Researcher), minky915@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-0722-554X

^{1d} 환경연구관(Senior Researcher), cmsshin77@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-8970-6039

³ 교수(Professor), dskong@kyonggi.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-8438-3229

⁴ 교수(Professor), kimhsu@knu.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-8186-3849

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. Introduction

조류는 광량, 수온, 영양염류 및 물 흐름 특성 등 다양한 환경 인자의 영향을 받아 성장과 소멸을 반복한다. 그 중 조류의 광합성에 이용되는 햇빛은 대기 중에서 물속으로 유입되면서 순수한 물 분자 그 자체, 용존 또는 부유 고형 물질 및 조류 등에 의해 흡수되거나 산란을 하게 된다 (Kirk, 2011; Wetzel, 2001). 따라서 수중 광량(underwater irradiance)은 일반적으로 수심이 깊어질수록 지수함수적으로 감소하는 특성을 보인다(Dodds and Whiles, 2010). 이러한 소광 특성은 조류의 광합성, 즉 일차 생산에 영향을 미쳐 수심별 조류의 수직적 분포를 제어하고(Arst et al., 2008; Klausmeier and Litchman, 2001), 천이 과정 등에 직·간접적으로 관여한다(Drake et al., 2010; Kong et al., 2018; Lewis, Jr., 1978; Schanz, 1985). 따라서 수중 광량 변화에 대한 정량적 이해는 수체의 물리적 특성 외에 조류의 생물학적 거동 해석 측면에서도 매우 중요하다(Zhang et al., 2007).

수체 내 소광 특성은 수심별 수중 광량 측정값을 바탕으로 유평 수심(euphotic depth, z_{eu}) 또는 소광계수(light extinction coefficient, K_e)로 표현된다. 특히, K_e 는 수체의 수직적 소광 특성을 정량적으로 나타내거나 서로 다른 수체 간 소광 특성을 비교할 때 흔히 사용된다(Davis-Colley and Nagels, 2008; Zhang et al., 2012). 일반적으로 K_e 가 클수록 빛의 투과 정도가 낮고 수체가 혼탁하여 유평층의 깊이가 낮아짐을 의미한다. 국립환경과학원에서는 2000년대 국내 대하천 본류 주요 지점들에서 측정 또는 산정한 K_e 를 수계별로 정리하여 보고한 바 있다(NIER, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008). 유역 상류부터 하구 인근까지 여러 지점에서 연중 3~4회 조사한 결과에 따르면, K_e 값의 범위는 0.2~8.5 m^{-1} 로 매우 다양하게 나타났다. 예를 들어, 남한강 본류를 중심으로 총 9지점에서 5~10월 사이 3회 조사한 결과에 따르면 K_e 의 범위는 0.3~3.6 m^{-1} 로 나타났다(NIER, 2008), 낙동강 중·하류 11개 지점에서 2, 4, 6, 9월에 조사한 결과에 의하면 K_e 의 범위는 1.3~6.1 m^{-1} 로 조사되었다(NIER, 2004). 또한 북한강수계 의안호 구간에서 2014년 하절기에 관측된 수중 광량 자료로부터 산정된 K_e 는 평균 0.8 (0.6~1.1) m^{-1} 로 보고된 바 있다(NIER, 2014). 한편 Lee and Rast (1997)는 미국 텍사스에 위치한 휴스턴 호(평균수심 약 3.7 m)에서 2년에 걸쳐 격주 간격으로 수행한 조사연구를 통해 K_e 는 2.5~7.9 m^{-1} , z_{eu} 은 0.6~1.8 m의 범위를 갖는 것으로 보고하였다. 특히 이 지역에서 소광 특성을 제어하는 주요 요인으로 호수의 색도와 탁도를 제시하였으며 이를 반영하여 K_e 를 산정하는 다중선형회귀식을 제안하였다. 이와 같이 일부 연구에서는 수중 광량을 산란 또는 흡수하는 물질별로 소광 특성을 세분하여 분석하기도 하는데, 일반적으로 색도, 부유물질 또는 조류 농도 등에 의한 영향이 고려된다(Lee and Rast, 1997; Wang et al., 2014). 한편, Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)를 비롯한 수질 모델에서 K_e 는 배경소광(K_{e_b}), 부유물질에 의한 소광($K_{e_{tss}}$)

및 조류에 의한 소광($K_{e_{chl}}$) 등의 조합으로 계산된다(Li et al., 2012; Park et al., 1995).

국내 대하천 본류 구간은 최근 급격한 물리적 변화를 겪으면서 수질의 수직적 구배 형성 및 조류 발생 패턴 변화 등 이전과 다른 물환경 변화가 나타나고 있다. 이러한 현상을 과학적으로 분석하여 이를 수질 관리에 효과적으로 활용하기 위해서는 먼저 체계적인 조사연구가 필수적이다. 하지만 수중 광량이 물환경에 미치는 이화학 및 생태학적 중요성에 비해 국내 대하천 본류 구간에서 이와 관련된 최신의 조사연구 결과는 다소 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 일차적인 목적은 현장 조사를 기반으로 대하천 본류에서 나타나는 수심별 수중 광량의 시·공간적 변화 특성을 하절기 주요 환경 조건별로 이해하는 것이다. 또한 현장에서 측정된 수중 광량과 수질 측정 자료를 활용하여 수질모델링에 필요한 주요 환경 요인별 소광계수들(K_{e_b} , $K_{e_{tss}}$, $K_{e_{chl}}$)을 산정하고, 이를 국내·외 주요 문헌에서 보고된 값들과 비교하여 그 적절성을 평가하는 것이다. 이를 위해 2016년 하절기(5~10월) 주 1회 간격으로 합천 창녕보 구간 내 도동서원 인근 두 지점에서 집중적인 수질 모니터링을 실시하였다. 본 연구는 하절기에 나타나는 다양한 환경 조건에서 소광 특성 변화를 보다 정교한 스케일에서 조사하였다는 측면에서 기존의 국내 주요 연구 사례들과 차별성이 있으며, 4대강사업 후 낙동강 본류에서의 소광 특성을 이해하는데 도움을 줄 것으로 기대된다. 아울러 제시된 결과는 향후 낙동강 중·하류 구간과 유사한 국내·외 대하천 본류 환경에서 수질 및 조류예측모델 구축 시 소광 관련 매개변수들을 일차적으로 설정하는데 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상지역

수심별 수중 광량 및 수질 측정은 낙동강수계 달성보와 합천창녕보 사이 도동서원 인근 낙동강 본류 구간에서 수행되었다(Fig. 1). 연구대상지역 내 낙동강 우안은 행정구역 상으로 경상북도 고령군 개진면, 좌안은 대구광역시 달성군 현풍면과 구지면에 속한다. 낙동강 중류의 유하방향은 기본적으로 남북방향이나 본 연구대상지역은 사행하는 낙동강의 특성 상 동서방향으로 흐르는 직선구간에 해당한다. 수심별 수중 광량 측정 지점 두 곳의 위치는 Fig. 1에 제시되었는데, HCUI-1은 달성보 하류 약 8.3 km 부근이며 낙동강 본류 직선 구간의 중앙에 위치하였고 수심은 합천창녕보 관리수위(10.5 EL.m) 기준 약 8m에 달하였다. 한편 HCUI-2는 HCUI-1으로부터 하류 방향으로 약 3 km 떨어진 만곡부 우안지점으로 수심은 관리수위 기준 약 9m이다. 연구지역 인근 달성 AWS 관측 자료에 따르면 이 지역 최근 10년 간(2007~2016년) 연강수량의 평균은 1,132 mm이며 그 변동 폭은 797~1,453 mm로 연간 내리는 강우량의 편차가 비교적 크게 나타났다(KMA, 2017).

