

하천 탄소의 유출량과 생지화학적 특성

오능환^{1,2,*}

¹서울대학교 환경대학원 환경계획학과, ²서울대학교 환경계획연구소

The Loads and Biogeochemical Properties of Riverine Carbon. Oh, Neung-Hwan* (0000-0002-7096-7554)
(¹Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University;
²Environmental Planning Institute, Seoul National University)

Abstract Although rivers cover only 0.5% of the total land area on the Earth, they are windows that show the integrated effects of watershed biogeochemistry. Studies on the loads and properties of riverine carbon have been conducted because they are directly linked with drinking water quality, and because regional or global net ecosystem production (NEP) can be overestimated, unless riverine carbon loads are subtracted. Globally, $\sim 0.8\text{--}1.5\text{ Pg yr}^{-1}$ and $\sim 0.62\text{--}2.1\text{ Pg yr}^{-1}$ of carbon are transported from terrestrial ecosystems to the ocean via rivers and from inland waters to the atmosphere, respectively. Concentrations, $\delta^{13}\text{C}$, and fluorescence spectra of riverine carbon have been investigated in South Korea to understand the spatiotemporal changes in the sources. Precipitation as well as land use/land cover can strongly influence the composition of riverine carbon, thus shifting the ratios among DIC, DOC, and POC, which could affect the concentrations, loads, and the degradability of adsorbed organic and inorganic toxic materials. A variety of analyses including ^{14}C and high resolution mass spectroscopy need to be employed to precisely define the sources and to quantify the degradability of riverine carbon. Long-term data on concentrations of major ions including alkalinity and daily discharge have been used to show direct evidence of ecosystem changes in the US. The current database managed by the Korean government could be improved further by integrating the data collected by individual researchers, and by adding the major components ions including DIC, DOC, and POC into the database.

Key words: river, DIC, DOC, POC, carbon cycle

서 론

하천을 통해 바다로 유출되는 물질의 양과 특성은 이미 1800년대에도 연구자들의 관심 분야였으나 (Roth, 1879; Dürr *et al.*, 2011) 전 세계적인 규모로 하천의 주요 용존 성분의 농도를 구체적으로 표로 정리하여 보고한 것은 Livingstone (1963)에 의해서였다. 그러나, 하천 유기탄소

의 농도는 보고서에 포함되지 않았고, 1982년에 이르러서야 하천 유기탄소를 포함한 전 지구적인 하천탄소의 유출량이 추정되었다 (Meybeck, 1982). 이후 Web of Science에서 검색되는 논문 중 “River”를 검색어로 찾을 수 있는 논문의 수는 1988년 991편에서 2015년 18,120편으로 비약적으로 증가하였다 (Fig. 1). 같은 기간 동안 “River and Carbon”을 검색어로 사용하여 찾을 수 있는 하천 탄소에 관련된 논문의 수 역시 마찬가지로 1988년 단 6편에서 2015년 1,549편으로 늘어났다. 특히, 하천 탄소에 대한 많은 관심을 반영하듯, 2010년 이후로 관련 논문의 수가 가파르게 상승하고 있다 (Fig. 1).

Manuscript received 15 October 2016, revised 28 October 2016,
revision accepted 29 October 2016
* Corresponding author: Tel: +82-2-880-5653, Fax: +82-2-871-8847,
E-mail: onh@snu.ac.kr

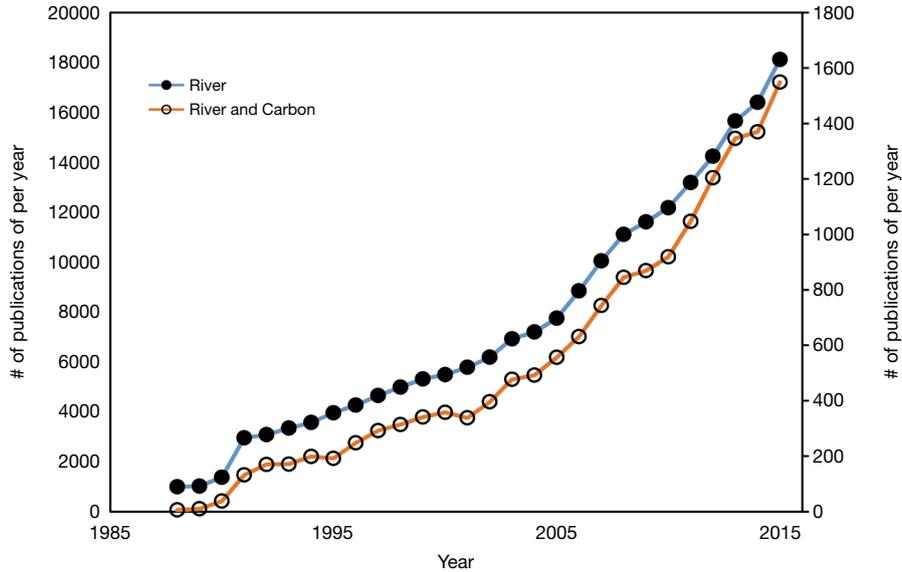


Fig. 1. Number of publications per year that can be searched through the Web of Science using “River” (closed circle; left axis), and “River and Carbon” (open circle; right axis) as keywords.

하천을 통한 탄소화합물의 유출과 이동은 전 지구적 탄소순환의 흐름을 정량적으로 이해하는 데 필요한 요소이지만, 하천이 육상생태계 중 차지하는 면적 비율이 약 0.5%로 적어서(Raymond *et al.*, 2013) 전 지구적 탄소순환의 주요 연구 대상은 아니었다. 그러나, 육상생태계가 대기 중 CO₂ 농도를 줄이는 탄소의 순 흡수원인지, 아니면 오히려 대기 중 CO₂ 농도를 높이는 탄소의 순 배출원인지를 알기 위해서는, 하천을 통해 바다로 빠져나가는 탄소량과 하천에서 대기로, 또는, 대기에서 하천으로 이동하는 CO₂의 양을 정확히 알 필요가 있다(Butman *et al.*, 2016). 이를 반영하듯, 하천의 탄소 동태를 정량적으로 파악하려는 것은 기후변화 관련 생지화학 연구의 핵심 주제로 부각되고 있고, 전 지구적 기후변화 예측 모형에 하천의 탄소동태를 포함시켜 탄소순환 요소별 모형 추정치를 새롭게 개선시킬 필요 역시 대두되었다(Regnier *et al.*, 2013). 국내 하천의 경우도 국외와 마찬가지로 하천 탄소화합물을 대상으로 한 연구의 범위와 수는 꾸준히 확대되어 왔으나 탄소의 성상별로 하천 탄소의 생지화학적 특성을 정리한 총설은 거의 없다. 이 총설에서는 하천 탄소의 성상별 유출량과 특성에 대한 국내의 연구 동향을 소개하고, 이를 바탕으로 앞으로 필요한 연구에 대해 제언한다.

전 지구적 탄소순환과 하천 탄소의 중요성

매년 대기 중 CO₂의 농도는 약 2 ppmv (parts per million

by volume) 정도씩 꾸준히 증가하고 있고(Canadell *et al.*, 2007), CO₂가 지구 온난화에 미치는 영향이 크기 때문에, 어떤 반응과 과정에 의해 대기 중 CO₂의 농도가 변화해 왔고, 앞으로 어떻게 바뀔지 예측하고 대비하기 위한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다(Schlesinger and Bernhardt, 2013). 대기권(atmosphere), 생물권(biosphere), 지권(lithosphere), 그리고 수권(hydrosphere)에 걸쳐 탄소가 소모되거나 생성되며 순환하는 과정을 “탄소순환”이라 하며, 탄소순환의 각 요소별로 저장된 탄소량과 플럭스(flux)를 정량하고, 이 양이 변화하는 이유를 밝히려는 연구가 이뤄지고 있다(Fig. 2).

탄소 저장고(pool)로는 대기권에 750 Pg (Pg = 10¹⁵ g), 나무를 포함한 식물에 560 Pg, 그리고 낙엽 등 땅에 떨어진 유기물 300 Pg과 토양 내 유기탄소 1200 Pg을 합쳐 약 1500 Pg의 유기탄소가 토양에 저장된 것으로 추정된다(Fig. 2). 그러나, 토양탄소 저장량은 그동안 저평가되었던 극지의 토양탄소량과 깊은(예: > 1 m) 토양에 존재하는 토양탄소량을 고려하면 이 추정치의 두 배 이상 늘어날 수 있다(Jobbagy and Jackson, 2000; Tarnocai *et al.*, 2009).

