

Article

https://doi.org/10.7850/jkso.2017.22.4.187  
pISSN : 1226-2978

## 영산강의 유기물 플럭스와 장기변동에 대한 연구

조형찬 · 조영길\*

목포대학교 해양자원학과

# Long-term Variation and Flux of Organic Carbon in the Human-disturbed Yeongsan River, Korea

HYEONG-CHAN CHO AND YEONG-GIL CHO\*

Department of Marine Resources, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

\*Corresponding author: ygcho@mokpo.ac.kr

Editor Kyung-Hoon Shin

Received 20 September 2017; Revised 21 November 2017; Accepted 22 November 2017

### ABSTRACT

영산강의 유기물 농도와 플럭스를 파악하기 위하여 2006~2015년까지 10년 동안 약 2주 간격으로 영본D 지점에서 강물을 채취하여 유기물(DOC, POC)을 분석하였다. DOC 농도는 연평균 2.49~4.39 mg·C/L 범위로 연중 증염양상태가 유지되었고, 조류증식 및 강수에 의한 증감에 따라 30.1% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였다. POC는 2006년 6.68 ( $\pm 2.80$ ) mg·C/L에서 2015년 0.19 ( $\pm 0.14$ ) mg·C/L로 10년 간 점진적으로 무려 97% 감소하였으며, 2011년 보건설을 기점으로 극적인 변화를 보였다. 이는 보에 의한 정체와 거름망 효과에 기인한 것으로서 보건설 전후로 POC와 SPM 관계의 상이함, 보건설 이후 POC와 chlorophyll-a의 관계로부터 POC의 기원 및 조성의 극명한 변화가 유도된 사실을 파악하였다. TOC 농도는 POC 감소효과로 보건설 이후 52.3% 줄었고 POC:DOC 존재형태 비 또한 DOC가 90.9%에 달하는 압도적 우위를 차지하였다. 하구언 배수량을 이용해 계산된 TOC 플럭스는 2.56~19.41×10<sup>9</sup> g·C/yr 범위에서 점진적 감소가 뚜렷하였으며, 2011년을 기점으로 전후 5년 평균 14.54×10<sup>9</sup> g·C/yr에서 5.40×10<sup>9</sup> g·C/yr로 62.9% 줄었다. 따라서 보건설 이후 2015년까지 9.14×10<sup>9</sup> g·C, 즉 매년 약 1.83×10<sup>9</sup> g·C의 유기물이 하상에 축적되었을 것으로 추정된다.

Dissolved and particulate organic carbon concentrations and fluxes were measured and estimated for the Yeongsan River during 2006~2015. The dissolved organic carbon (DOC) concentrations ranged from 2.49 to 4.39 mg·C/L with a variance of 30.1% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ), and showed a simple correlation to algal bloom and precipitation. The particulate organic carbon (POC) concentrations had gradually decreased from 6.68 to 0.19 mg·C/L for 10 years, and changed definitely with weir construction in 2011. Based on the relationships between POC and suspended particulate matters and between POC and chlorophyll-a, we found out that the distinct variation of the origin and composition of POC was caused by stagnation and screening effect of the dammed river. The total organic carbon (TOC) concentrations dropped to 52.3% (from 8.26 to 3.94 mg·C/L) as the POC concentrations diminished to more than 94.8% after weir construction, in which the DOC forms up to 90.9%. The fluxes of TOC, based on the relationship between the annual TOC concentration and the discharge of Yeongsan dike sluice, were 2.56~19.41×10<sup>9</sup> g·C/yr, and showed a great deal of variability in 2011. Since then the TOC flux dropped to 5.40×10<sup>9</sup> (2011~2015) from 14.54×10<sup>9</sup> g·C/yr (2006~2010). These results suggest that the weirs trapped annually 1.83×10<sup>9</sup> g·C on a river bed, but released in great levels of dissolved organic form at their exits.

**Keywords:** Dissolved organic carbon, Particulate organic carbon, Total organic carbon, Flux, Weir construction, Yeongsan River

## 1. 서론

하천을 통해 바다로 운반되는 TOC의 양은 대기 POC 플럭스의 4배에 달하는 4×10<sup>14</sup> g·C/yr로 육지와 바다의 탄소순환에 중요한 몫을 차지하며, 특히 하구 및 연안의 유기물 농도에 큰 영향을 미친다(Hedges, 1992; Zweifel *et al.*, 1995; Ludwig *et al.*, 1996; Cole *et al.*, 2007). 강물의 DOC 농도는 1~20 mg·C/L로 하천에 따라 차이가 크지만 지구적 연간 유입량은 POC

와 비슷하여 하천 TOC 플럭스의 약 50%에 이른다(Meybeck, 1982; Hedges, 1992). 하천 유기물은 일차적으로 육상식물로부터 유래된 주로 난분해성 물질로 구성되며 그밖에 유입 배수분지의 다양한 특성을 반영한다(Malcolm, 1990; Opsahl and Benner, 1997).

일반적으로 배수분지의 토양과 수문학적 특성, 흐름의 경로는 하천 유기물의 특성을 결정짓는 가장 중요한 요소다(Hope *et al.*, 1994). 그러나 기후, 강수, 분지의 이용 형태, 댐 및 호수 건설사업 등 다양한 요인이 가중되기 때문에 하천에서 DOC 및 POC는 훨씬 복잡한 양상을 보인다. 그렇기 때문에 해당 하천에서 단기간의 자료와 제한된 요인에 의한 연구는 모든 수준의 배수조건에서 도출되어질 연변화의 형태를 왜곡하거나 잠재적이고 보다 장기적인 특징을 간과할 수 있다.

한강, 낙동강, 금강을 비롯한 우리나라 주요 하천에서 POC 또는 DOC에 대한 연구는 그 자체로서 수질오염 지표인 까닭에 특정시기의 수질평가 도구 및 유기물 오염원의 추적자 관점에서 다수 이루어졌다(Kwon *et al.*, 2002; Yang and Choi, 2003; Ryu *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007; Jang *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009, Oh *et al.*, 2009; Kim and Gil, 2011; Seong and Park, 2012). 영산강에서 진행된 연구 또한 단기의 수질변화를 개선하는 관점에서 주로 오염 현상을 다룬 것으로(Youn *et al.*, 2003; Kang and An, 2006; Jung *et al.*, 2012) 중장기 조사에 기초한 유기물의 존재형태별 변화와 그 양상, 플럭스에 대한 연구는 우리나라 모든 하천을 포함해 전무하다. 따라서 유기물의 자연적 본질과 배수분지의 제반 인위적 요인이 중첩된 하천 유기물에 대한 해석은 제한적일 수밖에 없다. 이에 본 연구는 십여 년에 걸친 보다 장기적인 존재형태별 유기물 농도와 플럭스, 제반 조절요인에 대한 분석을 통해 영산강 유기물의 순환 및 거동을 보다 실체적으로 파악하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구지역