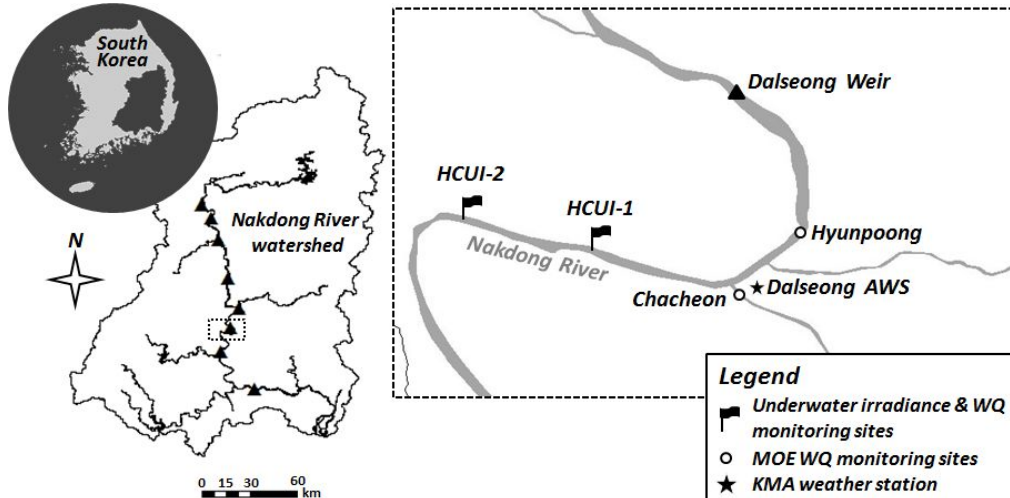


Fig. 1. Location maps showing the study area, including the monitoring stations.

2.2 현장조사

수심별 수중 광량 관측 및 수질 조사는 2016년 5월 24일부터 10월 18일까지 주 1회 간격으로 총 18회 수행되었다. 이 기간 중 7월과 9월 많은 강우가 내린 직후에는 안전을 고려하여 현장조사를 실시하지 않았고 나머지 기간에는 조사가 규칙적으로 이루어졌다. 수중 광량은 선상에서 수중광도계(LI-192, 미국 LI-COR사)를 물속으로 천천히 내리면서 수표면 아래 0.5 m 지점을 시작으로 수심 0.5 m 간격으로 수심별 광합성유효광량(photosynthetically active radiation, PAR)을 직접 측정하였다.

또한 수중 광량 관측과 동시에 조류 모니터링도 함께 수행되었다. 표층 시료의 경우, 수표면으로부터 수심 0.5 m 깊이까지 혼합 시료를 대상으로 하였고 이후 수심 2 m 간격으로 각각의 깊이마다 Van Dorn 샘플러를 이용하여 클로로필-*a*(Chl-*a*) 농도 측정용 시료와 *Microcystis* 속의 현존량을 동정하기 위한 시료를 1 L씩 현장에서 각각 채수하였다. 획득된 시료들은 냉암소 조건을 유지한 채 실험실까지 최대한 빠르게 운반되었다. Chl-*a* 농도는 수질오염 공정시험기준에 따라 측정하였고 *Microcystis* 속의 개체수는 정량 채집된 시료를 24~48시간 이상 침강시킨 후 상등액을 제거하고 적정한 비율로 농축된 시료를 잘 혼합하여 1 mL를 취해 S-R chamber에 넣어 10분 간 침전시킨 뒤 광학현미경(Zeiss Axioskop 2)을 이용하여 계수하였다. 한편 부유물질(SS) 농도는 인근 환경부 수질측정망 현풍 지점에서 주 1회 간격으로 측정된 값을 사용하였다(ME, 2016).

2.3 유광 수심 및 소광계수 산정

수표면에 도달한 빛의 일부는 표층에서 반사되고 물속에 유입된 빛은 다시 흡수와 산란을 통해 수심이 깊어질수록 광량은 감소된다. 육수학에서는 빛이 도달하는 수심에 따라 호소를 유광층(photic zone)과 무광층(aphotic zone)으로 분류하는데 일반적으로 유광 수심(z_{eu})은 입사된 빛의 1%가 도달하는 수심으로 정의된다(Ji, 2008; Wetzel, 2001). Fig.

2는 이러한 과정을 도식화한 것으로 일반적으로 수심별 수중 광량의 감소는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$I_{(z)} = I_{(0)} \times e^{-K_e \cdot z} \quad (1)$$

여기서, $I_{(z)}$ 는 수심별 수중 광량, $I_{(0)}$ 는 수표면 직하 입사 광량, K_e 는 소광계수, z 는 수심이다. $I_{(0)}$ 와 K_e 는 수심별로 관측된 수중 광량을 대수 변환한 후 수심과의 선형회귀를 통해 각각 산정되었다. 또한 유광 수심(z_{eu})은 $I_{(z)}/I_{(0)} = 0.01$ 이 되는 조건에서의 z 값으로 계산하였다.

서론에서 언급한 바와 같이, K_e 는 소광에 영향을 미치는 개별 요소별(수립자, 색도, 조류 및 부유물질 등)로 세분화하여 다양하게 표현이 가능하다(Lee and Rast, 1997; Schanz, 1985). 이와 같은 접근법은 수질예측모델링 연구에서도 많이 적용되고 있다(Li et al. 2012; Park et al., 1995). 일반적으로 담수 환경에서 소광에 가장 큰 영향을 미치는 주요 요소들을 고려할 때, K_e 는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$K_e = K_{e_0} + K_{e_{tss}} \times TSS + K_{e_{chl}} \times Chl - a \quad (2)$$

여기서, K_{e_0} 는 배경소광계수, $K_{e_{tss}}$ 는 부유물질에 의한 소광계수, TSS 는 부유물질 농도, $K_{e_{chl}}$ 는 조류에 의한 소광계수, $Chl - a$ 는 클로로필-*a* 농도이다. 수중 광량과 수질 측정이 모두 수행된 14회 관측값들에 대하여(K_e 는 식 (1)에서 산정되었고, TSS 및 $Chl - a$ 농도는 현장에서 실측된 수심 평균값 사용) 각각의 소광계수들(K_{e_0} , $K_{e_{tss}}$, $K_{e_{chl}}$)은 다중선형회귀분석을 통해 결정되었다.

