



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

한국의 강을 통한 탄소 유출

2013년 2월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과
이 은 주

한국의 강을 통한 탄소 유출

지도교수 오 능 환

이 논문을 도시계획학 석사학위 논문으로 제출함
2012년 10월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과
이 은 주

이은주의 도시계획학 석사 학위논문을 인준함
2012년 12월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

산업혁명 이후 대기 중 이산화탄소 농도는 급격히 증가하고 있고, 이에 따라 전 지구적 탄소 순환에 대한 관심이 증가하고 있다. 강은 주요 탄소저장고로 일컬어지는 육지와 해양을 잇는 연결자로서 중요한 역할을 하며, 비록 강을 통한 탄소 유출량이나 강물에 존재하는 탄소의 양의 절대량은 작지만 이는 순 생태계 생산량 (NEP: Net Ecosystem Production)과 비교할만한 양으로 전 지구적 탄소 순환에서 중요히 여겨진다.

이 연구의 목적은 우리나라의 5대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강)을 통해 유출되는 탄소량을 정량적으로 계산하여 공간적 분포를 나타내고, 토지이용, 강수량, 토양특성이 이에 얼마나 영향을 미치는지 이해하는 것이다. 이를 위해 수질측정망(일반측정망, 총량측정망)을 통해 측정되는 총 유기탄소(TOC: Total organic carbon) 농도와 유량측정망에서 측정된 유량 자료를 이용하였으며, 각 강의 하류 지점에서 채취한 강물을 실험을 통해 용존 유기탄소(DOC: Dissolved organic carbon)와 용존 무기탄소(DIC: Dissolved inorganic carbon)의 농도를 측정하여 분석에 사용하였다.

우리나라 강을 통해 유출되는 TOC 농도는 계절적으로는 여름, 봄, 가을, 겨울의 순으로 높았고, 전 계절에 걸쳐 금강의 TOC농도가 가장 높았다. 또한, 강을 통한 탄소 유출의 공간적 분포에서 5대강 유역에 걸쳐 약 0.02~6.6 g의 탄소가 단위면적 당(m^{-2}) 단위시간 당(yr^{-1}) 빠져 나가는 것을 알 수 있었다. 강을 통한 탄소의 유출에 강수량, 토지이용(농업지역, 도시지역, 산림지역), 토양특성의 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 강수량이 높을수록, 도시, 농업지역의 비율이 높을수록, 산림지역의 비율이 낮을수록 단위면적당 탄소유출량이 증가했다. 5대강을 통해 단위면적당 빠져나가는 탄소의 양(yield)을 종합적으로 분석한 결과 강을 통해 유출되는 탄소의 대부분이 DIC형태로 유출되었으며 (평균 $8.2 g m^{-2} yr^{-1}$), DOC와 POC로 빠져나가는 양은 평균 $1.8 g m^{-2} yr^{-1}$, $0.9 g m^{-2} yr^{-1}$ 로 전체유출량(입자성 무기탄소(PIC)의 경우는 제외)의 약 24.5% 정도였다. 결과적으로 PIC 형태를 제외하고 우리나라의 5대강을 통해 연간 499 Gg의 탄소가 유출되는 것으로 추정되며, 이번 연구에 포

함되지 못한 북한강과 남한강 하류부분의 탄소유출량과 PIC 형태로 유출되는 탄소량까지 고려하면 우리나라의 강을 통한 탄소 유출량은 이 값보다 더 많아질 것으로 예상된다.

◆ 주요어 : 총 용존탄소, 용존 유기탄소, 용존 무기탄소, 수질측정망, 5대강, 탄소유출량

◆ 학 번 : 2011-22326

Abstract

Riverine Carbon Exports in Korea

Lee Eun Ju

Environmental management

Graduate School of Environmental Studies

Seoul National University

Since the Industrial Revolution, atmospheric CO₂ concentration has rapidly increased and this trend is expected to continue in this century, thus, many scientists focus on the global carbon cycles. Rivers play an important role as a connector of the two carbon storage, land and ocean. Although the absolute amount of carbon transported by rivers is relatively small compared to the other carbon pools and fluxes, it is comparable to the amount of Net Ecosystem Production (NEP).

The objectives of this study are to quantify riverine carbon exports (loads and yields) of the 5 major rivers (the Han River, Nakdong River, Geum River, Youngsan River, and Sumjin River) in Korea and to understand what factors influence the riverine carbon exports. The water quality data such as total organic carbon (TOC) concentration and riverine discharge data collected from 30 water stations were used. Also, water samples were collected in the lower reaches of each river from February 2012 to October 2012. The concentration of dissolved organic carbon (DOC), alkalinity, and pH were measured in laboratory.

Temporally, the TOC concentration was at the highest in summer, followed by spring, fall, and winter. Spatially, the TOC concentration was the largest in the Geum River. TOC yields ranged approximately 0.02~6.6 g m⁻² yr⁻¹ in the entire watersheds of the 5 major rivers. The amount of carbon released from watersheds was influenced by precipitation, land-use (urban, agriculture, and forest), and soil characteristics. The riverine carbon exports were positively correlated with precipitation and the percentages covered by urban or

agricultural land use, and negatively correlated with the percentage covered by forests. DIC is the dominant form of carbon that was released by the 5 major rivers. DIC yield was $8.2 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, and DOC and POC accounted for approximately 24.5% of total carbon yield, $1.8 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, and $0.9 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, respectively. In sum, these rivers released 499 Gg C to the ocean annually.

