

〈Original article〉

수질측정망을 이용한 국내 대하천 하구를 통한 총유기탄소 유출량 산정과 비교

박 형 근 · 옥 기 영*

국립생태원 생태기반연구실

Estimation of the Total Terrestrial Organic Carbon Flux of Large Rivers in Korea using the National Water Quality Monitoring System

Hyung-Geun Park and Giyoung Ock*

Division of Basic Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea

Abstract - Rivers continuously transport terrestrial organic carbon matter to the estuary and the ocean, and they play a critical role in productivity and biodiversity in the marine ecosystem as well as the global carbon cycle. The amount of terrestrial organic carbon transporting from the rivers to ocean is an essential piece of information, not only for the marine ecosystem management but also the carbon budget within catchment. However, this phenomenon is still not well understood. Most large rivers in Korea have a well-established national monitoring system of the river flow and the TOC (Total Organic Carbon) concentration from the mountain to the river mouth, which are fundamental for estimating the amount of the TOC flux. We estimated the flux of the total terrestrial organic carbon of five large rivers which flow out to the Yellow Sea, using the data of the national monitoring system (the monthly mean TOC concentration and the monthly runoff of river flow). We quantified the annual TOC flux of the five rivers, showing their results in the following order: the Han River ($18.0 \times 10^9 \text{ gC yr}^{-1}$) >> Geum River ($5.9 \times 10^9 \text{ gC yr}^{-1}$) > Yeongsan River ($2.6 \times 10^9 \text{ gC yr}^{-1}$) > Sumjin River ($2.0 \times 10^9 \text{ gC yr}^{-1}$) >> Tamjin River ($0.2 \times 10^9 \text{ gC yr}^{-1}$). The amount of the Han River, which is the highest in the Korean rivers, corresponds to be 4% of the annual total TOC flux of in the Yellow River, and moreover, to be 0.6% of Yangtze River.

Keywords : TOC flux, organic carbon, river, national monitoring system

서 론

강과 하천은 산림과 바다를 연결하는 통로로서, 육상에
서 생산된 유기물을 강 하구를 거쳐 끊임없이 해양으로 이

동시키고 있다(Schlesinger and Melack 1981; Meybeck and
Vörösmarty 1999). 특히, 해양으로 공급된 육상의 유기탄소
는 생지화학적 과정을 거쳐 기수역과 연안에서 갯벌의 높은
일차생산성과 생물다양성을 유지하는 중요한 에너지를 제
공한다(Hedges *et al.* 1986, 1997). 전 세계적으로 연안퇴적
물에 포함된 총유기탄소의 무려 44%에 해당하는 양이 육상
에서 공급되고 있다고 보고될 만큼 연안생태계에서 하천 유

* Corresponding author: Giyoung Ock, Tel. 041-950-5987,
Fax. 041-950-5953, E-mail. ockgy@nie.re.kr

기탄소가 차지하는 역할은 결코 작다고 할 수 없다(Schlünz and Schneider 2000). 또한 기후변화로 인해 증가하는 대기의 이산화탄소가 육상과 해양에서 소모되거나 배출되는 탄소순환의 흐름을 정량적으로 이해하기 위하여, 전 지구적인 규모에서 하구에서 해양으로 유출되는 유기탄소의 이동량이 차지하는 비율을 파악하는 것이 필요하다(Oh 2016). 따라서, 최근 기후변화와 다양한 인간활동(토지이용 변화 등)에 의해 해양으로 공급되는 하천 유기탄소의 이동량을 정확하게 정량화하고, 전 지구적 규모에서 또는 대륙별, 국가별로 주요 하천의 공간적인 변화 특성을 파악하려는 과학자들의 관심과 노력이 증가하고 있다(Cole *et al.* 2007; Li *et al.* 2017).

일반적으로 유기물에 포함된 탄소는 수체 내에서의 성상에 따라 용존성 유기탄소(Dissolved organic carbon; DOC < 0.45 μm)와 입자성 유기탄소(Particulate organic carbon; POC > 0.45 μm)로 구분되며, 이 두가지 형태의 총합을 총 유기탄소(Total organic carbon; TOC)라고 한다. 지구 규모의 탄소순환 연구에서 제시하는 육상 유기탄소의 성상별 이동량은 적용 모델과 연구방법에 따라 큰 차이를 보인다. Probst *et al.* (1994)은 매년 세계의 강을 통해 약 $0.40 \times 10^{15} \text{ gC yr}^{-1}$ (DOC $0.22 \times 10^{15} \text{ gC yr}^{-1}$ + POC $0.18 \times 10^{15} \text{ gC yr}^{-1}$)가 바다로 유출되고 있다고 추정했으며, 다른 연구에서는 $0.4 \sim 0.9 \times 10^{15} \text{ gC yr}^{-1}$ 범위를 제시하였다(Hope *et al.* 1994; Cole *et al.* 2007). 아시아 대륙에서는 특히 유역면적이 큰 중국의 연구결과가 보고되고 있는데, Wang *et al.* (2012)의 연구에 따르면 2009년 기준 양쯔강(Yangtze River)은 $3.1 \times 10^{12} \text{ gC yr}^{-1}$ 의 총유기탄소를 황해(Yellow Sea)로 흘러보냈으며, 황하강(Yellow River)은 상대적으로 적은 $0.43 \sim 0.47 \times 10^{12} \text{ gC yr}^{-1}$ 를 보하이만(Bohai Bay)으로 공급하고 있다고 조사되었다(Ran *et al.* 2013).