영산강은 서남해역으로 유입하는 유로연장 136 km, 유역면적 3,371 km<sup>2</sup> 규모의 우리나라 4대 하천으로 본류 및 지류 제외의 95%가 농경지다. 농업이 주된 산업으로서 보다 개선된 농토개발을 위해 1981년에 하구둑이 건설되었고 강 안쪽으로 거대한 영산호가 형성되었다. 유역이 주로 1차 산업인 까닭에 농축산 폐수와 생활하수 배출에 의한 유기물 유입이 지속되면서 바다로 흐름이 단절된 수로는 하천 본래의 모습에서 크게 변화하였다. BOD, TN, TP를 합한 총오염발생량은 인접한 섬진강 수계보다 10배가 많은 약 82만 m<sup>3</sup>/day에 이르렀고(Yang and Choi, 2003), 축적된 오염물질이 하구둑 배수갑문을 통해 반폐쇄성 영산하구해역으로 배출되면서 부영양화, 빈산소 수괴 형성, 해저 오염물질 축적 등 연안오염의 주범으로 전락하였다(Lim and Park, 1998; Cho and Park, 1998; Kim and Lee, 2003).

2009년부터 시작된 정부의 4대강 사업은 영산강 본류에 2개의 보를 건설하였고 2011년 완공 후 정체수역을 확대함에 따라 기존의 흐름을 완전히 바꿔놓았다. 하류의 영산호와 함께 중상류의 죽산보, 승촌보로 인한 호수화된 하천은 유해를 방해하고 체류시간을 증가시킴으로써 부영양화와 빈산소 출현, 유무기 오염물질 축적의 악순환을 반복하고 있다(Ko *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013; Park and An, 2014; Song *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2015). 인위적으로 훼손된 환경을 복구하고 자연의 질서에 다가가기 위한 노력의 일환으로 하천의 생태계와 수질, 환경 등 다양한 측면의 연구가 필요해 보인다.

### 2.2 시료의 채취 및 분석

영산강 하류에 위치한 영본D(환경부고시; 34°58'6.97", 126°32'33.21") 지점에서 2006년 1월부터 2015년 12월까지 10년

동안 약 2주 간격으로 238개, 영산호에서 2014년 10월부터 2015년 12월까지 15개월 동안 27개의 강물시료를 채취하였다 (Fig. 1). 채취된 시료는 실험실로 운반하여 부유물(SPM)과 chlorophyll-a, 유기물(DOC, POC) 분석에 필요한 조치를 추가하였고, 수온과 용존산소(DO), pH 등은 YSI-556 수질측정기로 현장에서 직접 측정하였다.

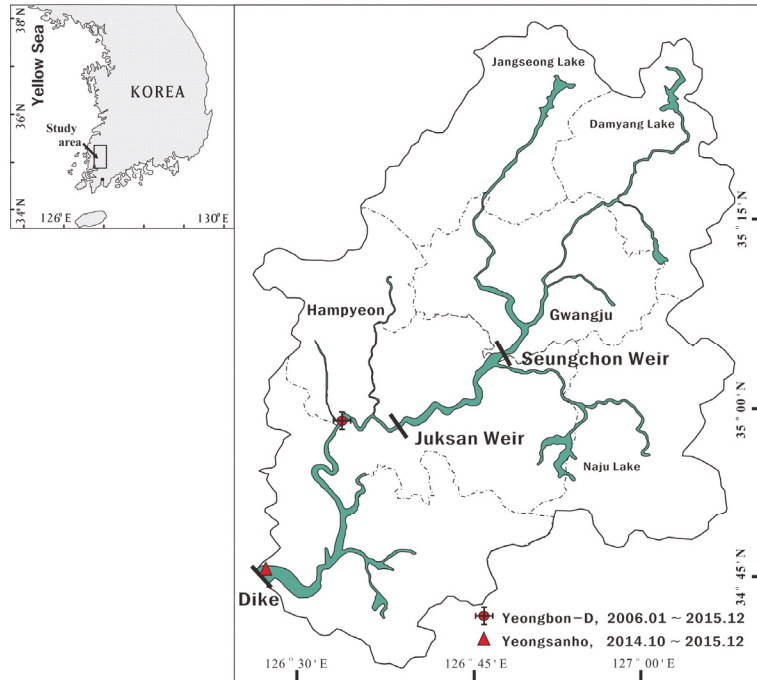


Fig. 1. Map showing the sampling site of the Yeongsan River.

SPM은 여과 전후의 건조 여과지 무게차로 정량하였고, chlorophyll-a는 강물을 여과한 여과지에서 색소를 추출하여 해양 환경공정시험기준에 따라 분광광도법으로 분석하였다(MLTM, 2010). 한편, 직접 분석에서 누락된 2012년 이전의 chlorophyll-a는 하천수 수질측정망에서 제공하는 영본D 지점에 인접한 함평지역 자료를 수집, 활용하였다(Ministry of Environment, Water Information System, <http://water.nier.go.kr>).

TOC는 DOC와 POC의 합으로서, DOC는 여과된 시료를 사용하여 Shimadzu사의 TOC-V<sub>CPH</sub>로 측정하였고, POC는 부유물을 포집한 여과지를 진한염산 증기가 들어있는 데시케이터 안에 넣어 무기탄소를 제거시킨 후 Shimadzu사의 SSM-5000 유기탄소분석기로 정량하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수질요인의 변화

영본D 지점에서 10년 동안 측정, 분석한 수온, DO, pH, SPM, chlorophyll-a(2012~2015), DOC 및 POC 자료의 월평균 값을 Table 1에 요약하였다. 수온은 3.0°C에서 33.7°C로 약 11배 변화하였으며, 10년 평균 17°C에 대해 8.2°C( $\pm 1\sigma$ )의 편차를 보였다. DO는 4.3~20.8 mg·O<sub>2</sub>/L 범위로 4.8배 차이가 관측되었으며, 농도가 낮은 여름철에 비해 수온이 떨어진 11월부터 2월까지의 10 mg·O<sub>2</sub>/L 이상의 높은 농도가 유지되었다. chlorophyll-a 농도는 5.8~94.7 µg/L 범위로 겨울의 최소에 비해

7, 8월에 약 16배 높았으며, 조사기간(2012~2015)의 평균은 32.9(±24.0) µg/L로 기존 연구결과와(Son *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2007) 비슷하였다. SPM은 5.2~277.4 mg/L로 평균(30.1±38.6 mg/L) 대비 128% 변화를 보였고, 영산강 보공사 기간(2010년 7월~2011년 11월)의 농도(평균 87.4 mg/L)가 전(평균 23.7 mg/L), 후(평균 17.6 mg/L)에 비해 각각 3.7배, 5.0배 높았다. 공사기간 외 SPM 농도는 전반적으로 조사기간의 평균 이하 수준에서 강우량에 연동되어 변화하였다(Pearson's  $r = 0.46, p < 0.01$ ).