However, the data of North Han River and downstream of South Han River watersheds were not included in the study, and particulate inorganic carbon (PIC) was excluded. Thus, it is expected that more than 499 Gg carbon is annually exported by rivers to the ocean.

keywords : Total organic carbon (TOC), Dissolved organic carbon (DOC), Dissolved inorganic carbon (DIC), Water quality monitoring system, yield, load

Student Number : 2011-22326

목 차

| | |
|-------------------------------|----|
| 제 1 장 서론 | 1 |
| 제 1 절 연구 배경 및 목적 | 1 |
| 제 2 절 연구의 범위 | 4 |
| 제 3 절 연구의 방법 | 6 |
| 1) 수질측정망 데이터 활용 | 6 |
| 2) 5대강 하류 지점 샘플링 | 7 |
| 3) 데이터 처리 | 8 |
| | |
| 제 2 장 이론적 고찰 | 10 |
| 제 1 절 선행 연구 검토 | 10 |
| 제 2 절 기존 연구의 한계 및 문제점 | 13 |
| | |
| 제 3 장 연구결과 | 15 |
| 제 1 절 데이터 검토 | 15 |
| 1) 유량 자료 검토 | 15 |
| 2) TOC 농도 자료 검토 | 17 |
| 제 2 절 한국의 강에서의 유기탄소 농도 | 19 |
| 1) 일반측정망 | 19 |
| 2) 총량측정망 | 23 |
| 3) 계절별 5대강의 탄소 농도 측정 결과 | 24 |
| 제 3 절 한국의 강에서의 유기탄소 유출 | 27 |
| 1) 한국의 강에서의 유기탄소 유출량 | 27 |
| 2) 영향인자분석 | 29 |

| | |
|---------------------|----|
| 1. 토지 이용 | 29 |
| 2. 토양 | 32 |
| 3. 강수량 | 33 |
| 4. 인자별 분석 | 38 |
| | |
| 제 4 장 토의 및 결론 | 39 |
| | |
| 참고문헌 | 43 |

<표 차례>

| | |
|--|----|
| <표 1> 우리나라 5대강의 유역정보 | 4 |
| <표 2> 전지구적 규모에서 강을 통한 탄소 유출량에 대한 선행 연구 결과 · | 11 |
| <표 3> 우리나라 5대강의 총량측정망의 TOC농도와 실험을 통해 측정하 DOC농도 비교 | 18 |
| <표 4> 2007~2011년 계절별, 강별 TOC 농도 (단위: mg/L) | 22 |
| <표 5> 2009~2011년 각 년도의 4대강의 TOC 연유량가중평균농도 (단위: mg/L) | 23 |
| <표 6> 2012년 2월~10월 우리나라 5대강의 DOC, DIC 농도 (mg/L) | 24 |
| <표 7> 5대강 샘플링 지역의 토지 이용 분류(2007년 기준) | 38 |
| <표 8> 우리나라 5대강을 통해 빠져나가는 탄소 유출량(load, yield) (2012년 실험데이터 기준) | 39 |

<그림 차례>

| | |
|--|----|
| <그림 1> 전지구적인 탄소순환 | 2 |
| <그림 2> 우리나라의 토지피복도(2005년 기준) | 5 |
| <그림 3> 우리나라 5대강 실험 대상 지점 | 7 |
| <그림 4> a)금강과 b)영산강의 총량추정망의 상류부터 하류까지의 측정소에서의 연평균 유량 | 16 |
| <그림 5> 각 강별, 계절별 TOC농도(2011.01~2012.08) | 19 |
| <그림 6> 계절별 강물의 TOC 농도 분포. 왼쪽부터 (a) 2011.01~2012.08 평균, (b) 여름(6, 7, 8월), 겨울(12, 1, 2월)의 TOC 농도 평균. (단위: mg/L) | 21 |
| <그림 7> 우리나라 유역에서 빠져나가는 탄소 유출량 | 26 |
| <그림 8> a)농업, b)도시지역 토지이용비율에 따른 TOC yield와 TOC농도 변화 | 28 |
| <그림 9> 산림지역 토지이용비율에 따른 TOC yield와 TOC농도 변화 | 29 |
| <그림 10> 토양기호 raa의 토양의 분포비율에 따른 TOC yield 변화 | 30 |
| <그림 11> 2010년 5대강의 측정지점의 강수량, 유량, TOC 총유출량(load)의 월변화 | 31 |
| <그림 12> 5대강 하류에서의 강수량에 따른 TOC 농도 변화 | 32 |
| <그림 13> 5대강 하류지점에서의 강수량의 변화에 따른 유량 및 TOC 총유출량(load) 변화 | 32 |
| <그림 14> 한강(한강D)의 월평균 강수량유량, TOC 총유출량(load), TOC 농도 변화 (2010년) | 33 |
| <그림 15> (a)금강(금본I), (b)섬진강(섬본D)의 월평균 강수량, 유량, TOC 총유출량(load), TOC 농도 변화 (2010년) | 34 |
| <그림 16> a)영산강(영본C), b)낙동강(낙본G)의 월평균 강수량, 유량, TOC 총유출량(load), TOC 농도 변화 (2010년) | 35 |