이에 반하여, 국내 하천의 유기탄소 유출량 연구는 주로 산림소유역을 대상으로 강우와 토지이용에 따른 관계를 파악하고자 하는 연구가 수행되었다(Jung *et al.* 2012, 2015). 그리고, Oh (2016)는 우리나라 5대강의 유역 총면적과 총 유출량을 이용하여, 국가 규모에서 바다로 유출되는 총유기탄소의 총량이 $119 \times 10^9 \text{ gC yr}^{-1}$ 에 달한다고 추정하였다. 그렇지만, 아직까지 국내연구에서는 유역규모에서 주요 하천에서 해양으로 유출되는 유기탄소의 이동량을 정량한 연구는 매우 미비하기 때문에, 다른 나라의 주요 하천과 비교해서 우리나라의 유출량이 어느 정도에 해당하는지를 파악할 수 있는 자료 또한 한정적이다.

우리나라는 국가차원에서 중권역 이상의 하천을 대상으로 수질·유량 측정망 시스템이 잘 갖춰져 있기 때문에, 강 하구에서 측정되는 TOC 농도와 하천 유량 모니터링 자료를

이용하여 TOC 유출량을 연구할 수 있는 기반이 마련되었다고 할 수 있지만, 아직까지 이러한 국가 측정망 시스템에 기반한 유기탄소 이동량 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 우선 강과 해양 생태계를 연결하는 육상 유기탄소의 국내외 연구 동향을 분석하여 현재 우리나라의 관련 연구 현황을 파악하였다. 그리고 국가 수질·유량 측정망에서 생산된 자료를 활용하여 우리나라 서남해로 유출되는 주요 5개 강(한강, 금강, 영산강, 섬진강, 탐진강)의 총유기탄소 유출량을 산정하였다. 마지막으로, 우리가 산출한 국내 주요 강들의 결과를 황해를 공유하고 있는 중국 대륙의 황하강과 양쯔강의 연구사례와 비교하여, 국내 주요 하천의 총유기탄소 유출량의 정도를 파악하였다.

연구 방법

1. 강-해양 유기탄소 이동 연구동향 분석

SCOPUS 학술검색시스템을 이용하여 2000년 이후 현재까지 출판된 연구논문을 대상으로, 키워드 검색을 수행하였다. 우선 대상물질인 유기물(organic matter)과 유기탄소(organic carbon)를 주제로 선정하고, 이 가운데 강에서 바다로 이동하는 연구로 한정하기 위하여 하천(river)과 해양(ocean)을 추가하여 검색하였다. 그리고 이 검색 결과를 연도별, 국가별로 분석하였다.

2. 국가 수질·유량 측정망 자료를 이용한 총유기탄소 유출량 산정

국내에서 황해와 남해로 흐르는 한강, 금강, 영산강, 섬진강, 탐진강 등 5개 주요 하천을 대상하천으로 선정하였다. 연간 총유기탄소 유출량(TOC flux, F_{TOC})은 다음과 같은 Johnes (2007)의 식을 이용하여 월별로 산정된 총유기탄소 유출량을 합산하여 계산하였다.

$$F_{TOC} = K \left(\sum_{i=1}^{12} \frac{C_i}{n} \right) \left(\sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i}{n} \right) \quad (1)$$

여기서 C_i 는 각 측정값에 대한 월평균 TOC 농도(monthly mean TOC concentration, gCL^{-1})이며, Q_i 는 월유량(monthly flow rate, $\text{m}^3 \text{mon}^{-1}$), K 는 환산계수(conversion factor of period)이다.

월별 TOC농도(C_i) 자료는 환경부 물환경정보시스템(Water Information System, <http://water.nier.go.kr>)에서 제공하는 국가수질측정망의 최하류 지점(한강 ‘행주’ 지점, 금강 ‘강령’ 지점, 영산강 ‘함평’ 지점, 섬진강 ‘하동’ 지점, 탐진강

‘군동’ 지점)의 2016년도 측정자료를 이용하였다. 비록 열린 하구를 가진 한강, 섬진강, 탐진강에서 선정된 행주, 하동, 군동 측정점이 일부 만조의 영향을 받을 가능성이 있지만, 상류역의 특성을 종합적으로 반영하기 위하여 유역의 최하류 측정점을 선정하였다.

월유량 (Q_i) 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (Water Resources Management Information System, www.wamis.go.kr)에서 제공하는 강 하구 지점의 장기 유출 자료를 활용하였다. 이는 유역의 강우량을 기준으로 하는 자연유량으로서, 강 하구까지의 여정에서 합류되는 모든 지류의 유량을 손실없이 포함하고, 조수의 영향을 받지 않는다. 본 연구에서 월유량 값은 시스템에서 제공하는 최근 5년간(2010~2014)의 자료를 평균하여 대표값으로 활용하였다.