**Table 1.** Annual variations of temperature, pH, dissolved oxygen (DO), chlorophyll-a (Chl-a), suspended particulate matter (SPM), dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC) and total organic carbon (TOC) in the Yeongsan River.

Period	Temp. (°C)	pH	DO (mg·O <sub>2</sub> /L)	Chl-a (µg/L)	SPM (mg/L)	DOC (mg·C/L)	POC (mg·C/L)	TOC (mg·C/L)
2006	4.3~29.0 (17.1±8.3)	6.9~8.5 (7.7±0.5)	4.7~11.9 (8.5±2.4)	-	10.9~48.1 (31.7±14.8)	2.23~4.73 (3.33±0.84)	3.23~10.46 (6.68±2.80)	5.48~14.54 (10.01±3.04)
2007	6.1~27.5 (17.2±7.8)	7.1~8.7 (8.0±0.5)	7.3~15.2 (10.7±2.9)	-	10.8~34.9 (18.5±7.1)	0.92~4.50 (2.49±1.03)	2.98~8.81 (5.02±1.65)	4.68~11.33 (7.51±2.20)
2008	4.1~27.8 (16.7±8.6)	7.7~8.9 (8.1±0.4)	4.4~18.2 (9.4±4.5)	-	8.1~45.8 (18.1±11.9)	3.00~4.83 (3.76±0.57)	2.15~12.31 (4.56±2.93)	5.20~16.83 (8.33±3.24)
2009	4.5~26.0 (16.7±7.8)	7.3~9.2 (8.2±0.5)	4.3~20.8 (11.1±5.5)	-	10.1~66.7 (23.1±17.9)	3.15~6.99 (4.39±1.19)	0.23~14.10 (4.50±3.36)	3.58~18.74 (8.90±3.80)
2010	3.4~27.7 (17.0±8.7)	6.8~8.6 (7.7±0.6)	4.5~18.2 (9.6±4.2)	-	12.2~277.4 (65.9±78.3)	2.71~5.24 (3.63±0.68)	0.25~11.05 (2.94±3.12)	3.08~15.62 (6.57±3.54)
2011	3.0~28.4 (16.7±8.2)	5.9~9.0 (7.5±0.9)	7.4~20.2 (11.4±3.9)	-	15.8~229.2 (73.4±64.6)	2.47~4.35 (3.38±0.65)	0.14~2.54 (0.82±0.74)	2.77~5.28 (4.21±0.81)
2012	3.1~28.8 (17.3±8.8)	5.4~8.1 (7.3±0.9)	7.3~16.8 (10.1±2.6)	5.8~62.9 (33.2±17.7)	11.9~65.4 (25.9±15.5)	2.49~5.50 (3.72±0.98)	0.19~0.48 (0.29±0.09)	2.68~5.83 (4.00±1.00)
2013	3.4~33.7 (16.9±9.6)	5.7~9.3 (7.3±0.9)	7.7~17.5 (11.4±3.1)	13.9~92.7 (37.6±22.2)	8.0~37.3 (17.9±7.3)	2.65~5.96 (3.65±1.04)	0.08~0.75 (0.31±0.18)	2.98~6.71 (3.96±1.09)
2014	3.9~26.3 (17.0±8.6)	6.2~8.0 (7.3±0.5)	6.9~20.1 (11.5±4.5)	6.7~94.7 (25.8±24.2)	8.6~53.6 (15.2±12.3)	2.15~6.50 (3.96±1.41)	0.09~1.45 (0.29±0.38)	2.26~6.91 (4.26±1.63)
2015	4.8~27.5 (17.1±8.2)	6.8~8.3 (7.6±0.5)	7.8~18.1 (11.6±3.4)	5.8~92.9 (35.1±30.6)	5.2~19.7 (11.6±4.6)	1.59~6.04 (3.11±1.15)	0.04~0.47 (0.19±0.14)	1.64~6.08 (3.29±1.15)

### 3.2 DOC 농도 및 변화

DOC 농도는 0.92~6.99 mg·C/L 범위로 조사기간 동안 7.6배의 차이가 관측되었다. 10년 평균은 3.54(±1.07) mg·C/L로 온대 기후대의 강에서 보고된 값의 범위(3.0~15.0 mg·C/L)에 속하였고(Degens, 1982; Thurman, 1985), 우리나라 4대 하천의 평균(3.72 mg·C/L)과 비슷하였다(Tables 1, 2).

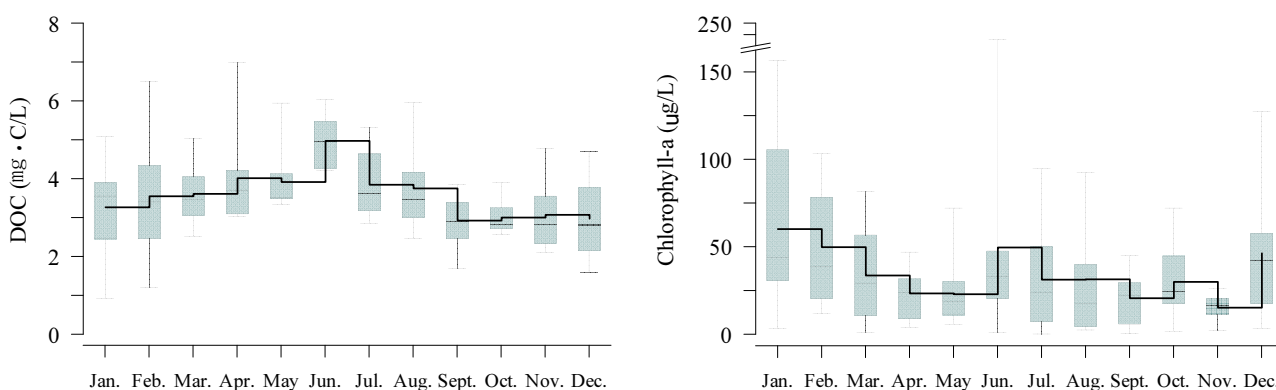
DOC 농도가 높은 시기는 갈수기로 겨울부터 홍수기 이전까지 꾸준히 상승하여 6월에 평균 4.94(±0.63) mg·C/L에 달한다. 이는 월평균 최저 농도에 비해 70.9% 높아진 값으로서 Thurman (1983)의 분류기준으로 부영양상태에 해당된다. 홍수기에 접어들면서 DOC 농도는 점차 감소하여 9월에 평균 2.89±0.63 mg·C/L로 최저에 이르고 이후 조금씩 증가해 연속 중영양 상태(2~4 mg·C/L)를 유지한다(Fig. 2).