3. Results and Discussion

3.1 수심별 수중 광량 변화

수심별 수중 광량 조사는 HCUI-1 지점에서 총 18회, HCUI-2 지점에서는 총 14회 실시되었고 이를 수심 1 m

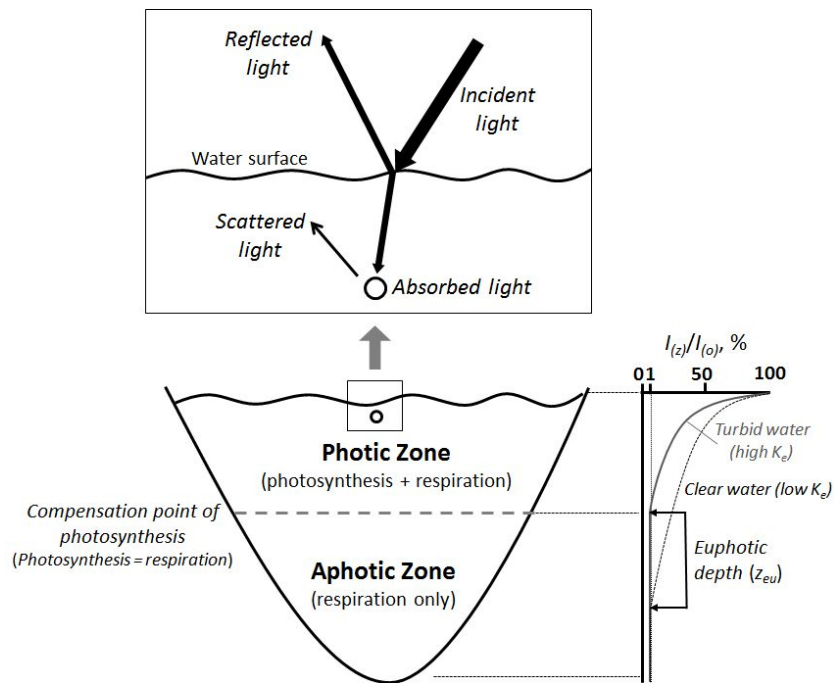


Fig. 2. Schematic diagrams showing key processes causing light attenuation at water surface layer and impact of light on photosynthesis in water column as a function of light attenuation (modified from Dodds and Whiles, 2010, Fig. 3.5).

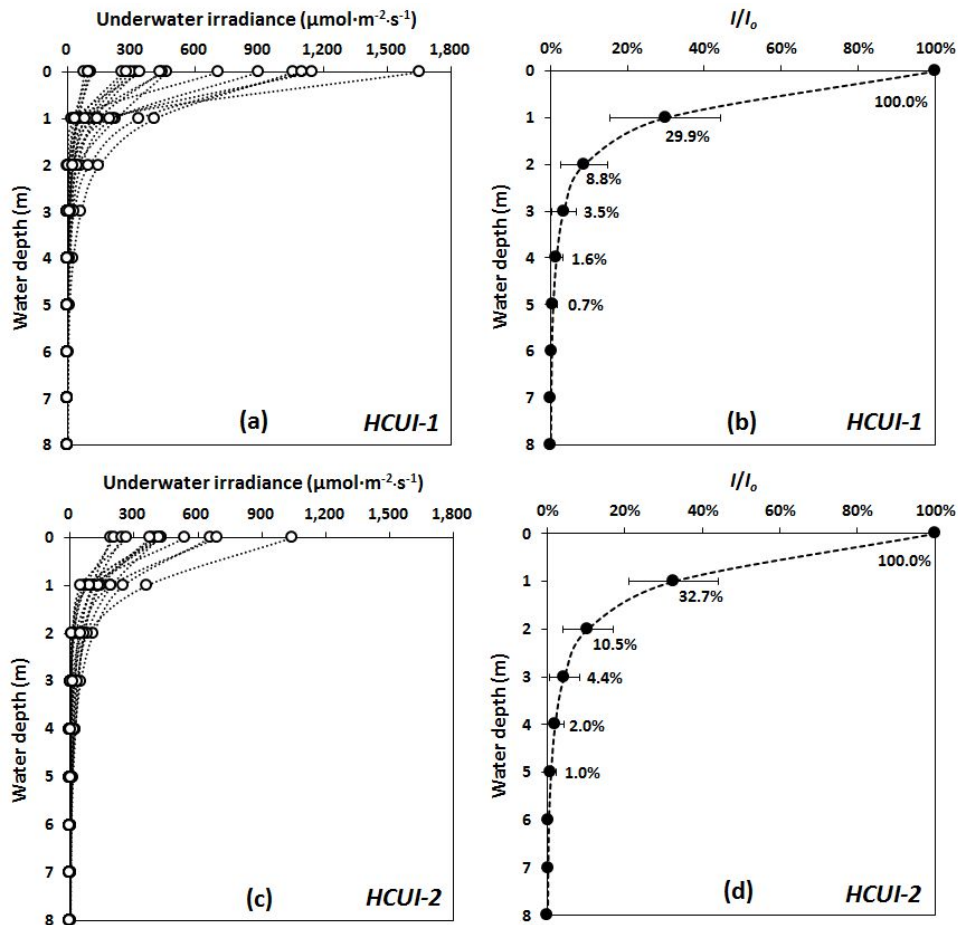


Fig. 3. Vertical variations of underwater irradiance and I/I_0 at HCUI-1 and HCUI-2. The black circles and horizontal bars represent the mean and standard deviation values at specific water depth, respectively.

간격으로 도시한 결과는 Fig. 3(a), (c)와 같다. 수중 광량은 측정 당시의 기상 조건과 물의 특성(탁수 및 남조류 발생 여부 등)에 따라 수표면 부근에서의 차이가 매우 크게 나타났다. 수중 광량의 시·공간적 차이를 단적으로 보여주는 사례로 2016년 6월 14일 관측 결과를 들 수 있다. 이날 오전 HCUI-1 수심 1 m 지점에서 수중 광량은 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 관측되었다. 그로부터 약 1.5시간 후 HCUI-2 지점으로 이동한 뒤 동일한 깊이에서 관측된 수중 광량은 $74 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로, HCUI-1 지점에 비해 2배 이상 감소된 것으로 나타났다.

시·공간적 변화에도 불구하고 수심이 증가함에 따라 수중 광량이 감소하는 소광 패턴은 두 지점에서 거의 유사하였다. 이러한 경향성을 상대적으로 비교 가능하도록 두 지점에서 수심별로 관측된 수중 광량 값을 식 (1)에서 산정된 $I_{(z)}$ 로 나누어 수심별 $I_{(z)}/I_{(0)}$ (%)의 값을 구하고 그 평균값과 표준편차를 Fig. 3(b), (d)에 도시하였다. $I_{(z)}/I_{(0)}$ 값은 수표면에 근접할수록 급격하게 변화하였다. 수심 1 m에서는 평균적으로 수표면 직하 입사 광량의 약 30% 내외만 존재하는 것으로 나타났고 2 m까지 수심이 깊어지면 입사 광량의 약 90%가 감소하는 것으로 나타났다. 이후 수심 증가에 따른 $I_{(z)}/I_{(0)}$ 의 감소폭은 크게 둔화되었고, 대체로 수심 4~5 m 사이 구간에서 유광 수심(z_{eu} , $I_{(0)}$ 의 1%에 해당하는 수심)이 형성되는 것으로 나타났다.