3. 총유기탄소 농도 실측분석

본 연구에서는 탐진강 군동지점을 대상으로 2016년 8월, 9월, 12월의 3회에 걸쳐 현장에서 물시료를 직접 채수하여 DOC와 POC로 구분하여 농도를 측정하였다. DOC 농도는 GF/F 여과지로 갑압 여과한 시료를 국립생태원의 총유기탄소분석기(TOC-L, Shimadzu, Japan)로 측정하였고, POC 농도는 GF/F 여과지에 걸러진 시료를 한양대학교 공동기기센터의 원소분석기(Euro vector, GV instrument, Italy)로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 강-해양 유기탄소 이동 연구동향

2000년에서 2016년까지 출판된 논문자료 (articles)를 전문 학술검색시스템으로 추출한 결과, 총 56개 국가에서 모두 548개의 논문이 조사되었다. 연도별로는 2000년 이후 매년 10여 편의 논문이 유지되다가, 2006년 이후 30여 편으로 급

증하였다. 그리고 2011년 이후 40편 이상으로 증가세가 두드러졌으며 2016년에는 62편으로 최다 연구성과를 기록하였다 (Fig. 2A).

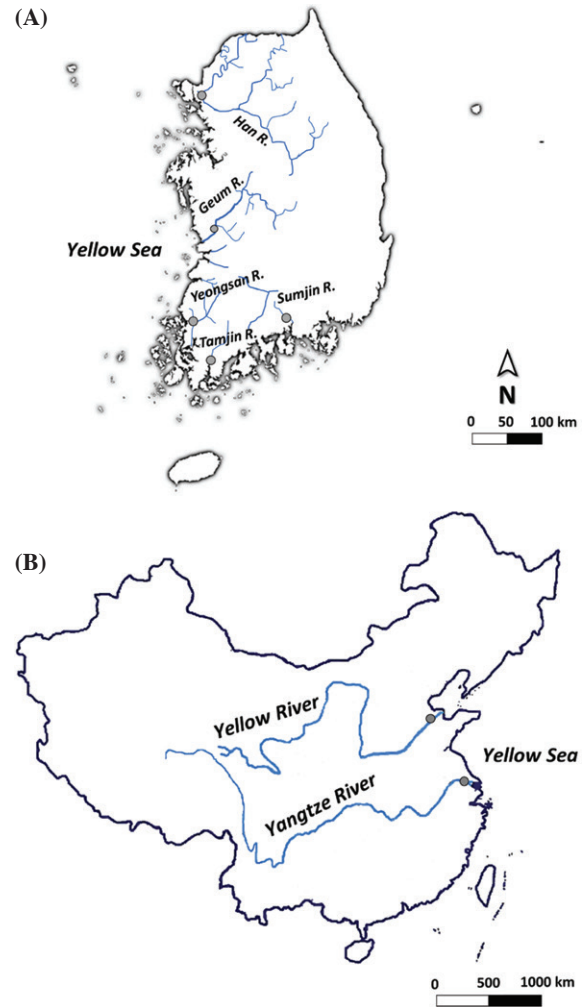


Fig. 1. A map showing Korea and China's rivers flowing into the Yellow Sea.

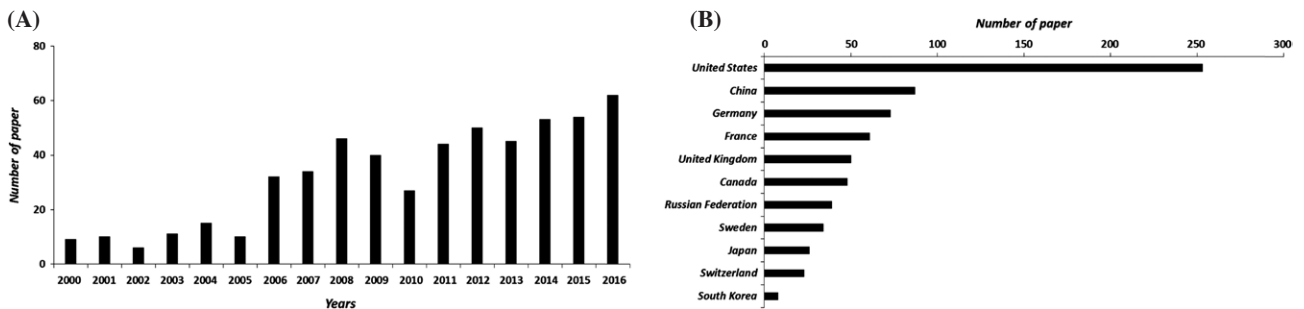


Fig. 2. Number of papers published since 2000 in relation to the organic matter and organic carbon flowing from river to ocean.