홍수기의 DOC 감소는 강수에 의한 육상기원 유기물의 희석을 주요인으로 보는 사례가 일반적이다(Parks and Baker,

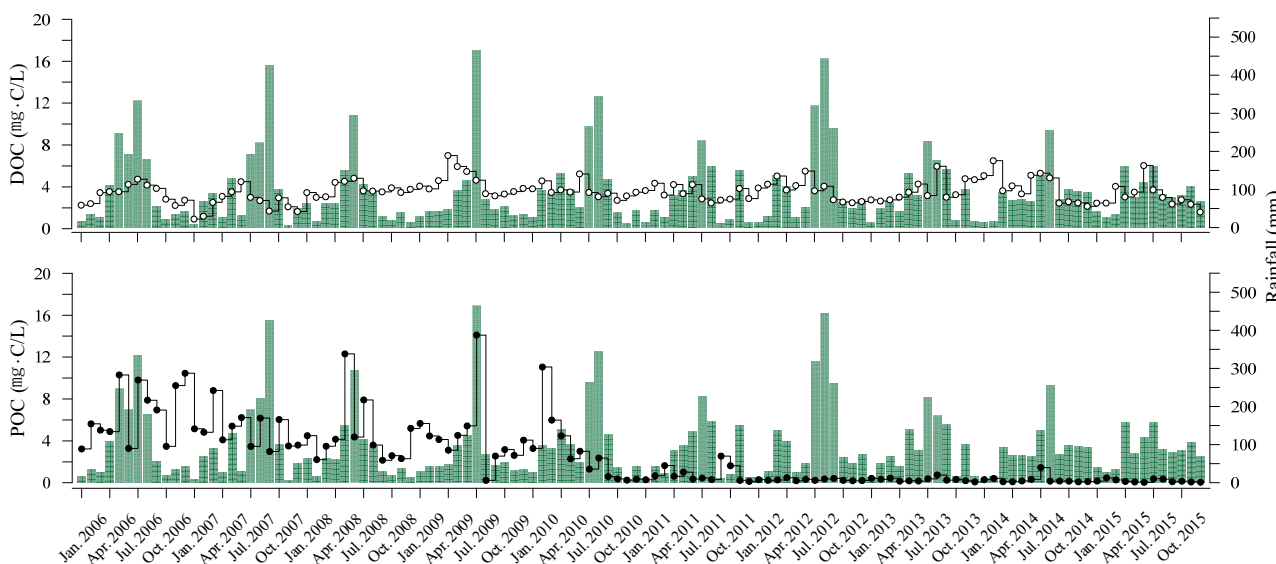
**Table 2.** Average concentrations of dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC) and total organic carbon (TOC) in major rivers of Korea.

	DOC (mg·C/L)	POC (mg·C/L)	TOC (mg·C/L)
Yeongsan River <sup>1)</sup>	0.92~6.99 (3.54±1.07)	0.04~14.10 (2.56±3.05)	1.64~18.74 (6.10±3.29)
Han River <sup>2)</sup>	4.67	-	6.84
Geum River <sup>3)</sup>	3.77	2.27	6.05
Nakdong River <sup>4)</sup>	2.90	-	4.00

<sup>1)</sup>This study, Figures in parenthesis are average±1SD; <sup>2)</sup>Kim *et al.*(2007); <sup>3)</sup>Jang *et al.*(2008); <sup>4)</sup>Lee *et al.*(2013).



**Fig. 2.** Monthly variations of dissolved organic carbon (DOC) and chlorophyll-a measured during 2006 ~ 2015. The full lines represent monthly mean values.



**Fig. 3.** Monthly variations of dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) measured during 2006 ~ 2015. Bars in figures are monthly rainfall data.



1997; Kim *et al.*, 2009). 홍수기 후반(9월)에 형성된 10년간 월평균 농도의 저점은 그러한 사실을 뒷받침하며(Fig. 2), 강수와 부조화된 DOC의 장기변동을 통해 강수에 의한 희석과 씻김효과를 확인할 수 있다(Fig. 3). 그럼에도 불구하고 연중 중영양상태 이상의 DOC 농도는 chlorophyll-a와 관련성에 비추어 볼 때(Pearson's  $r = 0.40, p < 0.01$ ) 조류의 광합성에 의한 공급으로 판단된다(Fig. 2). 조류의 1차 생산과 자가분해는 현장 DOC 농도에 영향을 미치며(Jung *et al.*, 2012; Bowszys *et al.*, 2014), 영산강 수역에서 기존연구는 고수온기와 저수온기에 각각 특정 조류 증식에 의한 유기물 과잉을 지적한 바 있다(Jung *et al.*, 2012; Son *et al.*, 2013; Jeong *et al.*, 2014). 홍수기를 포함하는 고수온 기간에 DOC와 chlorophyll-a의 양호한 관계는(Pearson's  $r = 0.54, p < 0.01$ ) 특정 조류의 대량증식에 따른 DOC 공급 가능성을 시사하며, 이렇게 부가된 DOC에 의해 홍수기의 희석효과가 완화됨으로써 중영양단계의 DOC 농도가 유지될 수 있을 것이다.

### 3.3 POC 농도 및 변화

POC는 0.04~14.10 mg·C/L 범위로 10년 동안 매우 큰 폭의 차이가 기록되었고, 평균 2.56 ( $\pm 2.47$ ) mg·C/L 대비 119% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였다(Tables 1, 2). 연평균 농도는 조사를 시작한 2006년에 6.68 ( $\pm 2.80$ ) mg·C/L로 가장 높았고 이후 지속적으로 감소하여 2015년에 0.19 ( $\pm 0.14$ ) mg·C/L로 최저였다. 특히 2011년 보가 완공된 이후(2011년 12월~2015년 12월) POC 농도는 평균 0.27 ( $\pm 0.22$ ) mg·C/L로 보공사 이전(2006년 1월~2010년 6월)의 평균 5.17 ( $\pm 2.83$ ) mg·C/L에 비해 94.8% 감소하였다.

POC 농도가 가장 높은 시기는 2009년 7월(14.1 mg·C/L)과 2008년 5월(12.31 mg·C/L)로 강수량이 높았던 시기와 일치하며, 강수량과 동조화 경향은 갈수기인 2010년 2월(11.05 mg·C/L)과 2006년 11~12월(9.28~10.46 mg·C/L)의 예외적인 경우를 제외하면 보공사 이전까지 지속된다(Fig. 3). 강수는 육상기원 유기물의 운반 동력으로 부유물과 함께 POC 증가를 유발함으로써 이 두 요소의 상호 관련성을 유도한다. Fig. 4는 SPM과 POC의 밀접한 관계( $R^2=0.61, 0.77$ )와 아울러 보건설 전후로 확연히 다른 두 관계식으로부터 보의 거름망 효과 및 수로환경 변화의 영향을 극명하게 보여준다.