3.2 유광 수심 및 소광계수 산정

조사기간 동안 두 관측지점에서 산정된 K_e 와 z_{eu} 값은 Table 1에 정리되었다. 이 값들은 매 측정일마다 수심별로 관측된 수중 광량을 대수변환한 후 수심과의 선형회귀를 통해 결정되었다. 낙동강 본류 직선부 중앙에 위치한 HCUI-1 지점(수심 약 8 m)에서의 하절기(5~10월) K_e 평균값은 $1.4(\pm 0.7) \text{ m}^{-1}$, z_{eu} 평균값은 $3.9(\pm 1.4) \text{ m}$, 한편 만곡부 우안에 위치한 HCUI-2 지점(수심 약 9 m)에서의 동 기간 K_e 평균값은 $1.2(\pm 0.4) \text{ m}^{-1}$, z_{eu} 평균값은 $4.3(\pm 1.4) \text{ m}$ 로 나타났다. 두 지점에서 산정된 K_e 와 z_{eu} 값들의 평균 간 차이가 통계학적으로 유의미한지 평가하기 위하여 두 곳 모두 채수된 시료들을 대상으로 자료의 정규성을 확인하고 t-test 분석을 각각 시행하였다. 분석 결과 두 지점에서의 K_e 및 z_{eu} 평균값의 차이는 95% 신뢰수준에서 동일한 것으로 나타났다(유의확률, p-value = 0.188, 0.086). 이는 현장에서 측정된 수중 광량의 절대값이 공간적으로 차이가 있을지라도 수직적 소광 특성의 차이는 지점 간 유사하다는 것을 의미한다. 따라서 연구대상지역에서 하절기 K_e 와 z_{eu} 평균값은 각각 $1.3(\pm 0.7) \text{ m}^{-1}$, $4.0(\pm 1.5) \text{ m}$ 로 산정되었다. 아울러 소광 특성의 편차가 갖는 의미에 대해서는 3.3절에서 보다 자세히 논의하였다.

3.3 소광 특성의 시간적 변화

조사기간 중 대하천 본류 소광 특성에 영향을 미치는 환경 변화는 집중 호우에 따른 탁수 발생과 남조류 우점에

Table 1. Light extinction coefficients and euphotic depths estimated at HCUI-1 and HCUI-2

Date	HCUI-1		HCUI-2		Average	
	K_e (m^{-1})	z_{eu} (m)	K_e (m^{-1})	z_{eu} (m)	K_e (m^{-1})	z_{eu} (m)
May 24, 2016	0.8	5.9	-	-	0.8	5.9
May 31, 2016	0.8	5.5	0.7	6.4	0.8	6.0
Jun. 8, 2016	0.7	6.7	0.7	6.7	0.7	6.7
Jun. 14, 2016	1.9	2.4	1.7	2.8	1.8	2.6
Jun. 28, 2016	0.9	5.0	0.9	5.3	0.9	5.2
Jul. 12, 2016	3.4	1.3	-	-	3.4	1.3
Jul. 19, 2016	1.6	2.9	1.6	2.9	1.6	2.9
Jul. 26, 2016	1.2	3.7	1.1	4.2	1.2	4.0
Aug. 2, 2016	0.9	4.9	0.8	5.5	0.9	5.2
Aug. 9, 2016	1.1	4.1	1.2	3.9	1.2	4.0
Aug. 17, 2016	1.2	3.9	1.3	3.6	1.2	3.8
Aug. 23, 2016	1.2	3.9	1.1	4.3	1.1	4.1
Aug. 30, 2016	1.1	4.2	0.8	5.6	1.0	4.9
Sep. 6, 2016	1.7	2.7	2.0	2.4	1.8	2.6
Sep. 20, 2016	1.9	2.5	-	-	1.9	2.5
Sep. 27, 2016	1.0	4.7	-	-	1.0	4.7
Oct. 11, 2016	1.9	2.4	1.6	2.8	1.8	2.6
Oct. 18, 2016	1.2	4.0	1.3	3.5	1.2	3.8
N	18	18	14	14	18	18
Average	1.4	3.9	1.2	4.3	1.3	4.0
SD	0.7	1.4	0.4	1.4	0.7	1.5
Range	0.7~3.4	1.3~6.7	0.7~2.0	2.4~6.7	0.7~3.4	1.3~6.7