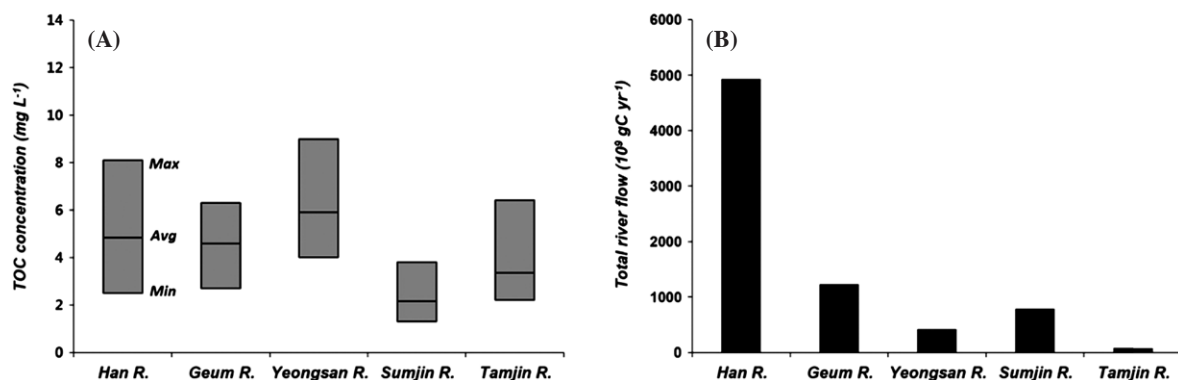


Fig. 3. Comparison of annual TOC concentration and river outflow in 2016 among the rivers included in the study.

Table 1. Basin properties of target study rivers in Korea and China.

	River	Basin area (km ²)	Channel length (km)	Total rainfall (mm yr ⁻¹)	River outflow (m ³ s ⁻¹)
South Korea ^a	Han R.	34,428	494	1,360	950
	Geum R.	9,914	394	1,310	237
	Yeongsan R.	3,469	138	1,414	80
	Sumjin R.	4,914	223	1,546	152
	Tamjin R.	505	55	1,525	14
China	Yellow R. ^b	752,000	5,464	436	2,571
	Yangtze R. ^c	1,808,000	6,357	1,067	30,166

Source from ^aWAMIS Korea (Water Resources management information system), ^bZhang *et al.* 2005a, and ^cZhang *et al.* 2005b

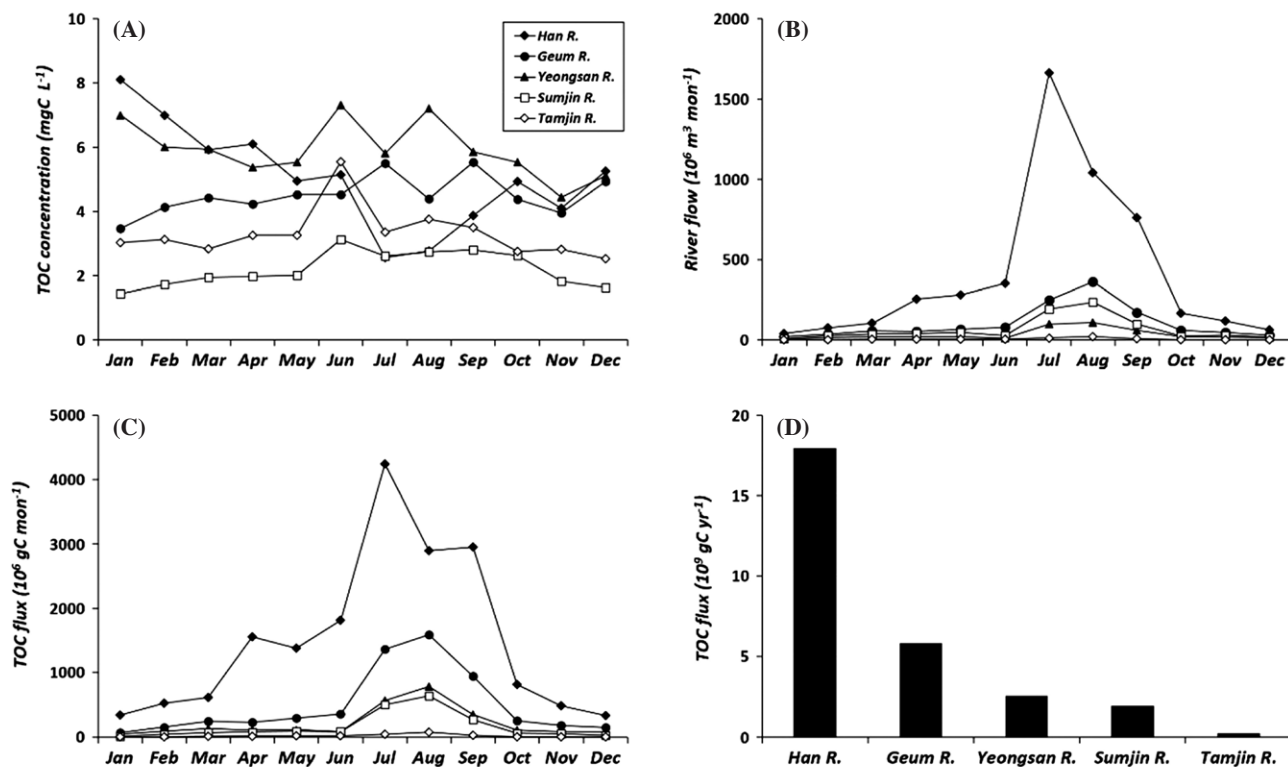


Fig. 4. Monthly distribution of TOC concentration (A), river outflow (B), TOC flux (C) and estimated results of annual TOC flux (D) in the rivers included in the study.