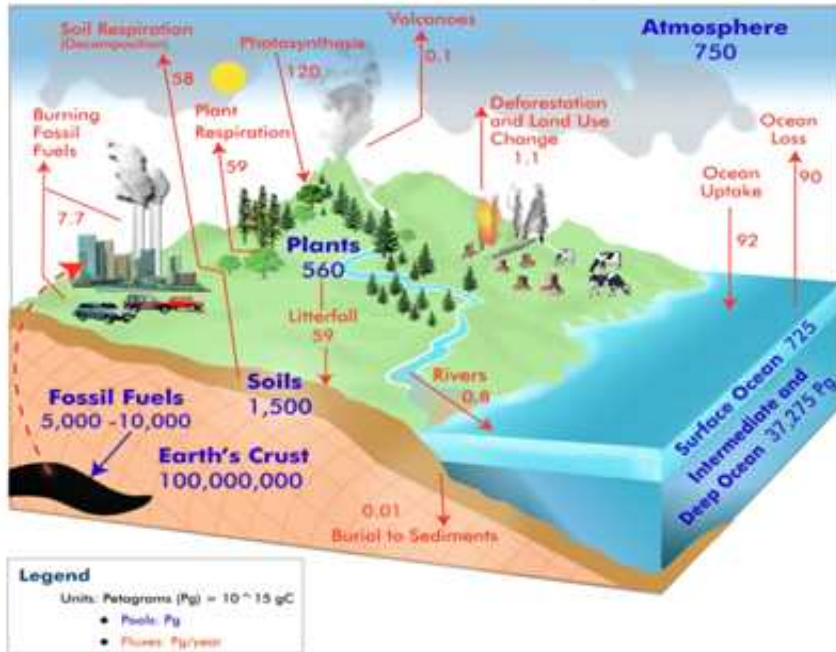
제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경 및 목적

대기 중 이산화탄소 농도는 산업혁명 이전 약 280 ppm에서 2012년 약 390ppm까지 유례없이 급격히 증가하고 있고, 이로 인해 발생할 수 있는 생태계의 여러 가지 변화에 대해 많은 사람들이 관심을 갖고 있다. 특히, 이산화탄소를 포함하는 여러 탄소화합물의 전 지구적인 순환에 대한 연구자들의 관심 또한 증가하고 있다.

대기 중 탄소는 단기적으로 광합성 작용을 통해 식물에 고정되고, 식물이나 동식물의 호흡에 의해 다시 대기 중으로 방출되는 순환 과정을 거친다(Schlesinger, 1997; Berner, 2003). 그리고 장기적으로는 대기 중에서 비롯된 탄소는 식물, 토양, 토양수, 지하수 및 강을 통해 바다로 빠져나간 후, 해저에 침적되었다가 화산 활동으로 인해 다시 대기 중으로 방출되는 하나의 큰 순환 고리를 가지는데(Schlesinger, 1997; Berner, 2003), 이 때, 강은 두 가지 주요 탄소 저장고인 육상과 바다를 이어주며, 해양에서의 탄소저장과 순환에 영향을 미친다(Mayorga et al., 2005; Cole et al., 2007). 이렇게 강을 통해 육지에서 나온 용존탄소의 양(0.8 Pg C yr^{-1})은 대기(750 Pg C), 해양(38000 Pg C), 토양 (1500 Pg C) 등 각 시스템에서의 탄소의 양과 플럭스에 비하면 상당히 적은 수준이지만(Schlesinger, 1997), 이는 광합성으로 환원된 탄소 중 산화되지 않고 생태계에 남는 양인 “순 생태계 생산량 (NEP: Net Ecosystem Production)”과 비교할 만한 수치로 전 지구적인 탄소순환(그림 1)에서 중요한 의미를 가진다(Cole et al., 2007).

Global Carbon Cycle



Copyright 2010 US DOE Carbon Cycle Project, a collaborative project between the University of New Hampshire, Charles University and the US DOE Program Office. Data Sources: Adapted from Houghton, R.A. Balancing the Global Carbon Budget. Atmos. Res. Earth Planet. Sci. 957 30 (13-347) adjusted emissions values are from the Global Carbon Project Carbon Budget 2008

그림 1. 전 지구적인 탄소순환(<http://serc.carleton.edu/earthlabs/climate/6.html>)
 파란색으로 표시된 숫자는 전 지구적인 규모에서의 탄소의 pool(단위: Pg)을 나타내며, 빨간색 화살표와 숫자는 탄소의 이동(flux, 단위: Pg/yr)를 나타낸다.