탄소순환에 직접적인 영향을 주는 것은 저장고가 아니라 플럭스이며, 식물에 의한 광합성량, 즉, 총 일차 생산량(Gross primary production, GPP)은 전 지구적 탄소순환의 요소 중 가장 큰 플럭스이다(Fig. 2, Eq. 1). 그러나, 이 중 약 반에 해당하는 양의 탄소가 식물의 호흡에 의해 CO₂로 다시 산화되어 대기로 돌아가고(Eq. 2), 나머지 절반에 해당하는 탄소 역시 동물과 미생물을 포함한 다른 생물의 호흡

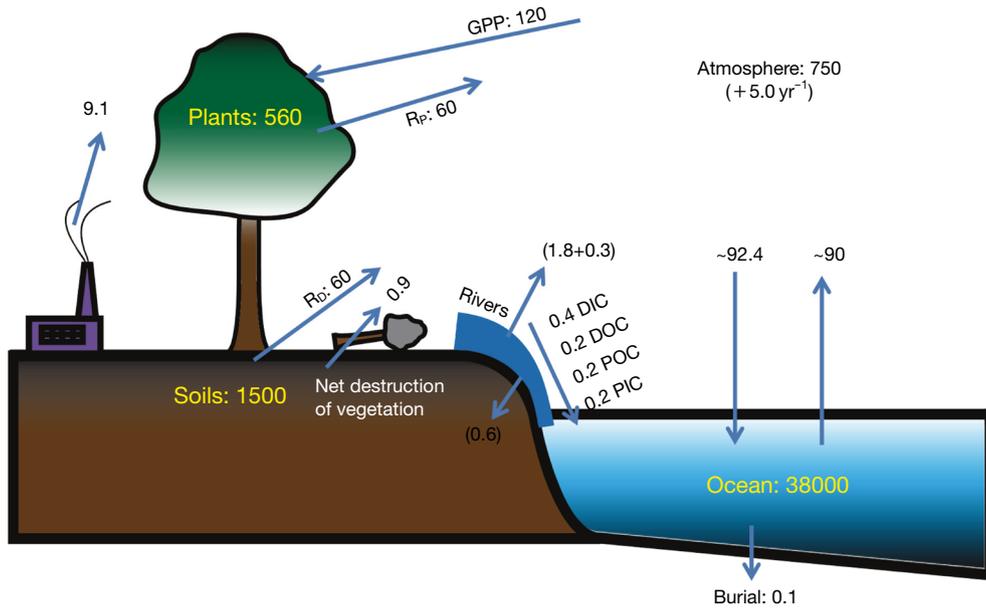


Fig. 2. The fluxes (blue arrows) and pools of the global carbon cycle. The units are in Pg ($= 10^{15}$ g) for pools and Pg yr⁻¹ for fluxes. GPP is gross primary production, R_p is plant respiration, R_d is respiration of decomposers. All of the values except the riverine fluxes in red fonts are from Schlesinger and Bernhardt (2013)'s Fig. 11.1. The river was presented as a tapered pipe, demonstrating not all of the carbon that entered to the river systems reached the ocean, due to both CO₂ evasion to the atmosphere and burial of organic carbon (in parenthesis). The CO₂ evasion is from rivers (1.8 Pg yr⁻¹) as well as lakes and reservoirs (0.3 Pg yr⁻¹). See the text for the ranges of estimates of each flux. Note that terrestrial NEP ($= GPP - R_p - R_d$) can be significantly influenced by both lateral and vertical riverine carbon fluxes.

에 의해 CO₂의 형태로 다시 대기로 돌아가기 때문에 (Eq. 3), 정상상태 (steady state) 하에서 육상과 대기 간의 순 탄소 교환은 거의 0이 된다 (Houghton, 2014). 즉, 광합성에 의해 합성된 유기탄소의 총량에서 식물과 미생물의 호흡을 빼고 남는 양인 순 생태계 생산량 (Net ecosystem production, NEP)은 GPP에 비해 매우 적다. 하지만, NEP는 육상생태계에서 탄소가 축적되거나 소모되는 최종 결과량이므로 오랜 기간에 걸쳐 육상생태계의 탄소량을 조절한다. 매년 온도, 습도, 광량이 달라지고, 넓은 지역에 발생하는 산불이나 가뭄 등에 따라 광합성량과 호흡량이 영향을 받을 수 있으므로 (Zhao and Running, 2010) NEP는 많게는 5~6 Pg yr⁻¹까지 변화를 보일 수 있다 (Houghton, 2014).

$$GPP (\text{Gross primary production}) = \text{약 } 120 \text{ Pg yr}^{-1} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} NPP (\text{Net primary production}) &= GPP - R_p = 120 - 60 \\ &= \text{약 } 60 \text{ Pg yr}^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} NEP (\text{Net ecosystem production}) &= NPP - R_d = 60 - 60 \\ &= \text{약 } 0 \text{ Pg yr}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

하천을 통해 육상생태계로부터 바다로 유출되는 탄소의 양이 바로 NEP와 비교할만한 양이다. 강물을 통해 유출되

는 탄소의 종류와 양은, 전 세계적으로 보아 용존무기탄소 (dissolved inorganic carbon, DIC), 용존유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC), 입자상 유기탄소 (particulate organic carbon, POC), 입자상 무기탄소 (particulate inorganic carbon, PIC)를 합쳐 약 1 Pg year⁻¹ 정도로 추정되며, 그 양은 광합성이나 식물과 미생물의 호흡 등 다른 플럭스에 비하면 매우 적다 (Fig. 2). 그러나, 천이이 진행되는 생태계 등 특별한 경우를 제외하고는 토양에 오랜 기간에 걸쳐 축적되는 탄소의 양은 제한적이며 (Schlesinger, 1990; Richter *et al.*, 1999), 하천을 통해 유출되는 탄소는 육상생태계로부터의 손실에 해당하므로 NEP 계산 시 하천 탄소 유출량을 고려해 주지 않으면 육상생태계에 저장되는 탄소량이 과다 추정될 위험이 있다. 미국의 경우 하천 탄소 유출량을 고려해 주지 않으면 NEP가 27%만큼 과다 추정될 위험성이 있음을 보여주었고, 따라서 하천에 의한 탄소유출을 전 지구적 탄소순환 모델에 적극적으로 포함시켜야 할 필요성이 점차 인식되고 있다 (Butman *et al.*, 2016). 하천의 탄소량과 구성 성분은 유역 안에서 일어나는 다양한 생지화학적 반응과 과정을 집약적으로 보여주므로 환경의 변화를 추적하는 데 사용하기 편리한 지표가 될 수 있고 (Raymond *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2013), 이와 더불어, 하

천을 통해 육상생태계의 탄소가 해양생태계로 전달되므로 하천 탄소의 조성과 유출량의 변화는 연안 해양생태계의 변화를 불러올 수 있어서 육상뿐만 아니라 해양생태계 연구자들의 관심도 높아지고 있다.

하천 탄소의 성상별 이화학적 특성, 유출량과 이동량

하천 탄소는 기원에 따라 무기탄소 (inorganic carbon) 와 유기탄소 (organic carbon)로 나눌 수 있고, 성상에 따라 용존탄소 (dissolved carbon)와 입자상탄소 (particulate carbon)로 나눌 수 있으며, 각 성상별 탄소마다 생태계에서 갖는 의미와 중요성이 다르다. 하천에 존재하는 DIC의 대부분을 차지하는 중탄산염 이온 (bicarbonate, HCO_3^-)은 흡과 바위의 풍화작용에 의한 결과물로서 대기 중 CO_2 의 농도를 오랜 기간에 걸쳐 줄이는 효과가 있고 (Gaillardet *et al.*, 1999; Oh and Richter, 2004; Oh *et al.*, 2007), PIC는 탄산염 광물이 포함된 유역의 침식에 의해 유출된다 (Meybeck, 2004). DOC는 탄소와 에너지원으로서 수생태계의 먹이 사슬과 연계되어 생태계를 유지시키는 데 도움이 되지만, 상대적으로 높은 농도의 DOC는 (예: $> 3 \text{ mg L}^{-1}$) 수돗물 정수 처리에 사용되는 염소와 반응하여, 암을 일으킬 수도 있는 트리할로메탄 (Trihalomethanes, THMs)을 부산물로 생성할 수 있기 때문에 일반 시민의 보건과도 밀접한 관계가 있다 (Xie, 2004). POC의 유출과 침적은 지질학적 시간에 걸쳐 대기 중 O_2 와 CO_2 의 농도를 조절해 왔다 (Berner, 1982).

육상으로부터 해양으로 하천에 의한 연간 탄소 유출량은 DIC, PIC, DOC, POC가 각각 대략 0.39, 0.17, 0.22, 0.21 Pg-C yr^{-1} 로 추정되었고 (Meybeck, 2004), 이처럼 가로 (lateral) 방향으로 이동하는 양에 더하여 수체로부터 두 개의 수직 (vertical) 방향으로 이동하는 양, 즉, 수체로부터 대

기로 이동하는 양 (CO_2 evasion)과 바닥으로 퇴적되는 유기탄소의 양은 각각 1.2 Pg-C yr^{-1} 과 0.6 Pg-C yr^{-1} 로 추정되었다 (Aufdenkampe *et al.*, 2011). 그러나, 이는 대략적인 수치일 뿐 DIC, DOC, POC, PIC 유출량을 모두 합칠 경우 약 0.8~1.5 Pg-C yr^{-1} , CO_2 evasion 양은 0.62~2.1 Pg-C yr^{-1} 로, 각 추정치마다 상대적으로 넓은 범위를 보여 아직 이 분야 연구가 미진함을 알 수 있다 (Table 1). 각 성상별 탄소 중 하천 PIC는 유출량이 제일 적고, 관련 논문의 수도 제일 적으며, 그 의미 면에서도 탄소가 저장되어 있는 위치가 육상에서 바다로 바뀔 뿐이어서 전 지구적 탄소순환에 미치는 영향은 다른 성상의 탄소에 비해 적기 때문에 여기에서는 국내외에서 상대적으로 많은 연구가 진행된 DIC, DOC, POC를 중심으로 하천 탄소의 바다로의 유출량, 대기로의 이동량, 생지화학적 특성을 정리하였다.