국가별로는 미국이 전체 연구의 46%를 차지할 정도로 연구를 주도하고 있으며, 다음으로 중국이 16%로 아시아에서 가장 많은 연구성과를 보인 것은 주목할 만하다고 할 수 있다. 그리고 독일, 프랑스, 영국, 캐나다 순으로 선진국을 중심으로 많은 연구가 이루어졌다(Fig. 2B). 이는 대륙과 바다를 연결하는 대하천의 생태학적 역할에 대한 집중적인 연구가 미국을 포함한 선진국을 중심으로 이루어지고 있고, 중국은 황하강과 양쯔강과 같은 대하천 연구에 국가적으로 연구투자가 집중돼왔음을 알 수 있다. 우리나라는 전체의 22번째 1.5%에 해당하는 연구를 기록하는 등 아직까지 관련 연구가 제한적이며 앞으로 보다 많은 연구가 필요하다는 것을 시사하고 있다.

2. 국가측정망 자료를 이용한 하천 유기탄소의 유출량 산정

환경부 수질측정망의 강 하구에서 관측된 2016년 평균 TOC 농도를 분석한 결과 영산강($5.9 \pm 1.2 \text{ mgCL}^{-1}$) > 한강($4.9 \pm 1.5 \text{ mgCL}^{-1}$) > 금강($4.6 \pm 0.8 \text{ mgCL}^{-1}$) >> 탐진강($3.3 \pm 0.9 \text{ mgCL}^{-1}$) > 섬진강($2.2 \pm 0.7 \text{ mgCL}^{-1}$) 순으로 나타났다(Fig. 3A). 특히 한강($2.5 \sim 8.1 \text{ mgCL}^{-1}$)과 영산강($4.0 \sim 9.0 \text{ mgCL}^{-1}$)은 연중 농도변화 범위가 금강($2.7 \sim 6.3 \text{ mgCL}^{-1}$)과 섬진강($1.3 \sim 3.8 \text{ mgCL}^{-1}$)에 비해 상대적으로 크게 나타났다.

강 하구를 통해 바다로 흘러나간 하천의 총유량은 한강($4,927 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$) > 금강($1,230 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$) > 섬진강($786 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$) > 영산강($417 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$) > 탐진강($71 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$)으로서, 한강의 유량이 금강보다 4배 이상 많았으며(Fig. 3B), 대체적으로 각 하천의 유역면적의 크기(Table 1)와 비례하였다.

계절적 변이를 파악하기 위하여 2016년의 월평균 TOC 농도를 살펴본 결과, 섬진강, 탐진강, 영산강, 금강에서는 여름철(7~8월)에 높고 겨울철(11~2월)에 낮았으며, 한강 하구에서는 반대로 겨울(1월)에 가장 높고 오히려 여름철(7~9월)에 낮아지는 차별화된 결과를 보였다. 국토교통부 유량 측정망에서 산출된 하천 하구의 월유량 분포는 7~9월에 집중호우로 인하여 높은 유량을 보이다가, 10월에서 이듬해 3월까지 급감하는 등 연중 하천 유량은 몬순기후대의 강우특성을 반영하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 4B). 상기의 월별 TOC 농도와 하천 유량 자료를 이용하여 각 하천 하구에서 유출되는 유기탄소의 월간 TOC 유출량(monthly TOC flux)을 산정한 결과는 Table 2와 Fig. 4C에 나타내었다. 한강에서는 7월 TOC 유출량이 급증하면서 $4.2 \times 10^{12} \text{ gC mon}^{-1}$ 의 최대값을 기록하는 등 여름철(7~9월)의 홍수기에 한강 총 유

Table 2. Monthly distribution of the TOC (total organic carbon) concentration (C), river outflow (Q) and TOC flux (F) in the study rivers in 2016.

Rivers	Factors	Annual values													
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
Han River	C(mgCL ⁻¹)	8.1	7.0	5.9	6.1	5.0	5.1	2.6	2.8	3.9	4.9	4.1	5.3	Mean(mgCL ⁻¹)	5.1±1.6
	Q(10 ⁶ m ³ mon ⁻¹)	42.0	75.5	104.5	255.7	279.4	353.3	1662.0	1042.5	762.7	166.8	119.1	63.8	Sum(10 ⁶ m ³ yr ⁻¹)	4,927
	F(10 ⁹ gCmon ⁻¹)	340.2	528.2	618.9	1559.6	1383.1	1816.1	4238.0	2892.8	2949.0	821.3	488.2	335.0	Sum(10 ⁹ gCyr ⁻¹)	17.9
Geum River	C	3.5	4.1	4.4	4.2	4.5	4.5	5.5	4.4	5.5	4.4	4.0	4.9	Mean	4.5±0.6
	Q	20.7	37.5	56.2	54.5	65.2	78.8	248.2	361.0	172.1	58.7	46.5	30.5	Sum	1,229
	F	71.8	154.8	248.7	230.3	295.2	356.4	1364.9	1588.3	950.7	256.9	184.1	150.4	Sum	5.9
Yeongsan River	C	7.0	6.0	5.9	5.4	5.5	7.3	5.8	7.2	5.9	5.5	4.4	5.1	Mean	5.9±0.9
	Q	6.3	15.5	22.0	20.4	20.7	11.2	98.2	109.7	59.6	19.6	19.0	15.0	Sum	417
	F	44.0	92.7	130.9	109.5	114.5	82.1	569.6	789.5	348.5	108.4	84.5	76.7	Sum	2.6
Sumjin River	C	1.4	1.7	1.9	2.0	2.0	3.1	2.6	2.7	2.8	2.6	1.8	1.6	Mean	2.2±0.5
	Q	7.7	26.8	36.9	41.5	47.6	27.8	194.4	234.3	97.5	23.5	29.7	18.0	Sum	786
	F	11.1	46.3	71.6	81.9	95.1	87.1	505.4	640.5	273.1	61.7	54.0	29.3	Sum	2.0
Tamjin River	C	3.0	3.1	2.8	3.3	3.3	5.5	3.4	3.8	3.5	2.8	2.8	2.5	Mean	3.3±0.8
	Q	0.8	2.8	4.1	5.4	5.8	3.5	12.7	20.6	9.0	1.6	2.7	2.0	Sum	71
	F	2.4	8.6	11.7	17.6	18.9	19.2	42.7	77.3	31.4	4.5	7.5	5.1	Sum	0.2