강을 통해 육지에서 바다로 빠져나가는 탄소는 용존 유기탄소(DOC: Dissolved organic carbon), 용존 무기탄소(DIC: Dissolved inorganic carbon), 입자성 유기탄소(POC: Particulate organic carbon), 입자성 무기탄소(PIC: Particulate inorganic carbon)로 나뉜다. 이 중, DIC는 주로 토양이나 암석(탄산염 혹은 규산염)이 대기 중에서 비롯된 탄산과의 반응에 의해 생성되며(Suchet et al., 2003; Yao and Gao, 2006), PIC는 주로 암석의 물리적인 침식에 의해 생성된다(Meybeck, 1993; Ludwig et al., 1996). 또한, DOC는 토양에서의 용탈이나 오염 물질에 기원하며(Meybeck, 1993), POC는 주로 암석이나 토양의 부식, 낙엽이나 식물의 잔해에서 비롯되는 것으로 알려져 있다(Meybeck, 1993;

Alvarez-Cobelas et al., 2012). 즉, 탄소의 용출 형태 및 그 양은 각각 그 지역의 암석, 토양 특성, 토지 이용, 기후 등의 영향을 받게 된다 (Meybeck, 1993; Ludwig et al., 1996; Galy and France-Lanord, 1999; Aitkenhead and McDowell, 2000; Alvarez-Cobelas et al., 2012).

이렇듯 강에서의 탄소 유출에 대한 연구는 전지구적인 혹은 각 나라의 큰 강들을 대상으로 현재 세계 각지에서 비교적 활발히 이루어지고 있는데 반해 우리나라의 경우 강을 통해 빠져 나가는 탄소 유출에 대한 연구는 상대적으로 매우 적으며(Ryu et al., 2008; Shin et al., 2011a; Shin et al., 2011b), 대부분의 연구가 한강을 대상으로 하는 경우에 그쳐 있다.

따라서 이 연구의 목표는 (1) 한국의 강을 통해 빠져나가는 탄소의 양을 가능한 많은 실측 데이터(특히, 용존 탄소 농도와 유량)를 바탕으로 계산하여 보다 정량적이고 정확한 수치를 제시하고, (2) 강을 통해 유출되는 탄소량의 시공간적 변화를 추적하며, (3) 데이터를 다양한 요인(기후인자, 토양 특성, 토양 이용, 모암 등)들을 기준으로 해석하여 각 요인들이 강을 통해 빠져 나가는 탄소의 농도와 양에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

우리나라의 강에서 빠져나가는 탄소를 정량적으로 제시하는 이번 연구를 통해, 앞으로 기후변화나 토지이용 변화에 따른 탄소 유출량의 변화를 보다 정확히 예측하는데 활용될 수 있다. 또한, 이렇게 예측된 강을 통한 탄소 유출량은 그 강에 해당하는 유역의 탄소 순환을 집약적으로 보여 줄 수 있으므로 유역의 오염총량관리(TMDL: Total Maximum Daily Load)등 수질 관리적 측면뿐만 아니라 토지 이용과 관련된 여러 정책적 판단의 과학적 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

제 2 절 연구의 범위

한국은 유라시아 대륙 동쪽 끝에 위치한 반도로, 1981~2010년의 데이터를 기준으로 연평균기온 약 10~15도(여름(8월)의 경우, 23~26도, 겨울(1월)의 경우 -6~3도)로 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절이 뚜렷이 구분되는 중위도 온대성 기후를 띤다¹⁾. 연 강수량은 지역에 따라 조금씩 다르지만 대체로 약 1000~1900mm의 강수량을 가지며, 그 중 60% 정도가 여름에 집중해서 내린다. 또한 습도는 연중 60~75%정도이다²⁾. 특히 우리나라는 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강의 5개의 강이 국토면적의 약 70%에 걸쳐 흐르고 있는데 각 강의 유역 정보는 다음과 같다(표13).

표 1. 우리나라 5대강의 유역 정보

| | 유역 면적 (km ²) | 유로 연장 (km) | 1966~2009 년 평균강우량 (mm) | 유량 (2006.11) | 유량 (2007.08) |
|-----|-----------------------------|---------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| 한강 | 26356 | 482.98 | 1,246.50 | 429 | 1983 |
| 낙동강 | 23817 | 511.01 | 1,166.60 | 388 | 1398 |
| 금강 | 9912 | 388.45 | 1,221.20 | 382 | 570 |
| 섬진강 | 4912 | 222.05 | 1,420.50 | 16 | 210 |
| 영산강 | 3455 | 134.95 | 1,313.00 | 14.3 | 161 |

한강(Han River: HR)의 경우 우리나라에서 가장 큰 강으로 한국의 수도권 서울과 수도권을 관통하여 서해로 흐르며 많은 인구가 거주하고 있다(2009년 기준 약 2029만명). 낙동강(Nakdong River: NR)은 우리나라

1) 기상청, 우리나라 기후, www.kma.go.kr

2) 기상청, 우리나라 기후, www.kma.go.kr

3) Shin, W.J., Ryu, J.S., Park, Y., Lee, K.S., 2011b. Chemical weathering and associated CO₂ consumption in six major river basins, South Korea. *Geomorphology* 129, 334-341.