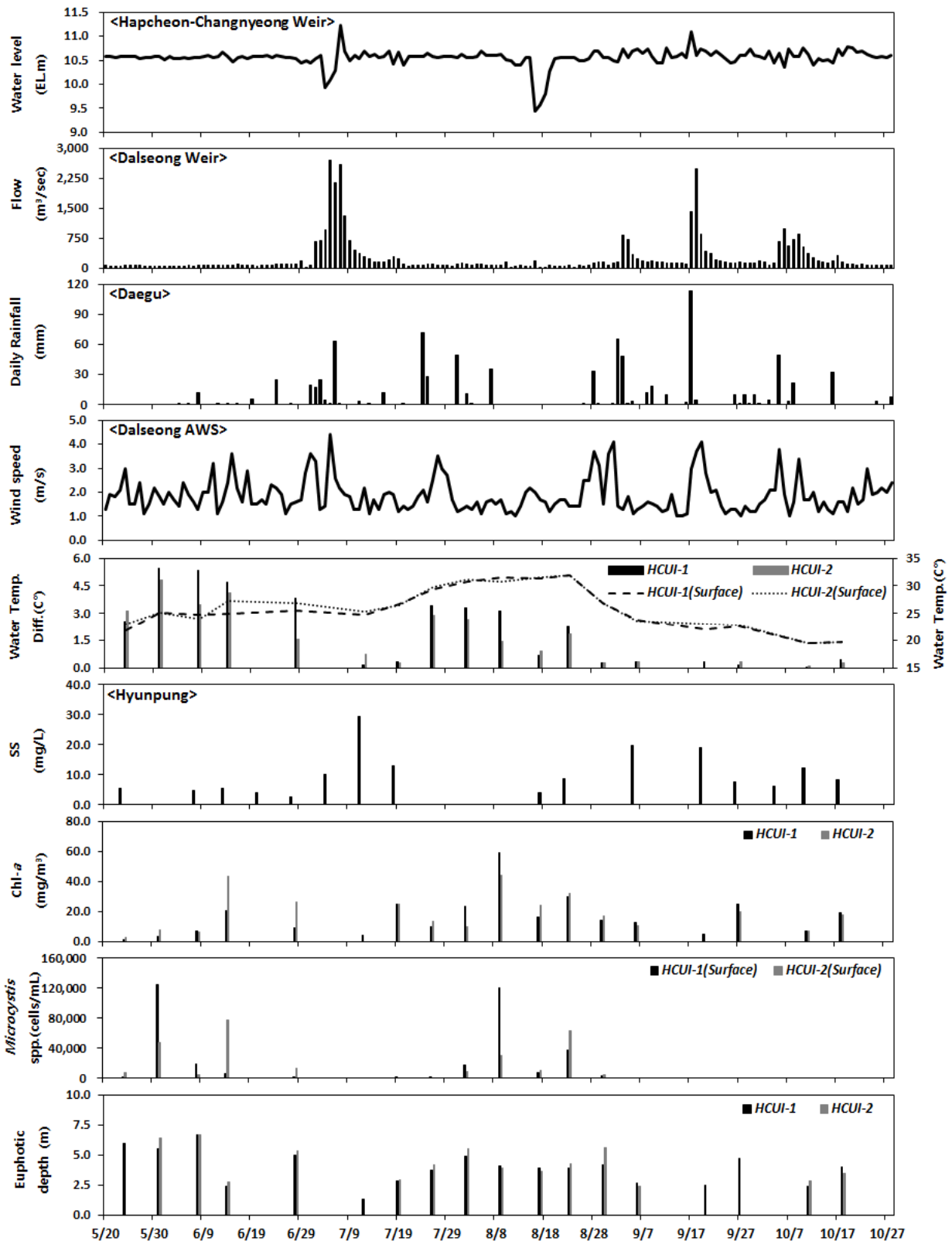


Fig. 4. Temporal variation of euphotic depths estimated at HCUI-1/2, including the related physico-chemical conditions such as stage, flow, wind speed, rainfall, thermal stratification, SS, Chl-*a* concentrations and *Microcystis* abundance.

따른 식물플랑크톤 표층 집적 현상이 있었다. 장마와 집중 호우가 내린 시기는 각각 7월 초·중순과 9월 중·하순이며, 이 시기 동안 유량이 증가하면서 표·저층 간 수온 차가 감

소하는 등 수체가 혼합되고 부유물질(SS) 농도 또한 평소 보다 상당히 높았다(Fig. 4). 탁도 증가에 따른 효과는 1~2주 정도 지속되다가 사라졌다. 한편 5월 하순부터 6월 중

Table 2. Temporal variations of light extinction coefficient with respect to changes in water environment

Phase*	Dates	K_e (m^{-1})	z_{eu} (m)	SS (mg/L)	Chl- <i>a</i> (mg/m^3)	<i>Microcystis</i> spp. (cells/mL)
I	7/12, 7/19, 9/6, 9/20, 10/11	2.1 ± 0.8 (1.6 ~ 3.4)	2.4 ± 0.6 (1.3 ~ 2.9)	18.5 ± 6.9 (12.0 ~ 29.2)	12.2 ± 8.4 (4.2 ~ 25.1)	68 ± 122 (0 ~ 340)
II	5/31, 6/8, 6/14, 8/2, 8/9, 8/23	1.1 ± 0.4 (0.7 ~ 1.8)	4.8 ± 1.5 (2.6 ~ 6.7)	5.9 ± 1.7 (4.6 ~ 8.4)	24.1 ± 17.9 (5.2 ~ 59.0)	46,130 ± 41,971 (4,775 ~ 124,240)
III	5/24, 6/28, 7/26, 8/17, 8/30, 9/27, 10/18	1.0 ± 0.2 (0.8 ~ 1.2)	4.6 ± 0.8 (3.8 ~ 5.9)	5.5 ± 2.3 (2.6 ~ 8.0)	15.5 ± 7.6 (1.0 ~ 26.2)	2,836 ± 4,221 (0 ~ 13,140)

* (Phase I) turbid water condition, (Phase II) cyanobacterial bloom condition, (Phase III) normal condition

순, 8월 초·중순에는 무강우 일수가 길어지고 유량이 감소하면서 유해남조류가 우점하였다. 특히 *Microcystis* 속이 수표면에 우점하는 수화현상이 나타난 시기는 표·저층 간 수온차가 최대 5 °C 이상 관측되는 등 수체의 물리적 안정도가 높은 기간과 대체로 일치하였다(Fig. 4).

소광 특성의 시간적 변화를 주요 환경적 이벤트와 관련하여 분석하기 위하여 총 18회 관측기간을 대규모 강우 이후 탁수 영향이 지배적인 기간(Phase I), 유해남조류가 급증하여 수화현상이 관측된 기간(Phase II), 위 현상이 나타나지 않은 기타 기간(Phase III)으로 크게 분류하였다(Table 2). Phase I 분류 기준은 현풍 지점 SS 농도가 10 mg/L 이상인 경우로 정의하였고, Phase II 해당 여부는 두 지점 표층 *Microcystis* 속의 세포수가 평균 10,000 cells/mL 이상(조류경보제 ‘경계’ 발령 기준에 해당)으로 규정하였다. 기간별 K_e 와 z_{eu} 값과 함께 수질·조류 측정값에 대한 기초 통계량은 Table 2에 제시되었다.

Phase I의 SS 평균 농도는 18.5 mg/L로 다른 두 Phase 기간보다 약 3배 정도 높았으나, 조류 현존량은 상대적으로 낮았다. 특히 이 기간 중 z_{eu} 값은 다른 두 Phase와 비교할 때 거의 절반 수준으로 낮아진 반면 K_e 값은 오히려 약 2배 증가하였다. 이는 탁수 발생이 낙동강 본류 소광 특성에 미치는 영향이 지대함을 의미한다. 반면 수표면에 *Microcystis* 속의 우점에 따른 수화현상 기간(Phase II) 중 소광 특성은 Phase III과 비교할 때 큰 차이가 없었다. 본 연구 결과는 조류 자체소광(self-shading) 효과가 탁수 발생에 따른 영향에 비해 크지 않음을 의미한다. 다만, Phase II에 해당하는 6회 조사 일자 동안 *Microcystis* 속의 현존량 범위가 다양하므로 고농도 시료를 포함하여 보다 장기적인 모니터링을 통해 남조류 표층 우점이 소광 특성에 미치는 영향을 추가적으로 분석·검증할 필요가 있다.