Table 3. TOC concentrations of Tamjin River (Gundong Station) derived from the national monitoring data and measured data in the present study.

Sampling month	National monitoring data	In situ measurement in the study		
	TOC ¹ conc. (mgCL ⁻¹)	DOC ² conc. (mgCL ⁻¹)	POC ³ conc. (mgCL ⁻¹)	TOC (DOC + POC) conc. (mgCL ⁻¹)
Aug. 2016	4.6	2.4 (86%)	0.4 (14%)	2.8
Sep. 2016	3.5	1.6 (76%)	0.5 (24%)	2.1
Dec. 2016	2.5	1.3 (81%)	0.3 (19%)	1.6

¹Total organic carbon, ²Dissolved organic carbon, ³Particulate organic carbon

Table 4. Annual TOC (total organic carbon) flux estimated in the rivers in South Korea and China as well as the continental scale.

River	Mean flow discharge (m ³ s ⁻¹)	TOC flux (10 ⁹ gC yr ⁻¹)	Reference
South Korea			
Han River	950	18.0	This study
Geum River	237	5.9	
Yeongsan River	81	2.6	
Sumjin River	152	2.0	
Tamjin River	14	0.2	
China			
Yangtze River	24,700	3,100	Wang <i>et al.</i> 2012
Yellow River	420	421	Wang <i>et al.</i> 2012
	788	470	Ran <i>et al.</i> 2013
Continents			
Asia	446,157	164,000	Li <i>et al.</i> 2017
Africa	120,497	59,600	
Europe	84,982	48,400	
North America	184,551	91,700	
South America	365,931	96,500	
Oceania	19,343	21,800	

출량의 56%에 해당하는 10×10^{12} gC의 유기탄소가 집중적으로 황해로 유출되었다. 금강, 영산강, 섬진강, 탐진강의 다른 강들도 유출량의 크기는 다르지만, 월별 경향성은 유사하게 나타났다(Fig. 4C). 즉, 국내 서남해안 5대강의 TOC 유출량의 시간적인 변화는 하천 유량분포와 유사한 변동추이를 보이며, 이는 우리나라 강의 유기탄소 유출특성은 TOC 농도보다는 유량의 크기에 더 민감하게 영향을 받고 있다는 것을 시사한다.

마지막 단계에서, 이러한 월간 TOC 유출량 값을 합산하여 산출된 각 하천의 연간 TOC 유출량은 Table 2와 Fig. 4D에 나타내었다. 한강이 18.0×10^9 gC yr⁻¹로 가장 높은 값을 나타냈으며, 다음으로는 금강(5.9×10^9 gC yr⁻¹), 영산강(2.6×10^9 gC yr⁻¹), 섬진강(2.0×10^6 gC yr⁻¹), 그리고 탐진강(0.2×10^9 gC yr⁻¹) 순으로 높게 나타났다.

수질측정망에서 계측된 TOC 농도는 채수된 시료의 입자 크기를 구분하지 않고 한 개의 시료를 이용하여 분석하기 때문에, 결과값에서 DOC와 POC를 구분할 수 없는 한계가 있다. 탐진강 군동 지점을 대상으로 DOC와 POC로 구분하여 농도를 실측한 결과는 Table 3에서와 같이 DOC는 81±

5%, POC는 19±5%를 차지하고 있었다. 이는 탐진강 유기탄소의 대부분이 DOC의 형태로 바다로 유출되고 있다는 것을 보여주고 있다. 그리고, 비록 해당 3개월의 수질측정망의 평균 TOC 농도는 2.5~4.6 mg L⁻¹, 실측값은 평균 1.6~2.8 mg L⁻¹로서 약 30% 정도의 차이를 보였지만, 조사일과 분석방법의 차이에서 기인한 것으로 보인다. 본 연구에서는 DOC와 POC의 비율을 확인하기 위한 것으로 금번 연구에서는 이러한 차이에 대한 구체적인 분석은 수행하지 않았다.