1. 무기탄소

하천 용존무기탄소는 HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 와 그 화합물을 포함하며, $6 < \text{pH} < 8.2$ 의 범위를 갖는 세계 대부분의 강에서는 암석의 풍화 산물인 중탄산염 이온 (HCO_3^-)이 하천 내 DIC의 거의 대부분을 차지한다 (Stumm and Morgan, 1996; Meybeck, 2004). 규산염 광물 (silicate minerals)과 탄산염 광물 (carbonate minerals)의 풍화작용에 의해 (예: Eq. 4와 Eq. 5) 대기와 암석으로부터 유래된 탄소가 HCO_3^- 로 변환되어 (Oh, 2014), 매년 약 0.26~0.44 Pg-C yr^{-1} 의 용존 무기탄소가 육상으로부터 바다로 유출되는 것으로 추정된다 (Holland, 1978; Berner *et al.*, 1983; Meybeck, 1987; Amiotte Suchet and Probst, 1995; Gaillardet *et al.*, 1999).

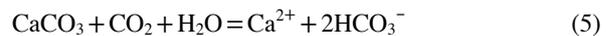
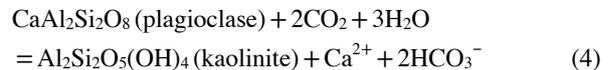


Table 1. The global fluxes of riverine carbon which include lateral transports (DIC, DOC, POC, and PIC loads) and vertical transports (CO_2 evasion to the atmosphere and burial of organic carbon).

	Flux (Pg yr^{-1})	References
DIC	0.24~0.44	Meybeck, 1987; Amiotte Suchet and Probst, 1995; Gaillardet <i>et al.</i> , 1999; Hartmann <i>et al.</i> , 2009
DOC	0.2~0.4	Ludwig <i>et al.</i> , 1996; Aitkenhead and McDowell, 2000; Richey, 2004
POC	0.2~0.5	Richey, 2004
PIC	0.17	Meybeck, 1993; Meybeck, 2004
CO_2 evasion to the atmosphere ^a	0.62~2.1	Cole <i>et al.</i> , 2007; Battin <i>et al.</i> , 2009; Aufdenkampe <i>et al.</i> , 2011; Raymond <i>et al.</i> , 2013; Lauerwald <i>et al.</i> , 2015
Burial of organic carbon in sediment	0.6	Tranvik <i>et al.</i> , 2009; Aufdenkampe <i>et al.</i> , 2011

^a CO_2 evasion from rivers, lakes, and reservoirs.

하천 내 HCO_3^- 의 전 지구적인 유출량은, (1) 전 세계 주요 강의 이온 농도와 유량으로부터 계산된 각각의 유출량을 더하여 구할 수 있고(Gaillardet *et al.*, 1999), 또는, (2) 암석의 종류별로 풍화작용에 의한 HCO_3^- 의 유출량을 유량과의 경험식으로 나타내고, 이를 전 지구적인 암석의 분포도와 유량 자료를 이용하여 외삽(extrapolation)함으로써 추정할 수 있다(Amiotte Suchet and Probst, 1995). 전자의 경우엔 HCO_3^- 의 총 유출량을 구할 수는 있으나 유역 내 위치에 따른 유출량을 파악하기 어렵고, 후자의 경우엔 유출량과 유량 간의 경험식에 오류가 있거나 전 지구적인 암석의 분포자료가 부정확할 경우 추정치의 변이가 커질 수 있다. 1995년에 발표된 논문에서는 전 지구적인 규모의 암석의 종류를 단지 네 종류(carbonate rocks, plutonic and metamorphic rocks, basalts, and acid volcanic rocks)로 나눠 하천 HCO_3^- 의 유출량을 추정했던 것에 비해(Amiotte Suchet and Probst, 1995), 2003년에는 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 해상도로 여섯 종류의 암석을 사용함으로써 추정치를 향상시켰다(Amiotte Suchet *et al.*, 2003). 이후 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 의 해상도로 15종류의 주요 암석 분포에 대해 전 지구적인 규모로 정리한 GIS 지도가 발간되었고(Dürr *et al.*, 2005), 이를 이용하여 하천의 DIC 유출량을 새롭게 추정하고($0.237 \text{ Pg-C yr}^{-1}$), 동남아시아 등 화학적 풍화작용이 많이 일어나는 핫스팟(Hot spot)의 위치도 새롭게 규명하였다(Hartmann *et al.*, 2009).

우리나라 전체 하천으로부터 바다로 유출되는 DIC의 양을 보고한 논문은 찾을 수 없었다. 대략, 우리나라 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)의 유량이 연간 약 50

$\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$ 이고, DIC 유출량이 약 460 Gg-C yr^{-1} 로 추정되므로(Lee *et al.*, unpublished data), 5대강 유역 안과 밖의 단위면적당 연간 DIC 유출량이 같다고 가정하면, 남한의 전체 면적 중 5대강 유역이 차지하는 면적이 64%인 것을 고려할 때 약 720 Gg-C yr^{-1} 의 DIC가 우리나라로부터 바다로 유출되는 것으로 추정된다.

하천 DIC의 총 유출량은 보고되지 않은 반면, 우리나라 하천의 HCO_3^- 농도($[\text{HCO}_3^-]$)와 탄소 안정동위원소(^{13}C) 분석 결과는 수차례 보고되었으나 대부분의 연구는 한강에 집중되었다(Table 2). 1969년 남한강과 북한강의 주요 이온 성분을 분석한 이래로(Hong, 1969), 1993년 춘천 지역 하천수를 대상으로(Yu *et al.*, 1994), 1996년에는 한강수계 전역에 걸쳐, 이후 1999년 5월부터 6월에 걸쳐 북한강과 남한강, 그리고 한강 본류의 총 61개 지점과 본류로 유입되는 지천(안양천, 탄천, 중랑천, 왕숙천)을 대상으로 알칼리도를 측정하고 $[\text{HCO}_3^-]$ 를 계산하였다(Kim and Shim, 2001). 그 결과, $[\text{HCO}_3^-]$ 가 북한강에서는 $3.36\sim 9.94 \text{ mg-C L}^{-1}$ (HCO_3^- -C로 계산), 남한강에서는 $6.52\sim 17.10 \text{ mg-C L}^{-1}$, 한강 본류에서는 $11.05\sim 15.18 \text{ mg-C L}^{-1}$, 오염도가 높은 지천에서는 $16.53\sim 38.92 \text{ mg-C L}^{-1}$ 의 범위를 보였다(Kim and Shim, 2001). 2000년 8월 풍수기와 12월 갈수기, 2001년 3월 남한강과 북한강 하천수의 [DIC]를 측정한 결과 역시 마찬가지로, 북한강에서는 $1.63\sim 14.65 \text{ mg L}^{-1}$, 남한강에서는 $1.75\sim 19.04 \text{ mg L}^{-1}$ 로 남한강의 농도가 높았고 이는 남한강 유역 내 넓게 분포하는 석회암과 퇴적암 때문인 것으로 유추되었다(Ryu *et al.*, 2008). 이후 한강 이외의 지역으로도 연구가 확대되어 2006년 11월과 2007년 8월에

Table 2. The concentrations and $\delta^{13}\text{C}$ of DIC in South Korean rivers.

Location	Concentration (mg L^{-1})	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	References
The North Han River (NHR)	3.36~9.94 ^a		Kim and Shim, 2001
The South Han River (SHR)	6.52~17.10 ^a		Kim and Shim, 2001
Mainstream of the Han River (HR)	11.05~15.18 ^a		Kim and Shim, 2001
Tributaries of HR (urban streams)	16.53~38.92 ^a		Kim and Shim, 2001
NHR	1.63~14.65		Ryu <i>et al.</i> , 2008
SHR	1.75~19.04		Ryu <i>et al.</i> , 2008
The Six largest rivers (winter)	4.11~18.87		Shin <i>et al.</i> , 2011b
The Six largest rivers (summer)	3.47~19.96		Shin <i>et al.</i> , 2011b
Mainstream of the HR	8.09~9.89	-13.0~-9.0	Lee <i>et al.</i> , 2007
NHR	1.63~14.65	-14.4~-4.9	Lee <i>et al.</i> , 2007
SHR	1.76~19.04	-11.7~-7.1	Lee <i>et al.</i> , 2007
Spring waters from a watershed of silicate rocks within SHR basin	5.6~103.3	-21.2~-13.1	Shin <i>et al.</i> , 2011a
Stream waters from a watershed of silicate rocks within SHR basin	13.7~45.5	-10.0~-3.6	Shin <i>et al.</i> , 2011a
Spring waters from a watershed of carbonate rocks within SHR basin	93.1~137.9	-13.2~-8.1	Shin <i>et al.</i> , 2011a
Stream waters from a watershed of carbonate rocks within SHR basin	71.3~110.2	-11.2~-6.1	Shin <i>et al.</i> , 2011a
Urban streams within the Geum River basin	43~103	-15.2~-8.8	Shin <i>et al.</i> , 2015

^aas HCO_3^- -C

우리나라 6대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강, 만경강)을 대상으로 측정된 $[\text{HCO}_3^-]$ 는, 겨울철에 4.11~18.87 (평균: 11.37) $\text{mg}\cdot\text{CL}^{-1}$, 여름철에 3.47~19.96 (평균: 8.20) $\text{mg}\cdot\text{CL}^{-1}$ 로 지역에 따른 차이가 있으나 각 강의 하류에서는 겨울철에 대체로 $[\text{HCO}_3^-]$ 가 높았고, 여름철에는 늘어난 유량에 의해 $[\text{HCO}_3^-]$ 가 낮아지는 경향을 보였다(Shin *et al.*, 2011b).