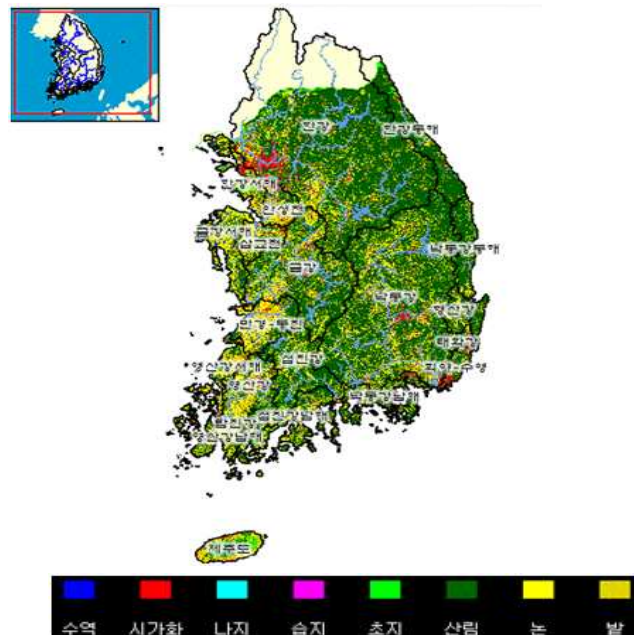
국가 수자원 관리 종합 정보 시스템, www.wamis.go.kr

한국수자원공사, www.kwater.or.kr

라를 남북으로 가로질러 남해로 흐르는데, 곳곳에 시가화된 지역을 지난다. 금강(Geum River: GR)의 경우 대전을 지나며 서해로 흐르는데 강의 중, 하류가 농업지역을 통과한다. 또한, 영산강(Youngsan River: YR)의 경우 유역의 30%가 농업지역, 50%이상이 산림지역이며, 섬진강(Sumjin River: SR)의 경우 시가화된 지역이 가장 적고, 산림지역이 유역의 대부분(70%)을 차지한다(그림 2).

한국의 지질은 낙동강과 섬진강 유역이 고생대와 신생대의 쇠설성 퇴적암이나 화산암으로 이루어진 것을 제외하고는 대부분 캄브리아기 편마암과 중생대 화강암, 석회암으로 구성되어 있다(Shin et al., 2011b).

이렇듯 5대 강의 유역은 우리나라 전체 유역 넓이의 약 70%를 차지할 뿐만 아니라, 이 유역들의 지리적, 환경적, 사회적 특징이 각기 달라, 이 유역들에서 흘러나오는 탄소의 양을 정량적으로 분석하고, 이에 영향을 미치는 인자들을 분석하는 것은 한국에서의 강을 통한 탄소 유출을 이해하는데 중요하다.



제 3 절 연구의 방법

1) 수질측정망 데이터 활용

우리나라는 전국의 강과 하천을 대상으로 수질 측정망을 설치하여 하천, 호소, 지하수, 침전물 등의 화학적 성분을 분석하고 있는데, 이러한 수질측정망은 크게 환경부 산하의 여러 기관(지방 유역 환경청, 4대강 물환경 연구소, 한국 수자원공사 등)에서 하천, 호소 등의 공공 수역을 대상으로 수질을 측정하기 위한 일반 측정망과, 오염총량관리 단위유역에 필요한 유량 및 수질정보를 측정하기 위한 총량 측정망 등으로 나뉜다. 일반측정망의 경우 지난 2011년부터 1년에 12회 이상 하천수의 총유기탄소(TOC: Total organic carbon = DOC + POC)농도를 측정하고 있으며, 총량 측정망의 경우 2007년부터 일부 측정망에 대해 TOC항목도 추가하여 수질 측정 및 유량 측정을 실시한 이래로, 대상 측정망을 꾸준히 늘려서 2012년 현재 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 4개의 강을 대상으로 약 267개⁴⁾의 지점에서 매년 36회 이상 측정하고 있다⁵⁾.

한국의 강을 통한 탄소 유출량을 계산하기 위한 초기 작업으로 먼저 주기적으로 행하여지고 있는 수질측정망을 통한 수질 측정 결과를 종합, 정리하여 분석하였다. 특히, 총량측정망의 경우, TOC의 농도뿐만 아니라 유량까지 주기적으로 함께 측정되었으므로 이를 이용하여, 데이터의 계절에 따른 변화를 동시에 분석함으로써 연평균 자료나 적은 수의 자료를 기준으로 탄소유출량을 추정할 기존 연구의 한계를 보완할 수 있었다.

그러나 총유기탄소(TOC)는 탄소의 종류 중 유기탄소만을 의미하므로 환경부에서 측정하는 수질의 항목은 유기탄소에 국한되어, 강에서 유출되는 탄소의 다른 형태인 무기탄소는 측정 수질 항목에 포함되어 있지 않다. 하지만 세계 다른 나라의 강에서 빠져나가는 탄소 중 무기탄소의

4) 이 중 104개 지점은 일반측정과 병행하여 측정

5) 환경부, 2012, [수질측정망 운영계획]

양, 그 중 DIC의 양이 전체 탄소유출량의 약 40~50%를 차지할 것이라는 기존 연구들의 결과를 볼 때(Degens, 1991; Meybeck, 1993; Huang et al., 2012), 우리나라의 강을 통해 빠져나가는 탄소의 양을 정확히 알기 위해서는 무기탄소에 대한 연구도 병행되어야 한다. 따라서 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강의 5개의 강에서 계절별로 강물을 채취해 pH, alkalinity, DOC를 비롯한 강물의 화학적 조성을 분석하였다.