높은 강수량에도 불구하고 보에 갇힌 후 유하된 부유물은 걸러짐에 의한 조성의 변화는 물론 강수에 의한 영향에서 멀어질 수 있다. 보건설 이후 강수량과 무관한 POC 변화(Fig. 3), 보건설 후로 동조화 현상이 달라진 POC와 SPM 관계는(Fig. 4) 그러한 가능성을 뒷받침한다. 보건설 이후 POC는 SPM이 평균 23.7 mg/L에서 17.6 mg/L로 약 26% 감소한 것에 비해 95% 감소했다. 이는 POC 농도가 평균 5.17 mg·C/L에서 0.27 mg·C/L로 무려 19.1배 감소한 것으로서 SPM 변화와 괴리가 크다. 즉 확연히 다른 두 직선의 식은 보건설 전후로 하도준설, 보공사 등으로 인해 SPM의 유기물 조성이 달라졌음을 지시한다.

광합성에 의한 조류 증식은 육상기원 유기물과 함께 하천 POC의 주된 공급원으로서 그 기여도를 chlorophyll-a에 근거하여 추정할 수 있다. 즉 POC/chlorophyll-a 비는 광합성 조류의 비중이 클수록 작아질 것이며, 반대의 경우 육상으로부터 유기물 유입을 예상하는바 일정한 비(100)에 준하여 두 공급원의 우위를 평가할 수 있다(Eppley *et al.*, 1977; Berg and Newell, 1986). chlorophyll-a의 직접조사가 시작된 2012년 3월 이후 4년 동안 POC와 chlorophyll-a는 양호한 관계를 유지하며(Fig. 5), 그 비는 100을 초과한 두 시기를 제외하면 1.2~30.2 (평균 9.7 $\pm$ 6.2) 범위로 비교적 작다. 월평균 강우량이 259 mm (2012년 9월)와 225 mm (2013년 7월)로 높았던 두 시기는 SPM 또한 같은 기간의 평균(17.8 mg/L)보다 훨씬 높은 97.9 mg/L 및 53.3 mg/L로 육상기원 유기물 유입으로 인한 비의 일시적 증가를 뒷받침한다(Fig. 6). 따라서 보건설 이후 POC 농도는 전반적으로 낮은 값의 POC/chlorophyll-a 비에 근거할 때 현장의 광합성 조류에 의한 우월한 공급에 따라 조절되는 것으로 판단된다.

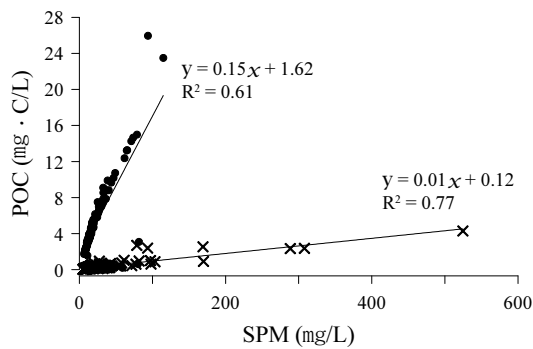


Fig. 4. The relationship between particulate organic carbon (POC) and suspended particulate matter (SPM) measured before (•) and after (×) weir construction.

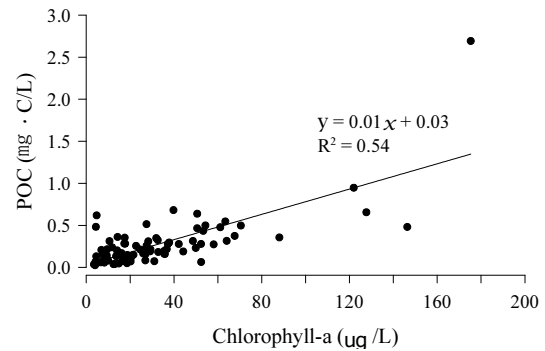


Fig. 5. The relationship between particulate organic carbon (POC) and chlorophyll-a measured after weir construction.

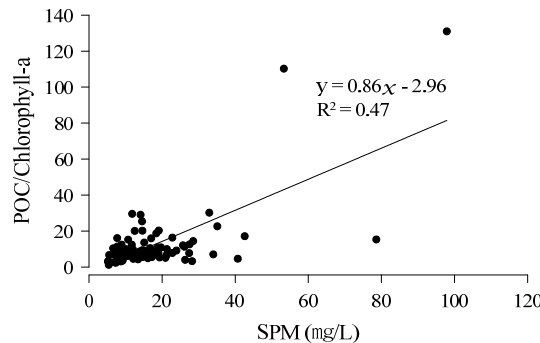


Fig. 6. The relationship between POC/chlorophyll-a ratio and suspended particulate matter (SPM) measured after weir construction.

### 3.4 TOC 농도 및 존재형태

지난 10년간 TOC 농도는 평균  $6.10 (\pm 3.29)$  mg·C/L, 1.64~18.74 mg·C/L 범위로 약 54% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였다(Tables 1, 2). 시기별 농도 변화는 보건설 시작 전후로 구분되며 이전(2006~2010) 평균  $8.26 (\pm 3.32)$  mg·C/L에서 이후에  $3.94 (\pm 1.18)$  mg·C/L로 약 52%가 줄었다. 이와 같은 추이는 보건설 전후로 약 95% 급감한 POC에 비할 때 다소 완화된 것으로서 기간별 변화에 보다 관대한 DOC 농도와 비교된다.

TOC의 구성요소인 DOC와 POC 존재형태 비는 보건설을 전후로 현저히 다르다. 보건설 이전인 2010년까지 5년간 POC 비율은 평균 52.9% (35.4~67.0%)에서 이후 5년 평균 9.1% (5.9~18.1%)로 급격히 감소한 반면, DOC가 차지하는 비율은 5년 평균 47.1% (33.0~64.6%)에서 90.9% (81.9~94.1%)로 상대적인 증가를 보였다(Fig. 7).

조류의 이상증식, 유기쇄설물의 유입 등 계절적 사건에 의한 특정 존재형태 비의 증감은 대체로 시간의 함수로 재현된다(Thurman, 1985; Kim *et al.*, 2009). 그러나 보건설 이후 POC 농도의 급감 및 변화패턴은 5년 동안 시간(계절) 의존적 변화의 단서를 보여주지 않으며 수로환경 변화에 따른 POC 존재형태 비의 열세로 귀결된다. 따라서 영산강 TOC는 두 존재형태가 양립하는 포괄적 수준에서 단일 존재형태의 우위로 바뀌었으며, 보건설 이전에는 POC (Pearson's  $r = 0.95, p < 0.01$ )가, 이후에는 DOC (Pearson's  $r = 0.93, p < 0.01$ )가 주 조절요인으로 작용하고 있음이 확인되었다(Fig. 8).