하천 DIC의 안정 동위원소 비율($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)은 기원 물질에 따라 다양한 범위를 나타낸다. 해양 기원 탄산염암은 약 0‰, 대기 중 CO_2 는 약 -8‰, 광합성에 의해 유기물질이 만들어질 때 ^{13}C 의 분별작용에 의해 C3 식물은 -24~-34‰, C4 식물은 -12~-16‰의 범위를 나타내고, 토양 내에서 이들 유기물질이 분해되어 생기는 CO_2 는 약 -30~-10‰의 범위를 갖는다(Clark and Fritz, 1997). 이처럼 다양한 기원 물질의 기여도에 따라 하천수의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 도 다양한 값을 가질 수 있다. 2000년 8월과 12월, 2001년 3월 남한강과 북한강 하천수를 대상으로 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 를 측정된 결과 각각 약 -15~-5‰과 -12~-7‰로 시료 채취 장소와 계절에 따라 비교적 큰 변이가 있으나, 북한강에서는 토양호흡에 의한 기여도가, 남한강에서는 탄산염암에 의한 기여도가 높음이 보고되었다(Lee *et al.*, 2007). 이보다 작은 규모의 연구로, 남한강 상류의 규산염암 유역과 탄산염암 유역의 샘물(spring water)을 대상으로 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 를 측정한 결과 각각 -16.2‰와 -9.7‰의 평균값을 나타냈으나 계류수(stream)에서는 각각 -6.9와 -7.8‰의 평균값을 보였고, 이로부터 하천과 대기 사이의 활발한 CO_2 교환이 유추되었다(Shin *et al.*, 2011a).

자연하천을 대상으로 측정한 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 외에, 대전 지역 도심을 통과하는 하천의 경우에는 여름철 늘어난 토양 풍화작용의 영향으로 약 -16.7~-16.0‰의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 범위를 보였으나 겨울철에는 약해진 풍화작용과 줄어든 유량 때문에 하수처리장을 통과한 도시 하수의 기여도가 커져 하천의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 가 -11.4~-7.4‰으로 올라갈 수 있음이 보고되었다(Shin *et al.*, 2015). 우리나라 하천의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 연구를 요약하면 대부분의 연구가 한강을 대상으로 제한된 측정치만이 보고된 편이며(Table 2), 앞으로 이를 보완하기 위해 다른 지질, 식생, 토지이용을 보이는 여러 유역 내 하천을 대상으로 연구가 확대될 필요가 있다.

2. CO_2 evasion

하천 내 DIC의 거의 대부분이 HCO_3^- 이기 때문에 하천 DIC 연구는 HCO_3^- 의 생성과 바다로의 유출량에 집중되었으나 최근에는 하천으로부터 대기 중으로 이동하는 무

기탄소량(CO_2 evasion)을 정량하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Aufdenkampe *et al.*, 2011; Raymond *et al.*, 2013; Regnier *et al.*, 2013; Lauerwald *et al.*, 2015). 하천을 단순히 육지와 바다를 연결하는 관(pipe)으로만 보던 기존의 시각으로부터, 하천에 들어온 탄소가 모두 바다에 도달하는 것이 아니라 도중에 대기로 빠져나가거나 하천 바닥에 침적되며 실제로 바다에 도달하는 양은 처음 하천으로 들어온 양에 비해 적은 것을 반영하여, 현재는 하천을 점차 지름이 줄어드는 관(tapered pipe)으로 비유한다(Cole *et al.*, 2007; Battin *et al.*, 2009; Aufdenkampe *et al.*, 2011) (Fig. 2).

하천으로부터 대기로 이동하는 CO_2 량(Eq. 6, FCO_2)을 추정하기 위해서는 하천의 표면적(Eq. 6, A), 기체수송속도(gas transfer velocity)(Eq. 6, k), 하천과 대기 사이의 CO_2 농도 차이(Eq. 6, ΔCO_2) 자료가 필요한데(Eq. 6), 각 항목을 추정하기 위해 필요한 자료는 미국과 유럽의 하천에 치우쳐 있고, 아시아와 아프리카의 하천을 대상으로 한 자료는 상대적으로 매우 부족하다(Lauerwald *et al.*, 2015).

$$\text{FCO}_2 = A \cdot k \cdot \Delta\text{CO}_2 \quad (6)$$

제한된 자료에도 불구하고, 하천과 호소로부터 대기로 이동하는 CO_2 의 양을 추정하여 약 0.62 Pg yr^{-1} 의 탄소가 대기로 이동하는 것으로 보고되었으나(Cole *et al.*, 2007) 이 양은 산림 계류수처럼 규모가 작은 소하천(stream)을 포함시키지 않은 추정치이고, 또한, 규모가 작은 소하천(stream)일수록 pCO_2 가 높은 경향을 보이는 것을 고려하면(Butman and Raymond, 2011), 이 수치는 수체로부터의 CO_2 evasion을 과소 평가한 것으로 볼 수 있다. 이후 이어진 전 지구적인 규모의 연구에서, 수체의 CO_2 evasion 양이 무려 2.1 Pg yr^{-1} (하천으로부터 1.8 Pg yr^{-1} 과 호소로부터 0.3 Pg yr^{-1})까지 이를 수 있는 것으로 추정되었다(Raymond *et al.*, 2013). 특히, 북위 60도 아래에 위치한 전 세계 육지 면적의 약 절반이 1차 하천과 2차 하천으로 연결되는 면적으로 추정되고, 소규모 하천의 단위 면적당 CO_2 evasion도 큰 강에 비해 상대적으로 높아 이들 소규모 하천이 전 지구적인 하천의 CO_2 evasion 양을 결정하는 중요한 요소임이 보고되었다(Raymond *et al.*, 2013). 그러나, 비슷한 자료를 써서 새롭게 추정된 하천 CO_2 evasion의 양은 0.65 Pg yr^{-1} 로, 이전에 추정된 2.1 Pg yr^{-1} 의 약 1/3 정도에 해당하며, 이러한 결과의 차이는 주로 열대지방 하천의 CO_2 evasion 추정량 차이에 의한 것으로 분석되어(Lauerwald *et al.*, 2015), 하천으로부터 대기로 이동하는 CO_2 의 양을 보다 정확히 추정하기 위해서는 다양한 방법을 이용한 후속 연구가 필요함을 보여주었다.

하천 CO₂ evasion에 영향을 미치는 요인으로는 (1) 육상 생태계 내 식생과 미생물의 토양호흡에 의해 형성된 CO₂의 물리적 이동, (2) 미생물 또는 빛에 의한 하천 내 육상 기원(allochthonous) 유기물질의 분해, (3) 하천 내에서 광합성에 의해 생성된(autochthonous) 유기물질의 분해 등이 있으나 각 양을 정량적으로 조사한 연구는 매우 적다(Cory *et al.*, 2014; Hotchkiss *et al.*, 2015). 방사성 동위원소(¹⁴C)를 이용하여 하천 내 CO₂ evasion의 기원이 육상생태계에서 생성된 유기물임을 보고한 연구가 있긴 하나, 대부분의 CO₂ evasion 연구는 주로 열대와 온대 지방의 거대 하천을 대상으로 이뤄졌고(Richey *et al.*, 2002; Mayorga *et al.*, 2005; Butman and Raymond, 2011), 최근에 와서야 고위도 지역의 하천을 대상으로 연구가 확대되고 있다(Wallin *et al.*, 2013; Kokic *et al.*, 2015). 우리나라 하천처럼 여름철 유량이 늘어나는 아시아 계절풍 기후대에 속한 하천의 경우, 여름철 하천 표면적이 급격히 늘어날 수 있고, 유속의 변화에 의해 기체수송속도 또한 커질 수 있으며, 유역으로부터의 탄소 유입량 역시 큰 변화가 예상되나 각 항목에 대한 실측 자료는 거의 없다.

우리나라 남한강 상류의 규산염암 유역과 탄산염암 유역의 샘물(spring water)과 하천(stream)을 대상으로 측정된 알칼리도와 pH로부터 pCO₂를 계산한 결과, 규산염암 유역의 샘물은 827~42,546 (평균: 7,520), 규산염암 유역의 하천은 150~3,380 (평균: 720), 탄산염암 유역의 샘물은 372~2,197 (평균 1,245), 탄산염암 유역의 하천은 50.3~1,150 (평균 357) ppmv의 분포를 보였고, 이는 규산염암 유역의 pH가 상대적으로 낮아 하천 무기탄소의 종류 중 용존 CO₂의 비율이 상대적으로 높기 때문이다(Shin *et al.*, 2011a). 이처럼 계산된 값이 아닌, 실측된 하천 pCO₂를 보고한 연구는 2015~2016년 북한강 상류부터 한강의 본류와 하구역을 대상으로 진행되었다(Yoon *et al.*, 2016). 이 연구에서 하천의 pCO₂는 측정 장소에 따라 최대 약 15,000 ppm까지 높아졌고, 특히 생활하수가 많이 배출되는 도심의 하천이 한강으로 유입될 때 하천의 pCO₂가 급격히 증가될 수 있음을 보여주었다(Yoon *et al.*, 2016). 도시하천 등 인공적 요인(예: 하수처리장)의 유무를 포함한, 유역 내 토지이용에 따라 아시아 계절풍 지역의 하천 CO₂ evasion 양이 얼마나, 그리고 왜 변화하는지 정량적으로 이해하고 자료를 보완하면, 전 지구적인 하천 CO₂ evasion 양을 새롭게 추정할 수 있으리라 기대된다.