3. 중국 대하천의 총유기탄소 유출량 비교

우리나라와 황해를 공유하는 중국의 대하천의 일 총유기탄소 유출량과 연간 총유기탄소 유출량을 조사하였다. 일 총유기탄소 유출량 기준으로 중국 북부의 황하강과 중부의 양쯔강은 각각 $8.5 \sim 39.7 \times 10^9$ gC d⁻¹과 $1.2 \sim 17.3 \times 10^9$ gC d⁻¹의 범위를 기록하였으며(Ran *et al.* 2013; Fu *et al.* 2014), 이수치는 국내 하천 중 가장 유출량이 높은 한강(49×10^6 gC d⁻¹)의 약 23~809배에 해당한다. 이러한 중국의 대하천들이 상대적으로 작은 강수량에도 불구하고 큰 유기탄소 유출

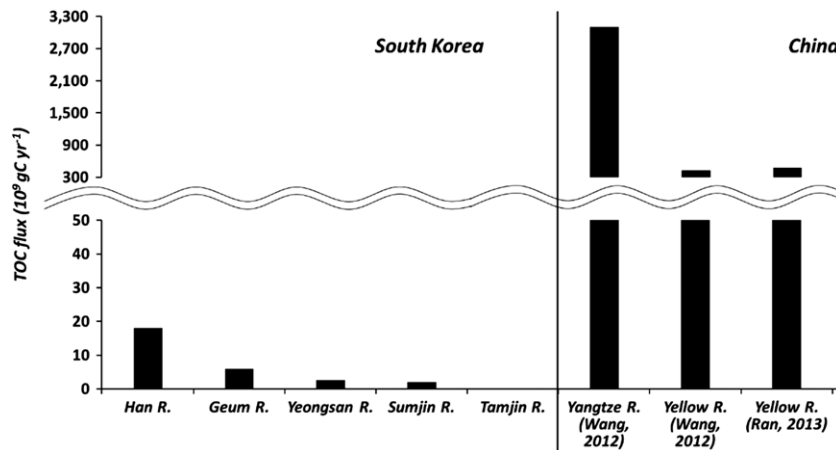


Fig. 5. Comparison of annual TOC fluxes of Korean rivers with those of Chinese rivers.

량을 나타내는 것은 토지이용 특성, 하상경사, 토양 유출량의 차이와 같은 환경요인도 있겠지만, 황하강과 양쯔강의 집수역 면적이 한강유역의 각각 22배와 53배에 해당할 정도로 크기 때문에 판단된다(Table 1). 연간 총유기탄소 유출량을 기준으로 하면, 양쯔강은 3.1×10^{12} gC yr⁻¹의 양을 황해로, 그리고 황하강은 상대적으로 적은 $0.42 \sim 0.47 \times 10^{12}$ gC yr⁻¹을 황해 보하이만으로 공급하고 있다(Wang *et al.* 2012; Ran *et al.* 2013). 이와 비교하면, 한강은 황하강의 3.8~4.3%, 양쯔강의 0.6%에 해당하며, 본 조사에서 산출된 5대강에서 유출되는 총유기탄소량을 모두 더한다 하더라도 양쯔강에서 황해로 이동하는 총량의 1%에도 못 미치는 탄소가 우리나라 강을 통해 황해로 공급되고 있다. 중국은 최근 토사 이동이 감소되고 있는 추세를 보이지만, 국내 하천에 비해서는 여전히 큰 규모의 탄소 유출량을 보이는 것으로 나타났다(Ran *et al.* 2013).

대륙별 총유기탄소 유출량(Li *et al.* 2017)을 보면, 지구 전체 TOC 유출량의 약 34%에 해당하는 0.16×10^{15} gC yr⁻¹ 유기탄소가 아시아에서 공급되고 있으며, 이는 남미(20%), 북미(19%), 아프리카(12%), 유럽(10%), 오세아니아(5%) 대륙과 비교해서 가장 많은 양에 해당한다(Table 4). 특히 아시아는 DOC 유출량이 더 높게 나타났는데, 이는 DOC 유출량에 영향을 미치는 배수 강도와 높은 유역경사, 그리고 상대적으로 풍부한 토양 유기탄소량이 주요 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다(Ramkumar *et al.* 2015; Li *et al.* 2017).