3.4 소광계수의 세분화 및 비교

식 (2)에서 정의된 세분화된 소광계수들(K_{e_b} , $K_{e_{tss}}$, $K_{e_{chl}}$)은 현장에서 관측된 수중 광량 및 수질 측정 결과를 바탕으로 다중선형회귀분석을 통해 결정되었다. 그 결과, K_{e_b} 는 $0.305 m^{-1}$, $K_{e_{tss}}$ 는 $0.090 m^{-1}/mg \cdot L^{-1}$, $K_{e_{chl}}$ 은 $0.013 m^{-1}/\mu g \cdot L^{-1}$ 로 산정되었다. 본 연구에서 제시된 소광계수들과 유광 수심은 국내·외 주요 하천과 수심이 얇은 호수에서 보고된 문헌값들과 유사 또는 변화 범위 내에 대부분 존재하였다(Table 3). 본 연구에서 산정된 K_{e_b} 값의 경우, Chung et

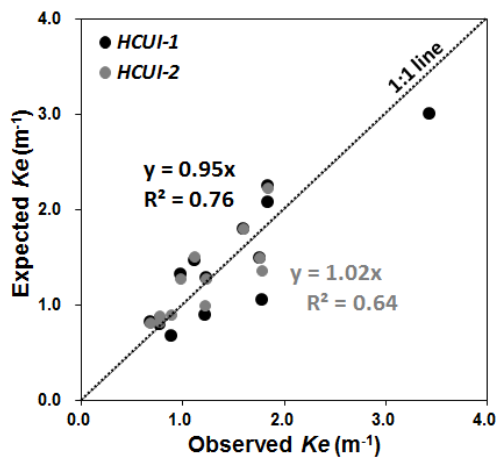
al. (2009)의 대청호 탁수 유입 모델링 연구에서 사용한 값($0.25 m^{-1}$)과 유사하였고 중국의 주요 하천과 호수를 대상으로 최근 발표된 논문들(Gong et al., 2016; Li et al., 2012; Wang et al., 2014)에서 적용된 값들의 범위($0.16 \sim 0.45 m^{-1}$) 내에 위치하였다. $K_{e_{tss}}$ 는 Table 3에서 제시된 국내·외 주요 문헌값 범위($0.02 \sim 0.232 m^{-1}/mg \cdot L^{-1}$)의 중간 수준에 해당하며 특히, 최근 의암호 수심별 수중 광량 조사에서 보고된 값($0.083 m^{-1}/mg \cdot L^{-1}$; NIER, 2014)과 비슷하였다. 문헌 조사에서 $K_{e_{chl}}$ 의 범위는 $0.012 \sim 0.087 m^{-1}/\mu g \cdot L^{-1}$ 로 다른 소광계수들에 비해 변화의 폭이 작았으며 본 연구에서 산정된 $K_{e_{chl}}$ 값도 유사한 수준으로 나타났다.

최근 팔당호에서 봄철 관측된 투명도로부터 추정된 소광계수에 관한 연구 결과가 잇따라 보고되었다(Kong, 2017; Kong et al., 2018). 먼저 Kong (2017)은 소광계수 세분화를 위하여 조류와 조류 이외의 요인들로 크게 구분하였고 각각의 영향을 산정하였다. 여기서 조류에 의한 소광계수로 적용된 값($0.02 m^{-1}/\mu g \cdot L^{-1}$)은 본 연구에서 제시된 값($0.013 m^{-1}/\mu g \cdot L^{-1}$)보다 약간 크지만, 자료의 생성 시기와 방법 및 대상 구간 등의 차이를 고려할 때 유사한 수준으로 볼 수 있다. 또한 Kong et al. (2018)의 연구에 따르면, 소광을 제어하는 핵심적인 두 요소(TSS와 Chl-*a* 농도)의 상관성을 정량적으로 분석한 바 있다. 특히 큰 강우에 의한 탁수의 영향이 없고 조류 농도가 높은 시기의 경우, 두 요인의 영향은 상당 부분 중복될 수 있기 때문에 이를 정밀하게 구분하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 Chl-*a*에 대한 건조중량 비등이 함께 조사되어야하나, 본 연구에서는 수행되지 않았다. 향후 이와 같은 정밀 분석을 통해 고형 물질과 조류의 영향을 보다 분명하게 구분하는 연구도 필요할 것으로 판단된다.

한편 3.2절에서 제시한 바와 같이 수중 광량 관측값으로부터 산정된 K_e 값과 위에서 제시된 세분화된 소광계수들을 사용하여 모의된 K_e 값을 비교한 결과, 두 지점 모두 상당한 양의 상관관계를 보였다(Fig. 5). 모의값들의 평균제곱근오차(RMSE)는 두 지점(HCUI-1, HCUI-2)에서 각각 0.33, $0.25 m^{-1}$ 로 각 지점 평균 K_e 값의 약 21 ~ 24%에 해당하였다. 이는 미국 휴스턴 호에서 색도와 탁도의 함수로 소광계수 산정식을 제안하고 약 13%의 예측 오차를 보고한 Lee and Rast (1997)의 연구 결과에 비해 약간 높은 수준이나, 환경 조건이 상이한 두 수체의 특성과 조사 기간 등을 고려할 때 큰 차이가 있다고 보기는 어렵다. 오히려 중요한 사실은 이와 같은 연구들을 통해 수중 광량을 현장에

Table 3. Light extinction coefficients for various river/shallow lake environments

Study areas	K_e (m^{-1})	K_{e_b} (m^{-1})	$K_{e_{tss}}$ ($m^{-1}/mg \cdot L^{-1}$)	$K_{e_{chl}}$ ($m^{-1}/\mu g \cdot L^{-1}$)	z_{eu} (m)	References
Han River (Korea)	1.3(0.3-3.6)	-	-	-	-	NIER (2008)
Lake Euiam (Korea)	0.8(0.6-1.1)	0.055	0.083	0.027	-	NIER (2014)
Lake Paldang (Korea)	-	-	-	0.018	-	Kong (1992)
	0.5-1.5	-	-	0.020	-	Kong (2017)
Nakdong River (Korea)	2.5(0.4-6.1)	-	-	-	-	NIER (2003, 2004)
Geum River (Korea)	1.5(0.2-2.8)	-	-	-	-	NIER (2006)
Lake Daechong (Korea)	-	0.25	0.02	-	-	Chung et al. (2009)
Yeongsan River (Korea)	1.7(0.4-8.5)	-	-	-	-	NIER (2007)
Seomjin River (Korea)	1.3(0.2-3.4)	-	-	-	-	NIER (2007)
Delaware Estuary (USA)	-	0.095	0.075	0.020	-	Pennock (1985)
Lake Houston (USA)	2.5-7.9	-	0.036	-	0.6-1.8	Lee and Rast (1997)
Fort Loudoun Reservoir (USA)	0.5-2.5	-	-	0.015	1.8-9.2	Brown (1984)
Lake Dianchi (China)	-	0.300	-	0.012	-	Wang et al. (2014)
Xiangxi River (China)	-	0.160	-	-	-	Li et al. (2012)
Lake Taihu (China)	5.2(0.7-20.9)	-	-	-	-	Zhang et al. (2012)
Lake Tianyihu (China)	-	0.450	-	-	-	Gong et al. (2016)
Lake Balaton (Hungary)	4.0(1.0-15.0)	-	-	-	1.2	Honti et al. (2007)
Mackenzie River/Lakes (Canada)	-	-	0.036-0.232	0.087	-	Squires and Lesack (2003)
Nakdong River (Korea)	1.3(0.7-3.4)	0.305	0.090	0.013	4.0(1.3-6.7)	This study

**Fig. 5.** Comparison between the observed and expected light extinction coefficients.

서 직접 측정할 수 없을 때 환경 인자들로부터 소광 특성을 간접적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다는 것이다. 연구대상지역과 유사한 국내 대하천 본류 구간에서 Chl-*a*, SS 농도가 주어진다면 식 (2)를 통해 소광계수를 추정하거나 수심별 소광 변화를 효과적으로 모의할 수 있다.