3. 유기탄소

하천 내 유기탄소의 농도와 화학적 특성에 대해 연구하

는 것은 탄소순환의 동태를 파악하기 위해서일 뿐만 아니라 수질 관리와 수생태계의 보호에도 큰 함의를 가질 수 있기 때문에 다른 성상의 탄소에 비해 많은 연구가 이뤄졌다. 하천과 탄소(River and Carbon)를 주제로 Web of Knowledge로 검색되는 논문 총 16,520개 중, 각 탄소 성상(DIC, DOC, POC, PIC)별로 검색되는 논문의 수는 각각 1,426, 4,626, 2,302, 494개로(예: “river and dissolved organic carbon”으로 검색) 하천 탄소에 대한 연구 중 DOC와 POC에 많은 연구가 집중되어 있다(2016년 10월 7일 검색). 하천 [DOC]에 대한 개별 연구자들의 관심뿐만 아니라 국가 차원에서의 높은 관심을 반영하듯, 환경부에서 관리하는 수질 지표에도 생화학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand, BOD)와 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD)이 포함되어 있다. 그러나, 이들 지표는 유기물의 산화 과정에 소모되는 O₂의 양을 보여주는 것이므로 [DOC]를 간접적으로 나타낼 뿐이며, 정부 차원에서 수질측정망 내 하천과 호소를 대상으로 고온연소법을 사용하여 총 유기탄소(total organic carbon, TOC = DOC + POC) 농도를 본격적으로 실측하기 시작한 것은 2008년부터이다.

1971년부터 1980년 사이에 보고된 전 지구적인 하천의 TOC 유출량은 적게는 0.03 Pg yr⁻¹부터 많게는 약 1.0 Pg yr⁻¹에 이를 정도로 많은 편차를 보였고, 이는 계산의 근거가 명확하지 않거나 단순 평균 농도와 유량을 곱하는 등 오차가 커질 수 있는 추정 방식이 사용되었기 때문이다(Schlesinger and Melack, 1981). 이를 개선하기 위해, 12개 강의 연간 총 유량과 총 유기탄소 유출량과의 관계식을 구하고 이를 총 유량에 외삽하거나, 또는 유역의 면적과 총 유기탄소 유출량과의 관계식을 구하고 이를 생태계별로 적용시킴으로써, 이 두 가지 방법에 따라 각각 0.37 Pg yr⁻¹과 0.41 Pg yr⁻¹의 총 유기탄소(TOC)가 바다로 유출되는 것으로 추정되었다(Schlesinger and Melack, 1981). 이후 강의 수를 최대 60개까지 늘리고, 유역 내 DOC 유출량을 늘릴 수 있는 요소(예: 유량, 경사, 토양탄소 등)를 이용한 상관관계 분석을 이용하여 모델을 구성한 결과, 약 0.21 Pg yr⁻¹의 DOC와 0.17 Pg yr⁻¹의 POC 유출량을 얻었다(Ludwig *et al.*, 1996). 그러나, 164개 유역별 토양의 C:N 비율과 DOC 유출량을 종합하여 관계식을 구하고, 이를 15개 생물군계(biome)에 적용시켜 추정한 DOC 유출량은 0.36 Pg yr⁻¹이었다(Aitkenhead and McDowell, 2000). 따라서, 전 지구적인 규모에서 하천의 DOC 유출량은 추정 방법에 따라 약 0.2~0.4 Pg yr⁻¹로 상대적으로 넓은 범위를 가지며, 후속 연구가 필요함을 보여준다.

하천 POC는 수체 내에서 광합성을 통해 생성되거나

Table 3. The $\delta^{13}\text{C}$ of DOC and POC in South Korean rivers.

Location	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ (‰)	References
Agricultural streams in NHR basin	-25.2 ± 0.5	-24.0 ± 0.70	Kim <i>et al.</i> , 2013
Forest streams in NHR basin	-27.3 ± 0.4	-24.7 ± 0.79	Kim <i>et al.</i> , 2013
Paldang dam in HR		$-25.3 \sim -29.5$	Kim <i>et al.</i> , 2014
NHR		$-29.7 \sim -25.3$	Kim <i>et al.</i> , 2014
SHR		$-31.4 \sim -27.4$	Kim <i>et al.</i> , 2014
Urban stream in HR		$-29.6 \sim -24.5$	Kim <i>et al.</i> , 2014
The Tamjin River		$-26.14 \sim -24.14$	Gal <i>et al.</i> , 2012
The Youngsan River and estuary		$-31.06 \sim -13.25$	Lee <i>et al.</i> , 2013

(autochthonous input) 육상생태계로부터 침식을 거쳐 하천으로 유입된 후 (allochthonous input) 부분적으로 분해되어 CO_2 를 발생시키거나 DOC를 용출시킬 수 있고, 또는 화학적으로나 물리적으로 안정한 형태로 미생물에 의한 산화과정을 거치지 않고 POC 자체로 수체나 연안에 퇴적되어 대기 중 CO_2 의 흡수원으로 작용할 수도 있다 (Galy *et al.*, 2007; Galy *et al.*, 2015). 특히, 호소 바닥에 침적되는 탄소의 양이 약 0.6 Pg yr^{-1} 로 이는 바다에 매년 침적되는 탄소량의 네 배에 해당하며 (Tranvik *et al.*, 2009), 하천의 CO_2 evasion과 함께 하천을 점차 지름이 줄어드는 관 (tapered pipe)으로 비유할 수 있는 근거가 된다 (Cole *et al.*, 2007; Battin *et al.*, 2009; Aufdenkampe *et al.*, 2011) (Fig. 2).

이러한 중요성 때문에 전 지구적인 하천 POC 유출량을 추정하기 위한 여러 연구가 이뤄졌으나 POC 유출량을 추정하기 위해서는 유량 외에도 부유물질 (suspended sediment, SS)의 양과 그 안에 포함되어 있는 유기탄소의 농도를 모두 정량해야 하고, SS와 유기탄소 농도 사이의 관계식에 따라 추정 오차가 커진다 (Huang *et al.*, 2012). 전 지구적인 POC 유출량은 약 $0.2 \sim 0.5 \text{ Pg yr}^{-1}$ 로, DOC 유출량과 마찬가지로 추정 방법에 따른 차이가 크며 (Richey, 2004), 따라서, DOC와 POC를 합친 총 유기탄소의 유출량은 약 0.4에서 거의 1 Pg yr^{-1} 까지 커질 수 있다.

우리나라 5대강 (한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)의 유량이 연간 약 $50 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$ 이고, DOC와 POC 유출량이 각각 약 85 Gg-C yr^{-1} 와 34 Gg-C yr^{-1} 로 추정되므로 (Lee *et al.*, unpublished data), 5대강 유역 안과 밖의 단위면적당 연간 DOC와 POC 유출량이 같다고 가정하면, 남한의 전체 면적 중 5대강 유역이 차지하는 면적이 64%인 것을 고려할 때 약 132 Gg-C yr^{-1} 의 DOC와 53 Gg-C yr^{-1} 의 POC가 우리나라로부터 바다로 유출되는 것으로 추정된다. 우리나라의 총 산림 면적을 대상으로 (농지와 도시는 제외) VISIT 모델을 사용하여 1999~2008년을 대상으로 추정된 NEP의 평균이 $3,510 \text{ Gg-C yr}^{-1}$ 인 것을 고려하면 (Yoo *et al.*, 2013), 하천을 통한 총 유기탄소의 연간 유출량은 우리나라 산림

NEP의 약 5%에 해당한다. 광릉 KoFlux (Korean regional flux network in Asiaflux) 유역에서 여름철 (2005년 6월~10월)에 측정된 하천 DOC와 POC 유출량은, 에디 공분산 (Eddy covariance) 방법을 이용하여 추정된 연간 NEE (Net ecosystem carbon exchange) 양의 약 10% (DOC와 POC가 각각 약 5%씩)에 해당하였고 (Kim *et al.*, 2010), 이는 연구 규모에 따라 달라지기는 하지만 세계의 다른 하천에 비해 상대적으로 낮은, 우리나라 유역의 연간 DOC 유출량 : NEP의 비율을 나타낸다.