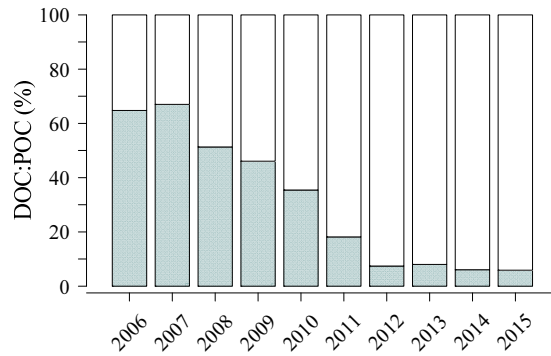


Fig. 7. Yearly variations of dissolved organic carbon (white area) and particulate organic carbon (shadowed area) measured during 2006~2015.

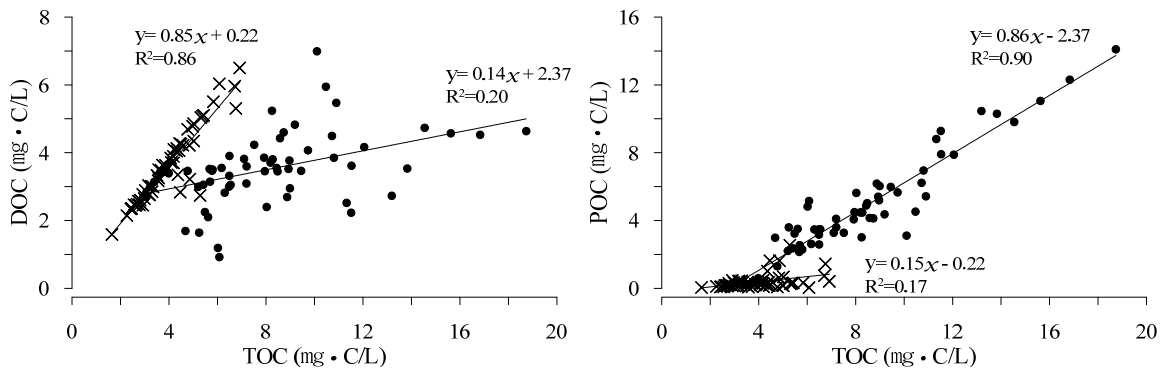


Fig. 8. The relationship between total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC) measured before (•) and after (x) weir construction.

### 3.5 영산강의 TOC 플럭스

영본D 지점의 하류 말단에 위치한 영산호는 영산강하구언에 의해 바다와 단절된 상류 하천 운반물질의 저장고다. 연구의 후반기(2014. 10~2015. 12)에 측정된 영산호의 TOC 농도는 2.0~19.1 mg·C/L (평균 4.5 mg·C/L)로 같은 기간 영본D 지점(1.6~6.1 mg·C/L, 평균 3.1 mg·C/L)에 비해 평균 대비 약 45% 더 높아 유기물의 농도변화가 예측되었다. 하류 방향으로 시공간적 변화에 따라 유기물의 거동이 어떻게 달라지는지 추가 연구의 필요성이 요구된다.

영산호의 유기물은 조류 대증식, POC 분해 등 다양한 생물화학적 과정을 거쳐 하구언 배수갑문을 통해 바다로 방출된다. 영산호의 TOC 자료가 단기에 국한된 까닭에 방류수의 TOC 농도를 영본D 지점의 농도로 가정하면 한국농어촌공사에서 제공하는 월별 방류량으로부터 영산강을 통한 10년간의 유기물(TOC) 플럭스를 계산할 수 있다.

$$\text{TOC 플럭스(g·C)} = \text{TOC 농도(mg·C/L)} \times \text{방류량(m}^3\text{)}$$

지난 10년 동안 TOC 플럭스는  $2.56 \sim 19,41 \times 10^9$  g·C/yr 범위로 연도에 따른 점진적 감소가 뚜렷한 가운데 평균( $9.97 \times 10^9$  g·C/yr) 대비 약 57% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였다(Fig. 9). 연평균 TOC 플럭스는 2011년을 기점으로 급격히 감소하여 이후 5년간 평균  $5.40 \times 10^9$  g·C/yr를 배출해 이전 5년 평균( $14.54 \times 10^9$  g·C/yr)에 비해 약 63% 줄었다. 특히 2012년은 10년 중 가장 큰 방류량에도 불구하고 2010년까지의 어느 해보다 낮은 플럭스를 기록하였다.



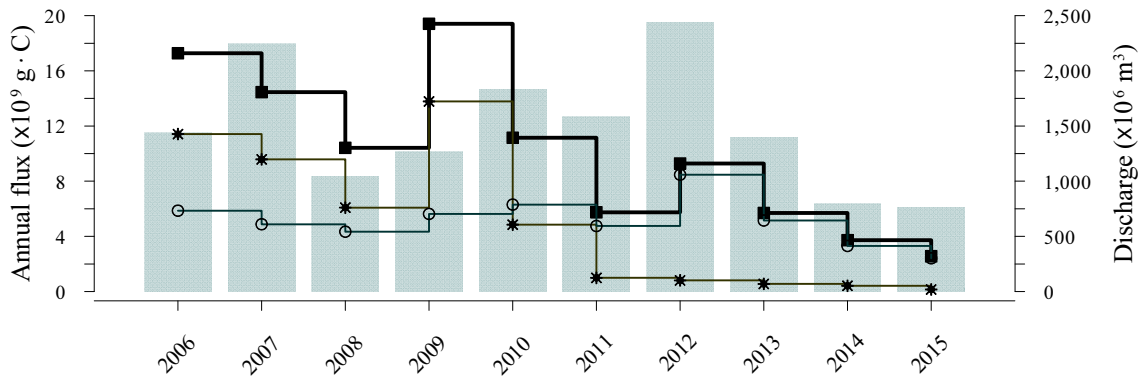


Fig. 9. 10-year variation of TOC (■), POC (\*) and DOC (○) flux measured during 2006 ~ 2015. Bars in figure are discharge data.

2011년 보건설 전후로 TOC 플럭스 변화는 POC 감소에 의한 영향을 크게 반영한 것으로 나타난다. 즉, DOC 플럭스는 보건설 전후로  $5.40 \times 10^9$  g·C/yr에서  $4.82 \times 10^9$  g·C/yr로 약 11% 줄었으나 POC 플럭스는  $9.14 \times 10^9$  g·C/yr에서  $0.58 \times 10^9$  g·C/yr로 무려 94% 급감하는 매우 주목할 만한 결과를 보여준다(Fig. 9). 이것은 보건설 이전에 TOC 플럭스의 63%를 차지했던 POC가 이후에 11%로 준 반면 TOC 플럭스의 89%가 DOC에 의해 이루어지는 극적인 변화다.

POC 동조효과에 따른 TOC 플럭스 감소는 보에 의한 POC 여과가 주원인으로서 바다로 유기물 배출이 줄어든 대신 하상 누적으로 전환된다. 단순 계산으로도 보건설 이후 5년 동안 TOC 플럭스 감소에 상응하는  $9.14 \times 10^9$  g·C, 즉 매년 약  $1.83 \times 10^9$  g·C의 유기물이 하상에 축적되었을 것으로 추정된다. 누적된 유기물은 영산강 본류의 승촌보, 죽산보 및 하구언 정채수역에 분배되었을 것이며, 그 양에 비례하는 수질환경의 지속적인 변화가 예측된다.