2) 5대강 하류 지점 샘플링

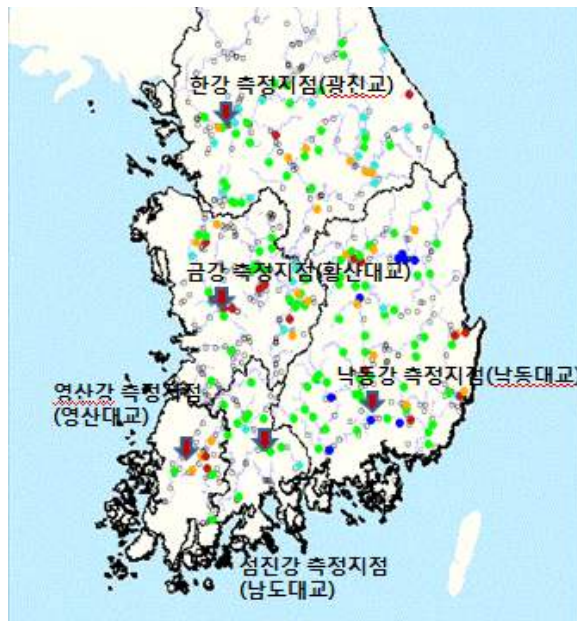


그림 3. 우리나라 5대강 실험 대상 지점

한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강의 강물 시료 채취는 2012년 2월, 5월, 7월, 10월에 바다의 영향, 즉 조수간만의 영향을 받지 않는 강의 가장 하구에 위치한 다리인 광진교, 황산대교, 영산대교, 남도대교, 낙동대교에서 각각 이루어졌다. 다리의 중간 지점, 즉, 강 폭의 중간 지점에서 강 표면에서 약 30~50cm 깊이의 강물 시료를 채취하고 분석 전까지 섭씨 4도 이하에서 냉장 보관하였다. 채취한 샘플은 0.45 μm cellulose

acetate membrane (Sartorius-Syringe Filter, 16555) 필터로 거른 뒤 pH, 알칼리도, DOC 농도를 분석하였다. 강물의 pH는 Metrohm 827 pH Lab(Metrohm AG., Ionenstrasse, Switzerland)로 측정하였으며, 알칼리도는 Metrohm 877 Titrino Plus(Metrohm AG., Ionenstrasse, Switzerland), DOC는 Shimadzu TOC-VCPH(Shimadzu Corporation, Japan)를 이용하여 측정하였다. 측정된 pH와 alkalinity를 이용하여 DIC를 계산하였다.

이렇게 직접 측정한 우리나라 5대강에서의 용존탄소 농도는 수질측정망의 측정값과 비교하여 타당성을 확인하고, DIC를 포함한 탄소유출량을 구하는데 이용하였다.

3) 데이터 처리

각각의 강을 통해 빠져나가는 탄소의 총량(load)을 정량화하기 위해 USGS LOADEST(Load Estimator) 프로그램을 사용하였다(Runkel REF). LOADEST은 간헐적으로 측정된 연구 대상 물질의 농도와 유량 자료를 이용하여 유량과 유출량 사이의 관계를 도출한 후 일유량자료에 외삽하여 총량을 구하는 프로그램으로 강을 통한 탄소의 유출량을 추정하는데 사용되어 왔다(Runkel *et al.*, 2004;Oh and Raymond, 2006;Raymond and Oh, 2007;Sickman *et al.*, 2007). LOADEST 프로그램을 이용하여 우리나라의 5대강 유역으로부터 배출되는 탄소의 총 유출량을 구하기 위해, 총량 측정망을 통해 측정한 매월 2-3개 정도의 간헐적인 탄소 농도 자료(2010년 자료 이용)와 국가수자원 관리 종합 정보 시스템(www.wamis.go.kr)에서 연간 발행하는 수문연보에 수록된 일유량자료(2010년 자료 이용)를 사용하였다. 이때, 총량 측정 지점과 가까운 지점의 유량 자료를 선택하여 강을 통해 빠져나가는 TOC 총량과 yield 계산에 이용하였다.