한국의 하천 유기물질의 기원과 반응성을 파악하기 위하여, 채취된 시료에 대한 화학적, 광학적 특성 분석과 함께, 최근에는 센서를 이용한 하천 유기물 농도의 연속 측정 등 다양한 방법의 연구가 진행되었다 (Jeong *et al.*, 2012; Hur *et al.*, 2014; Jung *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2016). 규모가 비교적 작은 강원도 산림 소유역을 대상으로 하천 유기탄소의 유출량과 기원을 추적한 연구에서는 강수 강도 (rain intensity)가 약할 때는 주로 DOC가, 셀 때는 주로 POC가 하천을 통해 유역으로부터 빠져나가며, 강수의 세기에 따라 하천 유기물질의 기원이 급격히 달라질 수 있음을 보였다 (Jeong *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2012). 안정동위원소의 비율도 여러 하천에서 측정되어 (Table 3), 북한강 유역 내 9곳과 남한강 유역 내 7곳을 대상으로 강수 후 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 와 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 를 측정된 결과, 하천 DOC는 농업 유역에서 평균 -25.2‰ , 산림유역에서 평균 -27.3‰ 로 유의한 차이를 보였고, POC는 각각 -24.0‰ 과 -24.7‰ 로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 이들의 기원 물질로 토양과 퇴비가 제시되었다 (Kim *et al.*, 2013). 그러나, 팔당호 부근의 북한강, 남한강, 경안천이 합류하는 지역에서 2013년 5월부터 10월까지 매달 1회 채취된 시료를 대상으로 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 를 측정된 결과 $-25.3 \sim -29.5\text{‰}$ (팔당호), $-25.3 \sim -29.7\text{‰}$ (북한강), $-27.4 \sim -31.4\text{‰}$ (남한강), $-24.5 \sim -29.6\text{‰}$ (경안천)으로 비슷한 범위와 변동을 보여 담수 조류 또는 C3 계열 식물 기원을 반영하는 것으로 유추되었다 (Kim *et al.*, 2014). 이는 앞서 설명한 북한강 수

계 내 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 보다 낮은 값이며, 한강으로 유입되는 다양한 유기물질의 시공간적인 차이를 반영하는 것으로 여겨진다.

북한강 유역 내 6지점, 남한강 유역 내 12지점과 하천 오염이 상대적으로 심한 경안천을 포함한 총 19곳을 대상으로 강수와 토지이용의 영향이 소독부산물 형성에 미치는 영향을 조사한 연구에서는, 농지와 도심의 비율이 높은 하천일수록 갈수기(5월)에 DOC당 THM을 형성할 가능성(Specific THM formation potential, STHMFP)이 높았으나 풍수기(7월)에는 강우의 영향이 토지이용의 영향을 넘어설 수 있음을 보여주었다(Hur *et al.*, 2014). 우리나라 5대강의 하류 지점에서 2012~2103년에 계절별로 채취된 하천 시료를 대상으로 형광특성을 조사한 연구에서도 여름철 강수, 특히 태풍과 같은 강도 높은 강수 후에는 육상 기원 유기물의 양이 급격히 높아질 수 있음을 보여주었다(Shin *et al.*, 2016).

우리나라 하천을 대상으로 한 DOC와 POC 연구를 종합하면, 하천 유기탄소의 농도 측정 외에 $\delta^{13}\text{C}$ 와 형광스펙트럼을 이용하여 유기물질의 기원을 추정하는 연구가 수행되었고, 이와 함께 유기물질의 형광 특성이나 흡광 특성을 이용한 센서를 사용하여(예: FDOM sensor, UV-Vis sensor) 유기물질의 농도를 연속적으로 추정하기 위한 연구도 진행되었다(Jeong *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2015). 그러나, 유기탄소가 수생태계의 기능에 미치는 중요성에도 불구하고 가속기질량분석(Accelerated mass spectrometry, AMS)을 이용한 방사성동위원소(^{14}C) 분석이나 초고분해능 질량분석기(FT-ICR mass spectrometry)와 같은 첨단 분석 기법을 활용하여 국내 하천 유기물의 기원과 생지화학적 특성을 면밀히 분석한 논문은 거의 없다. 하천 유기탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 범위가 대체로 수십‰인 반면, $\Delta^{14}\text{C}$ 는 수백‰을 넘을 수 있기 때문에 유기물 기원, 특히 지질화학적 오렌 시간을 거치며 ^{14}C 이 사라진 석유 화합물 추적에 유리하므로(Raymond and Bauer, 2001; Griffith *et al.*, 2009), 형광스펙트럼과 초고분해능 질량분석기 분석과 함께 동위원소 분석을 활용함으로써(Singer *et al.*, 2012; Stubbins *et al.*, 2014) 수체 내 유기물질의 기원, 분해도, 반응성을 종합적으로 조망하는 연구가 이어지길 기대한다.

결론과 제언

하천이 차지하는 면적은 전체 육지 면적의 약 0.5%에 불과하지만, 하천은 유역 환경의 변화를 집약적으로 반영하는 지표일 뿐만 아니라 자체 내에서 다양한 생지화학적 반응이 일어나는 장소이기도 하다. 하천을 통해 바다로 유

출되는 탄소량을 NEP에서 빼주지 않으면 생태계 내 저장될 수 있는 탄소량이 과다 산정될 수 있기 때문에 하천을 통한 탄소 유출량을 정확히 추정할 필요가 있다. 전 세계적으로 하천에 의해 바다로 유출되는 총 탄소량은 보수적으로 추정할 경우 약 0.8 Pg yr^{-1} 부터 많게는 약 1.5 Pg yr^{-1} 로 추정되며, 하천과 호소로부터 대기로 빠져나가는 양이 최대 약 2.1 Pg yr^{-1} , 하천과 호소 바닥에 침적되는 양은 약 0.6 Pg yr^{-1} 로 추정된다. 하천 탄소의 유출량과 이동량을 추정하는 연구와 더불어, 하천 탄소의 각 성상별 기원과 반응성을 파악하고 지역적, 또는 전 지구적 탄소순환 모델에 적용시키기 위한 연구도 늘어나고 있다.

우리나라의 하천 탄소에 대한 연구는 주로 수질과 관련된 유기탄소에 집중된 편이며, $\delta^{13}\text{C}$ 와 형광스펙트럼을 이용하여 기원을 추적한 여러 논문이 발표되었으나, ^{14}C 분석이나 초고분해능 질량 분석기 등의 첨단 분석 기법을 활용한 연구는 거의 없다. 우리가 바라보는 햇빛이 약 8분 전에 태양을 출발해서 지금 우리에게 도달한 것처럼, 하천수를 구성하는, 탄소를 포함한 여러 성분은 각각 다른 공간과 다른 시간을 거친 물질이다. ^{14}C 분석을 이용한 탄소 연대 측정이나 초고분해능 질량 분석은 하천 탄소의 기원과 변화 과정을 기존의 분석 방법에 비하여 정교하게 유추할 수 있도록 돕는 유용한 도구로, 이를 활용한 하천 탄소 연구가 앞으로 이어지길 기대한다.

오랜 기간에 걸쳐 축적된 자료는 과학적인 정책을 도출하고 실행하기 위한 바탕이 된다(Likens *et al.*, 1996; Likens, 2010). 하천의 일유량(daily flow)과 구성 성분의 농도 자료가 잘 관리된 미국의 경우(<http://waterdata.usgs.gov/nwis>), 지질조사국(US Geology Survey, USGS)에서 하천수의 주요 성분(무기탄소 포함)을 이미 약 100년 전부터 측정하였고(Dole, 1909; Clarke, 1924), 이처럼 장기적인 측정을 통해 얻어진 자료는 기후변화와 인간의 토지 이용이 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 파악하는 데 활용되고 있다(Raymond *et al.*, 2008). 우리나라 정부 주도로 수질측정망 같은 시스템을 갖추고 하천수의 성분을 분석하고 정리하는 것도 중요하지만, 개별연구진에 의해 얻어진 현장 측정 자료를 한 곳에 모아 체계적으로 정리, 공개하고, 이를 쉽게 활용할 수 있는 시스템(예: 국가지원을 받은 연구과제를 수행하며 얻은 측정 자료를 쉽게 찾을 수 있는 시스템)을 갖추으로써, 현장에서 어렵게 얻은 자료의 이용 효율성을 높일 필요가 있다.

하천수의 수질 측정 항목도 확대되길 바란다. 현재 환경부 수질 측정망에서 측정하고 있는 항목에는 영양염류와 중금속, 유기/무기 독성 물질이 포함되지만, 하천수의 주요 성분(예: 알칼리도, 양이온, 음이온, SiO_2)은 포함되어 있지

않고 총 유기탄소도 DOC와 POC별로 나뉘어져 있지 않다. 인간의 토지 이용과 기후변화의 영향으로 인한 물순환과 탄소순환 동태의 변화는 하천의 총 탄소 함량뿐만 아니라 DIC, DOC, POC의 비율에도 변화를 불러올 것으로 예상되며, 이들과 함께 수체 내에서 이동하는 다양한 유기/무기 오염물질의 양과 분해도에도 영향을 줄 수 있으므로 하천 탄소의 성상별 양과 특성에 대해 자료를 모으는 것은 수생태계 보호 측면에서도 중요하다. 하천 성분의 변화는 유역의 변화를 집약적으로 보여줄 수 있는 지표인 만큼, 먼저 주요 하천을 대상으로라도 하천수 주요 성분의 농도를 성상별로 측정하고, 일유량 자료와 함께 꾸준히 관리하며 연구진의 접근성을 높이면, 현재대뿐만 아니라 후세에 계도, 환경의 변화를 추적하고 과학적인 생태계 관리 방안을 도출하는 데 있어 보물 같은 자료가 될 것이다.