Fig. 3에서 제시된 바와 같이 수중 광량 관측으로부터 산정된 I/I_0 값을 3.3절에서 분류한 세 가지 phase별로 나누어 도시한 후, 앞서 제시된 세분화된 소광계수를 바탕으로 지점 및 시기별로 모의한 결과는 Fig. 6에 제시되었다. 모의된 수심별 소광 특성은 두 지점에서 다양한 시기동안 실제 측정으로부터 산정된 범위 내에 대부분 위치하여 수중 소광 특성을 재현하는데 활용성이 높은 것으로 판단된다. 아울러

대하천 본류 구간에서 유광층 규모 등을 산정하는 육수학 연구에도 본 연구 결과가 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

4. Conclusion

본 연구는 도동서원 인근 낙동강 본류(달성보 하류 약 8~11 km 구간)에서 2016년 하절기 주 1회 간격으로 현장에서 수중 광량을 관측한 결과를 기반으로 수행되었다. 이를 통해 산정된 K_e 와 z_{eu} 의 시·공간적 변화 특성을 분석하였고 수중에서 소광에 영향을 미치는 주요 요인별로 K_e 를 세분화하여 정량화하였다. 아울러 기존에 제시된 국내·외 문헌값들과 비교하였다. 주요 연구결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 수중 광량 관측값은 측정 시점에 따라 변화가 크지만 수심이 깊어짐에 따라 수중 광량이 감소하는 패턴은 동일 시기에 공간적으로 유사하였다. 하절기 평균적으로 수심 1 m 지점에서는 수표면 아래로 입사된 광량의 약 30%, 수심 2 m 지점에서는 약 90%가 감소하는 것으로 나타났다.

2) 하절기 평균적으로 낙동강 본류 K_e 는 $1.3(\pm 0.7) m^{-1}$, z_{eu} 는 $4.0(\pm 1.5) m$ 로 산정되었다. 다만 소광 특성의 시간적 편차는 비교적 커서 수중 환경 조건이 변화함에 따라 z_{eu} 는 1.3~6.7 m까지 차이가 났다.

3) 하절기 소광 특성을 좌우하는 주요 환경 변화는 집중 호우에 따른 탁수 발생과 남조류 우점에 따른 수화현상이었다. 먼저 탁수 발생 시 K_e 가 평상시 보다 약 2배 증가하고($1.0 \rightarrow 2.1 m^{-1}$), z_{eu} 은 평균적으로 약 2.2 m 감소하면서 수심 $2.4(\pm 0.6) m$ 부근에서 유광층의 경계가 형성되었다. 한편 남조류 우점에 따른 자체 소광 효과는 탁수 영향에 비

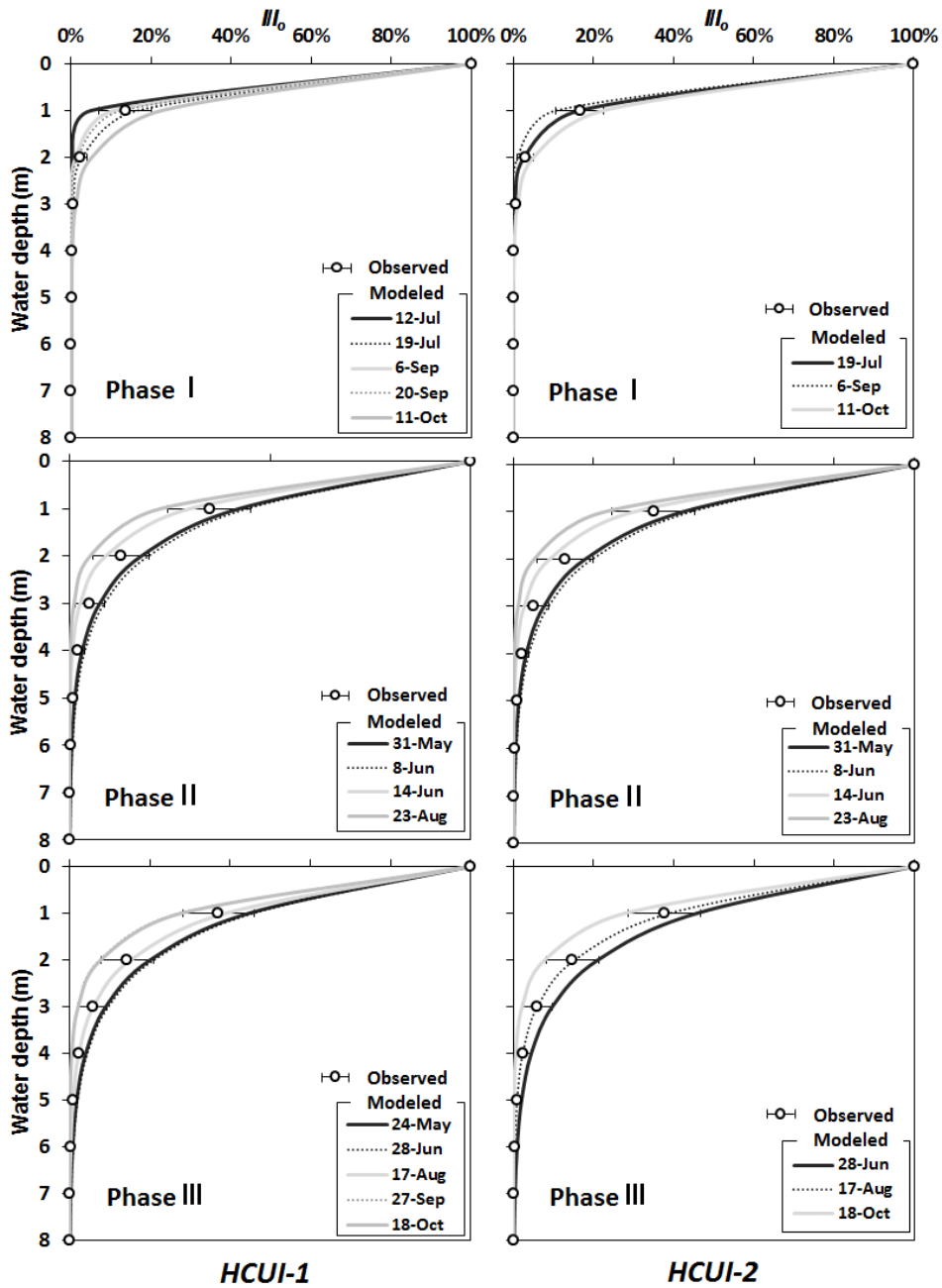


Fig. 6. Comparison between the observed and modeled II_o .

해 크지 않았고 평상시와 크게 다르지 않았으나, 보다 장기적인 조사를 통해 추가적인 검증이 필요하다.