#### 4. 결론

영산강 하류 영본D 지점에서 2006년부터 2015년까지 10년 동안 월 2회씩 현장측정(수온, DO 등)과 함께 채수한 시료로부터 SPM, chlorophyll-a, DOC 및 POC를 분석하였다. 수온은 계절변화가 뚜렷한 가운데  $3.0 \sim 33.7^\circ\text{C}$  범위에서 48% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였고, DO 농도는  $4.3 \sim 20.8$  mg·O<sub>2</sub>/L 범위에서 대체로 수온과 반비례하는(Pearson's  $r = 0.65, p < 0.01$ ) 변화를 보였다. chlorophyll-a는 여름과 겨울에 최대 16배 차이가 관측되었으며  $5.8 \sim 94.7$  µg/L 범위에서 약 73%( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였다. SPM은  $5.2 \sim 277.4$  mg/L 범위로 전반적으로 강우량의 영향을 반영하였으며, 보건설 기간(2010~2011) 여름에 가장 농도가 높았고 이후에 평균 17.6 mg/L로 이전 평균(23.7 mg/L) 대비 26% 감소하였다.

DOC 농도는 평균  $3.54 (\pm 1.07)$  mg·C/L ( $0.92 \sim 6.99$  mg·C/L)로 우리나라 4대 하천의 평균과 비슷하였고, 홍수기에 강수에 의한 희석 및 씻김효과에 의한 일시적 감소를 반복하였으나 조사기간 동안 중영양상태( $2 \sim 4$  mg·C/L)의 농도가 유지되었다. POC는  $0.04 \sim 14.10$  mg·C/L (평균  $2.56 \pm 2.47$  mg·C/L) 범위로서 119% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였으며, 2006년 조사를 시작한 이후 지속적으로 감소하여 2015년에 평균  $0.19 (\pm 0.14)$  mg·C/L로 최저를 기록하였다. POC 농도는 특히 보건설을 전후로 이전(2006. 1~2010. 6) 평균  $5.17 (\pm 2.83)$  mg·C/L에서 이후(2011. 12~2015. 12) 평균  $0.27 (\pm 0.22)$  mg·C/L로 무려 94.8% 감소하는 극적인 변화를 보였다. 이는 SPM 조성의 본질적 변화에 따른 것으로서 보건설 전후로 확연히 다른 POC와 SPM 관계, 보건설 후 POC와 chlorophyll-a 관계로부터 보에 의한 영향으로 파악되었다.

TOC는 DOC 및 POC 농도변화와 거동에 따른 존재형태 비의 상대적 크기에 따라 좌우되며, 평균  $6.10 (\pm 3.29)$  mg·C/L,

1.64~18.74 mg·C/L 범위에서 약 54% ( $\sigma_x/\bar{x}$ ) 변동하였다. 보건설 후 TOC 농도는 POC 감소의 영향으로 평균 8.26 ( $\pm 3.32$ ) mg·C/L에서 3.94 ( $\pm 1.18$ ) mg·C/L로 약 52% 줄었고, DOC 대비 POC 비율 역시 공사 전후로 평균 52.9%에서 9.1%로 감소해 DOC가 90.9%를 차지하는 존재형태 비의 극적인 변화가 확인되었다. 영산강하구언 배수관문을 통해 바다로 배출되는 TOC 플럭스를 영본D 지점의 농도와 한국농어촌공사에서 제공하는 월별 방류량으로부터 계산한 결과 10년간 플럭스는 평균  $9.97 (\pm 5.72) \times 10^9$  g·C/yr,  $2.56 \sim 19.41 \times 10^9$  g·C/yr 범위였으며, 2011년 보건설을 기점으로 급격한 감소를 보였다. 보건설 이후 TOC 플럭스 감소는 보에 의한 POC 거름망 효과가 주원인으로 결국 5년 동안 매년 약  $1.83 \times 10^9$  g·C에 해당되는 유기물이 하상에 누적되는 것으로 예측되었다.

## 사 사

본 논문은 2015학년도 목포대학교 교내연구과제 지원에 의하여 연구되었습니다. 지원에 감사드립니다. 아울러 심사를 통해 좋은 의견을 주신 두 분의 심사위원께도 감사의 마음을 전합니다.

## 참고문헌(References)

- Berg, J.A. and R.I.E. Newell, 1986. Temporal and spatial variations in the composition of seston available to the suspension feeder *Crassostrea virginica*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **23**: 375-386.
- Bowszys, M., J.A. Dunalska and B. Jaworska, 2014. Zooplankton response to organic carbon level in lakes of differing trophic states. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, **412**: 10.
- Cho, Y.G. and K.Y. Park, 1998. Heavy metals in surface sediments of the Youngsan Estuary, West Coast of Korea. *J. Environ. Sci.*, **7**(4): 549-557.
- Cole, J.J., Y.T. Prairie, N.F. Caraco, W.H. McDowell, L.J. Tranvik, R.G. Striegl, C.M. Duarte, P. Kortelainen, J.A. Downing, J.J. Middelburg and J. Melack, 2007. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, **10**: 171-184.
- Degens, E.T., 1982. Transport of Carbon and Minerals in Major World River part 1. University of Hamburg, German.
- Eppley, R.W., W.G. Harrison, S.W. Chisholm and E. Stuart, 1977. Particulate organic matter in surface waters off Southern California and its relationship to phytoplankton. *Journal of Marine Research*, **35**: 671-696.
- Hedges, J.I., 1992. Global biogeochemical cycles: progress and problems. *Mar. chem.*, **39**: 67-93.
- Hope, D., M.F. Billett and M.S. Cresser, 1994. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environ. pollu.*, **84**(3): 301-324.
- Jang, C.W., J.K. Kim, D.H. Kim, B.C. Kim and J.H. Park, 2008. The Distribution of Organic Carbon and its Decomposition Rate in the Kum River, Korea. *J. Korean Soc. Water Environ.*, **24**(2): 174-179.
- Jeong, B.K., Y.J. Kim, S.W. Jung, H.Y. Lee and Y.S. Shin, 2014. Original article : temporal variation and identification of a centric diatom, *stephanodiscus* spp. during winter-spring blooms in the Yeongsan River. *Korean J. limnol.*, **47**(4): 273-281.
- Jung, S.J., D.J. Lee, K.S. Hwang, K.H. Lee, K.C. Choi, S.S. Im, Y.H. Lee, J.Y. Lee and B.J. Lim, 2012. Evaluation of pollutant characteristics in Yeongsan River using multivariate analysis. *Korean J. limnol.*, **45**(4): 368-377.
- Kang, S.A. and K.G. An, 2006. Spatio-temporal variation analysis of physico-chemical water quality in the Yeongsan-River watershed. *Korean J. Limnol.*, **39**(1): 73-84.
- Kim, B.C., S.M. Jung, C.W. Jang and J.K. Kim, 2007. Comparison of BOD, COD and TOC as the indicator of organic