적 요

하천이 차지하는 면적은 전체 육지 면적의 약 0.5%에 불과하지만, 하천수의 조성은 유역 환경의 생지화학적 변화를 집약적으로 반영하는 지표가 될 수 있다. 하천 탄소의 농도는 수질과 직접적인 관련이 있고, 또한, 하천을 통해 바다로 유출되는 탄소량을 순 생태계 생산량(NEP)에서 빼주지 않으면 생태계 내 저장될 수 있는 탄소량이 과다 산정될 수 있기 때문에 하천의 탄소 유출량을 정확히 추정하려는 연구가 꾸준히 이뤄지고 있다. 전 세계적으로 하천을 통해 바다로 유출되는 총 탄소량은 약 $0.8\sim 1.5 \text{ Pg yr}^{-1}$, 수체로부터 대기로 빠져나가는 양이 약 $0.62\sim 2.1 \text{ Pg yr}^{-1}$ 로 추정된다. 우리나라의 하천 탄소에 대한 연구는 주로 수질과 관련된 유기탄소에 집중된 편이며, 농도, $\delta^{13}\text{C}$, 형광스펙트럼 분석 결과 강수량과 강수 세기 등 시간에 따른 차이와 토지 이용 등 공간적인 차이에 따라 다양한 성상의 탄소가 하천으로 유입되는 것으로 여겨진다. 인간의 토지 이용과 기후변화의 영향으로 인한 탄소순환 동태의 변화는 하천의 총 탄소 함량뿐만 아니라 DIC, DOC, POC의 비율에도 변화를 불러오고, 이들과 함께 수체 내에서 이동하는 다양한 유기/무기 오염물질의 양과 분해도에도 영향을 줄 수 있다. 따라서, 기존의 분석 방법에 더해 탄소연대 측정과 초고분해능 질량 분석 등의 방법을 활용하여 하천 탄소의 기원, 변화, 분해 과정을 면밀히 유추하는 연구가 필요하다. 장기적으로, 넓은 유역을 대상으로 얻어진 하천 탄소의 성상별 농도와 일유량 자료는 유역 생태계의 변화를 추적하고, 자연적인 또는 인간에 의한 교란 때문에 일어나는 환경 변화를 예측하는 데 유용하게 쓰일 수 있다. 현재

정부가 운영 중인 수질측정망을 대상으로, 알칼리도를 포함한, 하천 탄소의 성상별 농도가 분석 항목에 추가되고, 일유량 자료와 개별 연구진이 얻은 연구결과를 포함하는 데이터베이스가 구축되어, 이러한 자료가 보다 효율적으로 활용될 수 있기를 바란다.

사 사

이 연구는 2011~2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0024706).

REFERENCES

- Aitkenhead, J.A. and W.H. McDowell. 2000. Soil C : N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales. *Global Biogeochemical Cycles* **14**: 127-138.
- Amiotte Suchet, P. and J.L. Probst. 1995. A global model for present-day atmospheric/soil CO₂ consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO₂). *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* **47**: 273-280.
- Amiotte Suchet, P., J.L. Probst and W. Ludwig. 2003. Worldwide distribution of continental rock lithology: Implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles* **17**.
- Aufdenkampe, A.K., E. Mayorga, P.A. Raymond, J.M. Melack, S.C. Doney, S.R. Alin, R.E. Aalto and K. Yoo. 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment* **9**: 53-60.
- Battin, T.J., S. Luysaert, L.A. Kaplan, A.K. Aufdenkampe, A. Richter and L.J. Tranvik. 2009. The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience* **2**: 598-600.
- Berner, R.A. 1982. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean: Its geochemical and environmental significance. *American Journal of Science* **282**: 451-473.
- Berner, R.A., A.C. Lasaga and R.M. Garrels. 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon-dioxide over the past 100 million years. *American Journal of Science* **283**: 641-683.
- Butman, D. and P. Raymond. 2011. Significant efflux of carbon dioxide from streams and rivers in the United States. *Nature Geoscience* **4**: 839-842.
- Butman, D., S. Stackpoole, E. Stets, C.P. McDonald, D.W. Clow and R.G. Striegl. 2016. Aquatic carbon cycling in the conterminous United States and implications for terrestrial carbon accounting. *Proceedings of the National Academy*

- of *Sciences of the United States of America* **113**: 58-63.
- Canadell, J.G., C. Le Quere, M.R. Raupach, C.B. Field, E.T. Buitenhuis, P. Ciais, T.J. Conway, N.P. Gillett, R.A. Houghton, and G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**: 18866-18870.
- Clark, I.D. and P. Fritz. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Clarke, F.W. 1924. The Composition of the River and Lake Waters of the United States. United States Geological Survey Professional Paper 135. Government Printing Office, Washington, DC.
- 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**: 172-185.
- Cory, R.M., C.P. Ward, B.C. Crump and G.W. Kling. 2014. Sunlight controls water column processing of carbon in arctic fresh waters. *Science* **345**: 925-928.
- Dole, R.B. 1909. The Quality of Surface Waters in the United States. Part I. - Analyses of Waters East of the One Hundred Meridian. USGS Water-Supply Paper 236. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Dürr, H.H., M. Meybeck and S.H. Dürr. 2005. Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. *Global Biogeochemical Cycles* **19**.
- Dürr, H.H., M. Meybeck, J. Hartmann, G.G. Laruelle and V. Roubeix. 2011. Global spatial distribution of natural riverine silica inputs to the coastal zone. *Biogeosciences* **8**: 597-620.
- Gaillardet, J., B. Dupre, P. Louvat and C.J. Allegre. 1999. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology* **159**: 3-30.
- Gal, J.-K., M.-S. Kim, Y.-J. Lee, J. Seo and K.-H. Shin. 2012. Foodweb of aquatic ecosystem within the Tamjin River through the determination of carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Korean Journal of Limnology* **45**: 242-251.
- Galy, V., C. France-Lanord, O. Beyssac, P. Faure, H. Kudrass and F. Pálhol. 2007. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system. *Nature* **450**: 407-410.
- Galy, V., B. Peucker-Ehrenbrink and T. Eglinton. 2015. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *Nature* **521**: 204-207.
- Griffith, D.R., R.T. Barnes and P.A. Raymond. 2009. Inputs of fossil carbon from wastewater treatment plants to US rivers and oceans. *Environmental Science & Technology* **43**: 5647-5651.
- Hartmann, J., N. Jansen, H.H. Duerr, S. Kempe and P. Koehler. 2009. Global CO₂-consumption by chemical weathering: What is the contribution of highly active weathering regions? *Global and Planetary Change* **69**: 185-194.
- Holland, H.D. 1978. The chemistry of the atmosphere and oceans. Wiley, New York.
- Hong, S.U. 1969. Limnological comparison of the South and North-Han River. *Korean Journal of Limnology* **2**: 51-67.
- Hotchkiss, E.R., R.O. Hall, R.A. Sponseller, D. Butman, J. Klaminder, H. Laudon, M. Rosvall and J. Karlsson. 2015. Sources of and processes controlling CO₂ emissions change with the size of streams and rivers. *Nature Geoscience* **8**: 696-699.
- Houghton, R.A. 2014. The contemporary carbon cycle, In: *Treatise on Geochemistry* 2nd ed. (Holland, H.D. and K.K. Turekian, eds.). Elsevier, San Diego.
- Huang, T.H., Y.H. Fu, P.Y. Pan and C.T.A. Chen. 2012. Fluvial carbon fluxes in tropical rivers. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **4**: 162-169.
- Hur, J., N. Hang Vo-Minh and B.-M. Lee. 2014. Influence of upstream land use on dissolved organic matter and trihalomethane formation potential in watersheds for two different seasons. *Environmental Science and Pollution Research* **21**: 7489-7500.
- Jeong, J.J., S. Bartsch, J.H. Fleckenstein, E. Matzner, J.D. Tenhunen, S.D. Lee, S.K. Park and J.H. Park. 2012. Differential storm responses of dissolved and particulate organic carbon in a mountainous headwater stream, investigated by high-frequency, in situ optical measurements. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* **117**.
- Jobbagy, E.G. and R.B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* **10**: 423-436.
- Jung, B.J., H.J. Lee, J.J. Jeong, J. Owen, B. Kim, K. Meusburger, C. Alewell, G. Gebauer, C. Shope and J.H. Park. 2012. Storm pulses and varying sources of hydrologic carbon export from a mountainous watershed. *Journal of Hydrology* **440**: 90-101.
- Jung, B.J., J.K. Lee, H. Kim and J.H. Park. 2014. Export, biodegradation, and disinfection byproduct formation of dissolved and particulate organic carbon in a forested headwater stream during extreme rainfall events. *Biogeosciences* **11**: 6119-6129.
- Kim, J.-K., S. Jung, J.-S. Eom, C. Jang, Y. Lee, J.S. Owen, M.-S. Jung and B. Kim. 2013. Dissolved and particulate organic carbon concentrations in stream water and relationships with land use in multiple-use watersheds of the Han River (Korea). *Water International* **38**: 326-339.
- Kim, K.-H. and E.-S. Shim. 2001. Geochemical characteristics and origin of dissolved ions in the Han River water. *Economic and Environmental Geology* **34**: 539-553.
- Kim, M.-S., J.-M. Kim, J.-Y. Hwang, B.-K. Kim, H.-S. Cho, S.J. Youn, S.-y. Hong, O.-S. Kwon and W.-S. Lee. 2014. De-