4) 수질모델링 연구에서 사용되는 환경 요소별 Kc 는 다중선형회귀분석을 통해 Kc_b 는 0.305 m^{-1} , Kc_{tss} 는 $0.090 \text{ m}^{-1}\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Kc_{chl} 은 $0.013 \text{ m}^{-1}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 산정되었다. 본 연구에서 제시된 소광 관련 계수들은 국내·외 문헌조사에서 보고된 수치들의 범위 내에 존재하여 합리적으로 도출된 것으로 판단된다.

5) 본 연구 결과는 하절기 낙동강 본류 중·하류 구간에서의 소광 특성을 이해하는데 도움을 주고 향후 대하천 본류 수질·조류 예측모델 구축 시에도 폭넓게 활용될 것으로 기대된다. 또한 다년간의 추가 모니터링 및 자료 분석을 통하여 본 연구에서 제시된 결과들을 검증하고 보완하는 것이 필요하다.

Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행되었습니다(NIER-2016-01-01-026, NIER-2016-03-02-025).

References

Arst, H., Noges, T., Noges, P., and Paavel, B. (2008). Relations of phytoplankton in situ primary production, chlorophyll concentration and underwater irradiance in turbid lakes, *Hydrobiologia*, 599, 169-176.
Brown, R. (1984). Relationships between suspended solids,

- turbidity, light attenuation, and algal productivity, *Lake and Reservoir Management*, 1(1), 198-205.
- Chung, S. W., Hipsey, M. R., and Imberger, J. (2009). Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified lake: Daechong Reservoir, Korea, *Environmental Modelling and Software*, 24, 1467-1482.
- Davies-Colley, R. J. and Nagels, J. W. (2008). Predicting light penetration into river waters, *Journal of Geophysical Research*, 113, G03028, doi:10.1029/2008JG000722.
- Dodds, W. K. and Whiles, M. R. (2010). *Freshwater ecology: concepts and environmental applications of limnology*, 2nd ed. Elsevier, 45-63.
- Drake, J. L., Carpenter, E. J., Cousins, M., Nelson, K. L., Guido-Zarate, A., and Loftin, K. (2010). Effects of light and nutrients on seasonal phytoplankton succession in a temperate eutrophic coastal lagoon, *Hydrobiologia*, 654, 177-192.
- Gong, R., Xu, L., Wang, D., Li, H., and Xu, J. (2016). Water quality modeling for a typical urban lake based on the EFDC model, *Environmental Modeling and Assessment*, 21(5), 643-655.
- Honti, M., Istvanovics, V., and Osztóics, A. (2007). Stability and change of phytoplankton communities in a highly dynamic environment - the case of large, shallow Lake Balaton (Hungary), *Hydrobiologia*, 581, 225-240.
- Ji, Z. G. (2008). *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes and estuaries*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 1-676.
- Kirk, J. T. O. (2011). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*, 3rd ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- Klausmeier, C. A. and Litchman, E. (2001). Algal games: The vertical distribution of phytoplankton in poorly mixed water columns, *Limnology and Oceanography*, 46(8), 1998-2007.
- Kong, D. S. (1992). *Limnological and Ecological Characteristics of Lake Paldang*, Korea University, Ph.D. thesis, 1-421. [Korean Literature]
- Kong, D. S. (2017). Simple material budget modeling for the Paldang Reservoir in the spring season, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(6), 696-714. [Korean Literature]
- Kong, D. S., Min, J. K., Byeon, M., Park, H. K., and Cheon, S. U. (2018). Temporal and spatial characteristics of water quality in a river-reservoir (Paldang), *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(5), 470-486. [Korean Literature]
- Korean Meteorological Administration (KMA). (2017). *Open portal for meteorological data*, <https://data.kma.go.kr/crmn/ain.do> (accessed Aug. 2017).
- Lee, R. W. and Rast, W. (1997). *Light attenuation in a shallow, turbid reservoir, lake Houston, Texas*, USGS Water-Resources Investigations Report 97-4064, USGS, 1-33.
- Lewis, Jr., W. M. (1978). Dynamics and succession of the phytoplankton in a tropical lake: lake Lanao, Philippines, *Journal of Ecology*, 66, 849-880.
- Li, J. Li, D., and Wang, X. (2012). Three-dimensional unstructured-mesh eutrophication model and its application to the Xiangxi River, China, *Journal of Environmental Sciences*, 24(9), 1569-1578.
- Ministry of Environment (ME). (2016). *Water Environment Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr> (accessed Nov. 2016).
- National Institute of Environment Research (NIER). (2003). *A final report on the survey of water quality model parameters in the aquatic ecosystem of Nakdong river*, National Institute of Environmental Research, 6-15. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER). (2004). *A final report on the survey of water quality model parameters in the aquatic ecosystem of Nakdong river (II)*, National Institute of Environmental Research, 5-11. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER). (2006). *A final report on the survey of water quality model parameters in the aquatic ecosystem of Geum river*, National Institute of Environmental Research, 7-12. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER). (2007). *A final report on the survey of water quality model parameters in the aquatic ecosystem of Yeongsan river*, National Institute of Environmental Research, 8-17. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER). (2008). *A final report on the survey of water quality model parameters in the aquatic ecosystem of Han river (main stream and South Han river)*, National Institute of Environment Research, 23-192. [Korean Literature]
- National Institute of Environment Research (NIER). (2014). *Development of water quality prediction system to protect the water supply source of Han river watershed (I)*, 11-1480523-002043-01, National Institute of Environment Research, 1-220. [Korean Literature]
- Park, K., Kuo, A. Y., Shen, J., and Hamrick, J. M. (1995). *A three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): description of water quality and sediment process submodels*, Special Report in Applied Science and Ocean Engineering 327, 28-29.
- Pennock, J. R. (1985). Chlorophyll distributions in the Delaware Estuary: regulation by light-limitation, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 711-725.
- Schanz, F. (1985). Vertical light attenuation and phytoplankton development in Lake Zürich, *Limnology and Oceanography*, 30(2), 299-310.
- Squires, M. M. and Lesack, L. F. W. (2003). Spatial and temporal patterns of light attenuation among lakes of the Mackenzie Delta, *Freshwater Biology*, 48, 1-20.
- Wang, Z., Zou, R., Zhu, X., He, B., Yuan, G., Zhao, L., and Liu, Y. (2014). Predicting lake water quality responses to load reduction: a three-dimensional modeling approach for total maximum daily load, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 423-436.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*, Academic Press, San Diego, 49-69.
- Zhang, Y., Liu, X., Yin, Y., Wang, M., and Qin, B. (2012). Predicting the light attenuation coefficient through Secchi disk depth and beam attenuation coefficient in a large, shallow, freshwater lake, *Hydrobiologia*, 693, 29-37.
- Zhang, Y. L., Qin, B. Q., and Liu, M. L. (2007). Temporal-spatial variations of chlorophyll-*a* and primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, China from 1995 to 2003, *Journal of Plankton Research*, 29, 707-719.