유기탄소의 총량을 계산하기 위해 사용한 LOADEST 프로그램의 경우 유량과 탄소유출량(load)에 대한 9가지 모델 중에 현상을 가장 잘 설

명하는 모델을 찾아 계산해주는 Auto모드를 제공하는데, 이 연구의 경우 각 구역의 측정지점마다 다른 모델을 사용하는데서 오는 오차를 줄이기 위해서 하나의 모델을 지정하여 분석할 필요가 있어 유량과 계절에 따른 변화를 반영하는 Model 4를 이용하였다(식 1). (식 1)에서 a_0 , a_1 , a_2 , a_3 은 계수, Q 는 유량, $time$ 은 시간을 나타내며, \sin , \cos 은 계절에 따른 변화를 보정하기 위해 포함되었다.

$$a_0 + a_1 \cdot \ln Q + a_2 \cdot \sin(2\pi d \cdot time) + a_3 \cdot \cos(2\pi d \cdot time) \quad (\text{식 1})$$

이렇게 정부 기관, 공사, 또는 연구소에 의해 관리되는 수질 측정망의 측정데이터와 직접 실험을 통한 데이터를 이용하여 각각의 구역에서 유출되는 탄소의 $yield$ (단위면적당 단위시간당 빠져나가는 탄소의 양)를 계산하였다. 구역에서 강을 통해 빠져나가는 탄소의 농도, $yield$ 와 토지이용현황, 토양특성, 기후 인자(강수량)과의 관계에 대해 분석하기 위해서는 구역의 경계가 먼저 나뉘어져야 하며, 이 작업은 GIS(Geographic Information System) 프로그램을 이용하여 이루어졌다. 또한 구역의 탄소 유출에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 알려진 자료, 즉, 인간의 토지이용, 토양의 특성, 그리고 강수와 유량 특성에 대한 GIS자료로 환경부에서 제공하는 토지피복도(2007년 기준), 국가 수자원 관리 종합 정보 시스템에서 제공하는 토양도(토양기호별), 수문연보의 유량데이터(2010년)를 이용하여 데이터를 정리하였다.

구역별 탄소 유출데이터의 각 인자와의 관계는 R 프로그램을 사용하여 통계적 유의성 여부를 판단하였다. TOC 농도의 각 강별, 계절별 차이를 분석하기 위해 일원배치분산분석(one-way Analysis of variance: one-way ANOVA)를 이용하여 분석한 후, Tukey 사후검정 방법을 이용하였다. 그리고 토지이용, 강수량, 토양특성의 인자가 강물의 TOC농도에 미치는 영향에 대해서는 상관분석, stepwise 다중회귀분석을 실시하였다(Ågren *et al.*, 2010).

제 2 장 이론적 고찰

제 1 절 선행연구 검토

지금까지 강에서 유출되는 탄소에 대한 연구에서 유량 및 탄소 농도에 대한 측정은 주로 지구상의 주요 강을 중심으로 이루어져 왔으며, 이렇게 측정된 값들을 중심으로 대략적인 전 지구적 탄소유출량을 제시하는 연구 결과는 꾸준히 보고되었다(Meybeck, 1993; Ludwig et al., 1996; Schlunz and Schneider, 2000; Lal, 2003; Cai, 2011; Dai et al., 2012; Huang et al., 2012)

이 중에서 1990년 이후 전 세계의 강을 대상으로 진행된 연구를 대상으로 그 결과를 살펴보면, 총 0.53 ~ 1.04 Pg (10^{15} g)의 탄소(TC; DOC, DIC, POC, PIC의 합)가 매년 전 지구적으로 강을 빠져나가 바다로 유입되며, 그 중 유기탄소(OC)는 0.27~0.46 Pg yr⁻¹ 정도로 계산되었다(표 2). 강에서 빠져나가는 유기탄소의 경우 각 논문에서 제시하는 값의 차이가 크지 않지만, 무기탄소의 경우 기존 연구에서의 추정값들이 약 2배가량 차이가 나는 것을 알 수 있다.

표 2. 전지구적 규모에서 강을 통한 탄소 유출량에 대한 선행 연구 결과

| 참고문헌 | 총 탄소(TC) 유출량 (Pg yr ⁻¹) | 총 유기탄소 (TOC)유출량 (Pg yr ⁻¹) | 비고 |
|------------------------------|---|--|--|
| Meybeck (1993) | 0.54 | | 40개의 주요 강의 데이터를 이용하여 유역의 기후, 지형적 특징을 고려하여 추정 |
| Ludwig et al. (1996) | | 0.38 | 60개의 전 세계 주요 유역을 대상으로 유기탄소와 기후, 생물학적, 지형학적 관계를 도출 후 유출량 추정 |
| Schlunz and Schneider (2000) | | 0.43 | |
| Lal (2003) | 0.74 | 0.33 | 오스트레일리아 제외 |
| Cole et al. (2007) | 0.59~0.83 | | |
| Cai (2011) | 1.04 | 0.46 | |
| Huang et al. (2012) | 0.53 | 0.27 | 남위 30도~북위 30도의 175개의 강을 대상으로 유출량 추정 |

우리나라의 경우, 산림 유역이나 호수를 대상으로 한 탄소 농도와 유출량에 관한 연구(Kim et al., 2000; Kim et al., 2010; Jeong et al., 2012)는 있지만, 강을 통해 빠져나가는 탄소량을 정량화한 연구는 매우