- termination of the origin of particulate organic matter at the Lake Paldang using stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$). *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 127-134.
- Kim, S.J., J. Kim and K. Kim. 2010. Organic carbon efflux from a deciduous forest catchment in Korea. *Biogeosciences* **7**: 1323-1334.
- Kokic, J., M.B. Wallin, H.E. Chmiel, B.A. Denfeld and S. Sobek. 2015. Carbon dioxide evasion from headwater systems strongly contributes to the total export of carbon from a small boreal lake catchment. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* **120**: 13-28.
- Lauerwald, R., G.G. Laruelle, J. Hartmann, P. Ciais and P.A.G. Regnier. 2015. Spatial patterns in CO_2 evasion from the global river network. *Global Biogeochemical Cycles* **29**: 534-554.
- Lee, E.J., G.Y. Yoo, Y. Jeong, K.U. Kim, J.H. Park and N.H. Oh. 2015. Comparison of UV-VIS and FDOM sensors for in situ monitoring of stream DOC concentrations. *Biogeosciences* **12**: 3109-3118.
- Lee, K.S., J.S. Ryu, K.H. Ahn, H.W. Chang and D. Lee. 2007. Factors controlling carbon isotope ratios of dissolved inorganic carbon in two major tributaries of the Han River, Korea. *Hydrological Processes* **21**: 500-509.
- Lee, Y.-J., B.-K. Jeong, Y.-S. Shin, S.-H. Kim, and K.-H. Shin. 2013. Determination of the origin of particulate organic matter at the estuary of Youngsan River using stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$). *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 175-184.
- Likens, G.E. 2010. The role of science in decision making: does evidence-based science drive environmental policy? *Frontiers in Ecology and the Environment* **8**: E1-E9.
- Likens, G.E., C.T. Driscoll and D.C. Buso. 1996. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. *Science* **272**: 244-246.
- Ludwig, W., J.L. Probst and S. Kempe. 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* **10**: 23-41.
- Mayorga, E., A.K. Aufdenkampe, C.A. Masiello, A.V. Krusche, J.I. Hedges, P.D. Quay, J.E. Richey and T.A. Brown. 2005. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. *Nature* **436**: 538-541.
- Meybeck, M. 1987. Global chemical-weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science* **287**: 401-428.
- Meybeck, M. 2004. Global occurrence of major elements in rivers, *In: Treatise on Geochemistry* (Holland, H.D. and K.K. Turekian, eds.). Elsevier, San Diego.
- Oh, N.H. 2014. The effects of elevated atmospheric CO_2 on chemical weathering of forest soils. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**: 169-180.
- Oh, N.H., M. Hofmockel, M.L. Lavine and D.D. Richter. 2007. Did elevated atmospheric CO_2 alter soil mineral weathering?: an analysis of 5-year soil water chemistry data at Duke FACE study. *Global Change Biology* **13**: 2626-2641.
- Oh, N.H., B.A. Pellerin, P.A.M. Bachand, P.J. Hernes, S.M. Bachand, N. Ohara, M.L. Kavvas, B.A. Bergamaschi and W.R. Horwath. 2013. The role of irrigation runoff and winter rainfall on dissolved organic carbon loads in an agricultural watershed. *Agriculture Ecosystems & Environment* **179**: 1-10.
- Oh, N.H. and D.D. Richter. 2004. Soil acidification induced by elevated atmospheric CO_2 . *Global Change Biology* **10**: 1936-1946.
- Raymond, P.A. and J.E. Bauer. 2001. Use of ^{14}C and ^{13}C natural abundances for evaluating riverine, estuarine, and coastal DOC and POC sources and cycling: a review and synthesis. *Organic Geochemistry* **32**: 469-485.
- Raymond, P.A., J. Hartmann, R. Lauerwald, S. Sobek, C. McDonald, M. Hoover, D. Butman, R. Striegl, E. Mayorga, C. Humborg, P. Kortelainen, H. Duerr, M. Meybeck, P. Ciais and P. Guth. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* **503**: 355-359.
- Raymond, P.A., N.H. Oh, R.E. Turner, W. Broussard. 2008. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River. *Nature* **451**: 449-452.
- Regnier, P., P. Friedlingstein, P. Ciais, F.T. Mackenzie, N. Gruber, I.A. Janssens, G.G. Laruelle, R. Lauerwald, S. Luysaert, A.J. Andersson, S. Arndt, C. Arnosti, A.V. Borges, A.W. Dale, A. Gallego-Sala, Y. Godderis, N. Goossens, J. Hartmann, C. Heinze, T. Ilyina, F. Joos, D.E. LaRowe, J. Leifeld, F.J.R. Meysman, G. Munhoven, P.A. Raymond, R. Spahni, P. Suntharalingam and M. Thullner. 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience* **6**: 597-607.
- Richey, J.E. 2004. Pathways of atmospheric CO_2 through fluvial systems, pp. 329-340. *In: The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World* (Field, C.B. and M.R. Raupach, eds.). Island Press, Washington, DC.
- Richey, J.E., J.T. Brock, R.J. Naiman, R.C. Wissmar and R.F. Stallard. 1980. Organic carbon: Oxidation and transport in the Amazon River. *Science* **207**: 1348-1351.
- Richey, J.E., J.M. Melack, A.K. Aufdenkampe, V.M. Ballester and L.L. Hess. 2002. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO_2 . *Nature* **416**: 617-620.
- Richter, D.D., D. Markewitz, S.E. Trumbore and C.G. Wells. 1999. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature* **400**: 56-58.
- Roth, J. 1879. Allgemeine und chemische Geologie Band 1: Bildung und Umbildung der Mineralien - Quell-, Fluss-, und Meerwasser. Verlag von Wilhelm Hertz. Berlin.
- Ryu, J.S., H.W. Chang and K.S. Lee. 2008. Hydrogeochemistry and isotope geochemistry of the Han River system: A summary. *Journal of the Geological Society of Korea* **44**:

- 467-477.
- Schlesinger, W.H. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potential of soils. *Nature* **348**: 232-234.
- Schlesinger, W.H. and E.S. Bernhardt. 2013. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. Academic Press, San Diego, California.
- Schlesinger, W.H. and J.M. Melack. 1981. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus* **33**: 172-187.
- Shin, W.J., G.S. Chung, D. Lee and K.S. Lee. 2011a. Dissolved inorganic carbon export from carbonate and silicate catchments estimated from carbonate chemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. *Hydrology and Earth System Sciences* **15**: 2551-2560.
- Shin, W.J., K.S. Lee, Y. Park, D. Lee and E.J. Yu. 2015. Tracing anthropogenic DIC in urban streams based on isotopic and geochemical tracers. *Environmental Earth Sciences* **74**: 2707-2717.
- Shin, W.J., J.S. Ryu, Y. Park and K.S. Lee. 2011b. Chemical weathering and associated CO_2 consumption in six major river basins, South Korea. *Geomorphology* **129**: 334-341.
- Shin, Y., E.J. Lee, Y.J. Jeon, J. Hur and N.H. Oh. 2016. Hydrological changes of DOM composition and biodegradability of rivers in temperate monsoon climates. *Journal of Hydrology* **540**: 538-548.
- Singer, G.A., C. Fasching, L. Wilhelm, J. Niggemann, P. Steier, T. Dittmar and T.J. Battin. 2012. Biogeochemically diverse organic matter in Alpine glaciers and its downstream fate. *Nature Geoscience* **5**: 710-714.
- Stubbins, A., J.F. Lapierre, M. Berggren, Y.T. Prairie, T. Dittmar and P.A. del Giorgio. 2014. What's in an EEM? Molecular Signatures Associated with Dissolved Organic Fluorescence in Boreal Canada. *Environmental Science & Technology* **48**: 10598-10606.
- Stumm, W. and J.J. Morgan. 1996. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. Wiley, New York.
- Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhi-tova and S. Zimov. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* **23**.
- Tranvik, L.J., J.A. Downing, J.B. Cotner, S.A. Loiselle, R.G. Striegl, T.J. Ballatore, P. Dillon, K. Finlay, K. Fortino, L.B. Knoll, P.L. Kortelainen, T. Kutser, S. Larsen, I. Laurion, D.M. Leech, S.L. McCallister, D.M. McKnight, J.M. Melack, E. Overholt, J.A. Porter, Y. Prairie, W.H. Renwick, F. Roland, B.S. Sherman, D.W. Schindler, S. Sobek, A. Tremblay, M.J. Vanni, A.M. Verschoor, E. von Wachenfeldt and G.A. Weyhenmeyer. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography* **54**: 2298-2314.
- Wallin, M.B., T. Grabs, I. Buffam, H. Laudon, A. Agren, M.G. Oquist and K. Bishop. 2013. Evasion of CO_2 from streams - The dominant component of the carbon export through the aquatic conduit in a boreal landscape. *Global Change Biology* **19**: 785-797.
- Xie, Y.F. 2004. Disinfection Byproducts in Drinking Water: Formation, Analysis, and Control. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Yoo, S., D.A. Kwak, G. Cui, W.K. Lee, H. Kwak, A. Ito, Y. Son and S. Jeon. 2013. Estimation of the ecosystem carbon budget in South Korea between 1999 and 2008. *Ecological Research* **28**: 1045-1059.
- Yoon, T.K., H. Jin, N.H. Oh and J.H. Park. 2016. Technical note: Assessing gas equilibration systems for continuous pCO_2 measurements in inland waters. *Biogeosciences* **13**: 3915-3930.
- Yu, J.-Y., I.-K. Choi and H.-S. Kim. 1994. Geochemical characteristics of the surface water depending on the bed rock types in the Chuncheon area. *Journal of Geological Society of Korea* **30**: 307-324.
- Zhao, M.S. and S.W. Running. 2010. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science* **329**: 940-943.