적 요

본 연구에서는 국가 수질·유량 측정망을 통해 생산된 모

니터링 자료를 이용하여 서남해로 유출되는 우리나라의 한강, 금강, 영산강, 섬진강, 탐진강을 대상으로 총유기탄소의 연간 유출량을 정량하여 비교하였으며, 이를 황해를 공유하는 중국의 양쯔강과 황하강의 탄소 유출량과 비교하였다. TOC 농도는 환경부 물환경정보시스템에서 제공하는 하구 지점의 주단위 자료를 ‘월평균 TOC 농도’로 전환했으며, 유량자료는 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 장기유출 월유량자료를 활용하여, 월간 TOC flux를 산정한 뒤, 최종적으로 이를 합산하여 강 하구에서 바다로 유출되는 연간 TOC flux를 산출하였다. 월간 TOC flux는 모든 강에서 여름철의 유출량이 높았으며, 겨울철에 낮게 나타났다. 이는 우리나라 강의 유기탄소 유출 특성이 아시아 몬순 기후의 강우패턴의 영향을 크게 받고 있다는 것을 의미한다. 연간 TOC flux 산정결과에 따르면, 한강은 18.0×10^9 gC yr⁻¹로서 가장 높은 유기탄소 유출량을 기록했으며, 금강은 한강의 1/3 수준으로 5.9×10^9 gC yr⁻¹, 영산강과 섬진강은 각각 2.6×10^9 gC yr⁻¹과 2.0×10^9 gC yr⁻¹을 기록했으며, 유역규모가 가장 작은 탐진강은 0.2×10^9 gC yr⁻¹로서 한강의 1/90이었다. 본 연구에서 정량한 우리나라 주요 강의 월별 그리고 연간 총유기탄소 유출량의 결과값들은 황해를 공유하는 중국의 대하천들과 비교할 수 있는 국내 대표 자료를 제공할 수 있다. 국내 최대 유기탄소 유출량을 보이는 한강은 중국 황하강에서 유출되는 유기탄소량의 약 4%에 해당하며, 양쯔강과 비교하면 0.6% 정도의 적은 양이라고 할 수 있다. 본 연구는 서남해안으로 유출되는 국내 주요 강의 유기탄소 유출량에 대한 정량적인 자료를 제시함으로써 향후 국내 다른 유역과의 비교뿐만 아니라 동아시아 규모의 탄소이동과 순환연구를 위한 중요한 정보를 제공할 것이다.

사 사

수문자료 수집에 도움을 주신 유량조사사업단 김치영 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 국립생태원 기초생태연구 ‘유역규모 생태계물질순환 기능 연구’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cole JJ, YT Prairie, NF Caraco, WH McDowell, LJ Tranvik, RG Striegl, CM Duarte, P Kortelainen, JA Downing and JJ Middelburg. 2007. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10:172–185.
- Fu Y, C Tang, J Li, Y Zhao, W Zhong and X Zeng. 2014. Sources and transport of organic carbon from the Dongjiang River to the Humen outlet of the Pearl River, southern China. *J. Geogr. Sci.* 24:143–158.
- Hedges J, R Keil and R Benner. 1997. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Org. Geochem.* 27:195–212.
- Hedges J, WA Clack, PD Quay, JE Richey, AH Devol and M Santos. 1986. Composition and fluxes of organic matter in the Amazon River. *Limnol. Oceanogr.* 31:717–738.
- Hope D, M Billett and M Cresser. 1994. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environ. Pollut.* 84:301–324.
- Johnes PJ. 2007. Uncertainties in annual riverine phosphorus load estimation: Impact of load estimation methodology, sampling frequency, baseflow index and catchment population density. *J. Hydrol.* 332:241–258.
- Jung BJ, HJ Lee, JJ Jeong, J Owen, B Kim, K Meusburger, C Alewell, G Gebauer, C Shope and JH Park. 2012. Storm pulses and varying sources of hydrologic carbon export from a mountainous watershed. *J. Hydrol.* 440:90–101.
- Jung BJ, L Jeanneau, C Alewell, B Kim and JH Park. 2015. Downstream alteration of the composition and biodegradability of particulate organic carbon in a mountainous, mixed land-use watershed. *Biogeochem.* 122:79–99.
- Li M, C Peng, M Wang, X Wei, K Zhang, K Wang, G Shi and Q Zhu. 2017. The carbon flux of global rivers: A re-evaluation of amount and spatial patterns. *Ecol. Indic.* 80:40–51.
- Meybeck M and C Vörösmarty. 1999. Global transfer of carbon by rivers. *Global Change Newsletter* 37:18–19.
- Oh NH. 2016. The loads and biogeochemical properties of riverine carbon. *Korean J. Ecol. Environ.* 49:245–257.
- Probst J, P Amiotte-Suchet and W Ludwig. 1994. Continental erosion and river transports of carbon to oceans. *Trends in Hydrology*, New Delhi. pp. 453–468.
- Ramkumar Mu, K Kumaraswamy and R Mohanraj. 2015. *Environmental management of river basin ecosystems*. Springer Press, Germany.
- Ran L, X Lu, H Sun, J Han, R Li and J Zhang. 2013. Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China. *J. Hydrol.* 498:76–88.
- Schlesinger WH and JM Melack. 1981. Transport of organic carbon in the world’s rivers. *Tellus* 33:172–187.
- Schlünz B and R Schneider. 2000. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux and burial rates. *Int. J. Earth Sci.* 88:599–606.
- Wang X, H Ma, R Li, Z Song and J Wu. 2012. Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River. *Global Biogeochem.* 26:1–10.
- Zhang G, MA Nearing and B Liu. 2005. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin of China. *Trans. ASAE* 48:511–517.
- Zhang Q, T Jiang, M Gemmer and S Becker. 2005. Precipitation, temperature and runoff analysis from 1950 to 2002 in the Yangtze basin, China. *Hydrolog. Sci. J.* 50:65–80.

Received: 25 November 2017

Revised: 29 November 2017

Revision accepted: 30 November 2017