- matter pollution in streams and reservoirs of Korea. *J. Kor. Soc. of Environ. Eng.*, **29**(6): 640-643.
- Kim, J.K., M.S. Shin, C.W. Jang, S.M. Jung and B.C. Kim, 2007. Comparison of TOC and DOC distribution and the oxidation efficiency of BOD and COD in several reservoirs and rivers in the Han River system. *J. Korean Soc. on Water Quality*, **23**(1): 72-80.
- Kim, K.S. and N.I. Lee, 2003. Estimation of pollution loads flowing into Mokpo harbour - centering on pollution loads from land in dry case -. *J. Korean Soc. for Marine Environ. and Energy*, **6**(1): 11-20.
- Kim, K.Y., B.C. Kim, J.S. Eom, Y.S. Choi, C.W. Jang and H.K. Park, 2009. The distribution of POC and DOC in four reservoirs on the North Han River and the relationship with algal density. *J. Korean Soc. Water Environ.*, **25**(6): 840-848.
- Kim, T.W. and K.I. Gil, 2011. Runoff characteristics of refractory organic matters from Kyongan River Watershed during rainfall event and dry season. *J. Korean Soc. Water Environ.*, **27**(4): 397-404.
- Ko, D.G., J.W. Choi, B.J. Lim, J.H. Park, and K.G. An, 2012. Fish distribution, compositions and community structure characteristics during Juksan-Weir construction in Yeongsan River Watershed. *Kor. J. Env. Eco.*, **26**(6): 892-901.
- Kwon, K.Y., C.H. Moon, C.K. Kang and Y.N. Kim, 2002. Distribution of particulate organic matters along the salinity gradients in the Seomjin River Estuary. *J. Korean Fish. Soc.*, **35**(1): 86-96.
- Lee, J.H., J.H. Han, B.J. Lim, J.H. Park, J.K. Shin and K.G. An, 2013. Comparative analysis of fish fauna and community structures before and after the artificial weir construction in the mainstreams and tributaries of Yeongsan River Watershed. *Korean j. Eco. and env.*, **46**(1): 103-115.
- Lee, K.Y., J.E. Kim, K.C. Lee, K.L. Lee, I.J. Lee and T.H. Im, 2013. Characteristics of changes in DOC concentration according to concentrations of organic matter and suspended solids in the Nakdong River. *J. Korean Soc. Water Environ.*, **29**(4): 540-550.
- Lim, H.S. and K.Y. Park, 1998. Community structure of the macrobenthos in the soft bottom of Yongsan River Estuary, Korea 2. The occurrence of summer hypoxia and benthic community. *J. Korean Fish. Soc.*, **31**(3): 343-352.
- Ludwing, W., J.L. Probst and S. Kempe, 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**: 23-41.
- Malcolm, R.L., 1990. The uniqueness of humic substances in each of soil, stream and marine environments. *Analytica Chimica Acta*, **232**: 19-30.
- Meybeck, M., 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world river. *Am. J. Sci.*, **282**(4): 401-450.
- MLTM (Ministry of land, transport, and maritime affairs), 2010. Suspended Particulate Matter and chlorophyll.
- Oh, S.J., S.H. Woo, J. Hur, M.S. Jung and H.S. Shin, 2009. Changes in Dissolved Organic Matter Composition in the Namhan River during a Heavy Rain Event. *J. Korean Soc. Water Environ.*, **25**(5): 697-703.
- Opsahl, S. and R. Benner, 1997. Distribution and cycling of terrigenous dissolved organic matter in the ocean. *Nature*, **386**(6624): 480.
- Park, C.S. and K.G. An, 2014. Fish Passage Assessments in the Fishway of Juksan Weir Constructed in the Downstream Area of Youngsan-River Watershed. *J. Environ. sci. international*, **23**(8): 1513-1522.
- Park, J.K., E.S. Kim, K.T. Kim, S.R. Cho and Y.C. Park, 2006. Organic carbon behavior and distribution in the MankyongRiver Estuary. *J. Kor. soc. Mar. Environ. Eng.*, **9**(3): 131-140.
- Parks, S.J. and L.A. Baker, 1997. Sources and transport of organic carbon in an Arizona River-Reservoir system. *Water Research*, **31**(7): 1751-1759.
- Ryu, D.K., S.D. Bae, J.Y. Jang, J.C. Park and J.K. Ryu, 2006. A study on the Water quality indicators of total maximum daily load management in Nakdong River -focused TOC organic-. *Korean Soc. of Water Quality*, 1181-1188.
- Seong, J.U. and J.C. Park, 2012. Effects of sewage effluent on organic matters of Nakdong River: comparison of daily loading. *Kor. j. limnol.*, **45**(2): 210-217.
- Shin, S.E., S.T. Youn, Y.K. Koh and K.H. Oh, 2015. The geochemical characteristics and environmental changes of surface

- sediments in Yeongsan River Area. J. the Korean Geomorphological Association, **22**(3): 31-42.
- Son, M.S., J.H. Park, C.H. Lim, S.K. Kim and B.J. Lim, 2013. Seasonal change of phytoplankton community and water quality in Yeongsan River Watershed. Korean J. Environ. Biol., **31**(2): 105-112.
- Song, J.J., B.B. Kim and Y.J. Le, 2015. Water quality change with submerged weir of Yeongsan River. J. of Korean Soc. of Environ. Technology, **16**(1): 64-70.
- Thurman, E.M., 1983. Multidisciplinary research-an experiment. Environ. Sci. Technol., **17**(11): 511-511.
- Thurman, E.M., 1985. Organic geochemistry of natural waters. Martinus Nijhoff, Dr.W. Junk Publishers, Dordrecht, 497.
- Yang, H.G. and H.C. Choi, 2003. Estimation of water quality environment in Youngsan and Seumjin River Basins. J. the Korean Geographical Soc., **38**(1): 19-31.
- Yi, H.H., Y.S. Shin, S.R. Yang, N.I. Chang and D.H. Kim, 2007. Size-structure and primary productivity of phytoplankton from major lakes in Sumjin and Yeongsan Watershed. Korean J. limnol., **40**(3) 419-430.
- Youn, S.T., Y.K. Koh, K.H. Oh, B.C. Moon and H.G. Kim, 2003. Water quality assesment of the lower Yeongsan River system. J. environ. impact assessment, **12**(4): 259-270.
- Zweifel, U. L., J. Wikner, Å. Hagström, E. Lundberg and B. Norrman, 1995. Dynamics of dissolved organic carbon in a coastal ecosystem. Limnology and Oceanography, **40**(2):299-305.