적다. 한강 유역을 대상으로 남한강 소유역에서의 지질학적 차이, 탄산암 지역(오대천)과 규산암 지역(정선천)을 대상으로 강을 통해 빠져나가는 DIC의 양과 성질을 규명한 한 연구에서 탄산암 지역에서 빠져나가는 DIC의 양이 $38.3 \text{ g-C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 규산암 지역의 $12.7 \text{ g-C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 보다 약 3배 정도 높은 것으로 나타나, 지질의 차이가 토양과 강 사이의 탄소 순환에 영향을 미치는 것으로 드러났는데(Shin et al., 2011a), 이는 탄산암 유역의 강의 DIC농도가 규산암 지역의 DIC 농도보다 높다고 계산한 기존 연구들의 결과와 부합되는 것이다(Ryu et al., 2008; Ushie et al., 2010). 2000과 2006년 남한강과 북한강 유역의 탄산암, 규산암지역에서 행해진 비슷한 연구에서 남한강의 경우 강물의 조성에 탄산암 풍화가, 북한강의 경우는 규산암 풍화가 많은 영향을 끼치며, 대체적으로 여름이 겨울보다 강물의 alkalinity가 더 높고, 강물의 화학적 조성 중 음이온의 60~70%가 HCO_3^- 로 되어 있음을 밝힌 바 있다(Ryu et al., 2008). 또한 2006~2007년 동안 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강, 만경강을 대상으로 한 연구에서 여섯 개의 유역에서의 강물의 화학적 조성의 계절적, 공간적 변화를 살펴 인간 활동의 영향이나 지질학적 차이가 강물의 녹아있는 물질의 조성에 영향을 끼칠 수 있음을 밝혔다(Shin et al., 2011a). 그리고 해안면 산림유역에서 강우 시에 시냇물을 통해 빠져나가는 탄소의 농도를 분석한 연구에서 DOC의 경우 작은 강우현상에도 높은 농도를 띄며 빠져나가지만 POC의 경우 작은 강우사상에서는 변화가 크지 않지만 큰 강우사상시에는 DOC보다 높은 농도로 빠져나감이 보고되었다 (Jeong et al., 2012).

요약하면, 한국의 강을 대상으로 한 연구는 강물의 조성을 지질학적인 차이에서 규명한 연구가 대부분이며 그 중 강물에 녹아있는 총 탄소, 즉 유기 탄소와 무기 탄소의 양을 모두 정량한 연구는 매우 적다. 탄소의 중요한 저장고로 여겨지는 토양과 바다를 이어주는 매개체인 강에 의해 이동하는 탄소에 대해 정확히 이해하는 것은 향후 생태계 관리에 있어 매우 중요하며, 따라서 한국의 주요 강과 그 지천을 따라 흐르는 탄소의 농도 및, 그 유출량을 정량화할 필요가 있다.

제 2 절 기존 연구의 한계 및 문제점

그동안 강을 대상으로 행해진 연구들을 살펴보면, 대부분 크기가 큰 강, 그 중에서도 본류를 위주로 이루어지고 있다는 점에 한계가 있다. 비록 큰 강의 막대한 유량이 강을 통한 탄소 유출의 절대량에 직접적인 영향을 미치는 것은 사실이지만, 강물을 통한 탄소 유출은 유량 뿐만 아니라 유역의 토양 특성(Aitkenhead and McDowell, 2000; Sun et al., 2007; Ryu et al., 2008) 과 기후(Sun et al., 2007; Bird et al., 2008; Moore et al., 2011), 혹은 인간 활동으로 인한 인위적인 유입(Aldrian et al., 2008; Xia and Zhang, 2011) 등의 다양한 요소들의 영향을 받는다는 것을 고려할 때, 작은 유역일지라도 이 영향인자들에 따라 높은 농도의 탄소가 유출될 수 있어 같은 강의 유역이라도 지역적으로 탄소 농도의 큰 차이가 나타날 수 있다.(Hartmann, 2009; Xia and Zhang, 2011; Dai et al., 2012). 따라서 강의 탄소 유출 동태를 보다 정확하게 이해하기 위해서는 비단 주요 강의 본류뿐만 아니라 지류를 포함한 더 세부적인 유역까지 분석할 필요가 있다.

또한, 지금까지의 연구에서는 대부분 연간 탄소유출량을 추정함에 있어 각 강에서의 연평균 유량데이터와 연평균 탄소 농도 데이터, 혹은 데이터 측정 당시의 유량과 탄소 농도 값을 이용하여 그 대략적인 수치를 계산하여 제시하고 있는데, 이는 유역의 지역적인 기후 특성에 따라 유효하지 않은 방법일 수 있다. 특히, 우리나라와 같이 계절풍(monsoon) 기후를 가지는 지역에서는 여름철(6~8월)에 연 강수량의 약 60%의 비가 내리는데, 이러한 단기간에 걸친 강수량의 증가는 유량의 급격한 변화 및 유출 탄소 농도의 변화를 야기하게 되고, 결국 절대유출량에 영향을 미치게 된다. 우리나라와 같이 몬순 기후를 가지는 중국 Xijiang강에서 2005년 6월 집중 호우 기간 동안(06월 22일~06월 28일 일주일간)의 강을 통한 탄소 유출량(flux) 특성을 살펴 본 결과, DIC, DOC, POC 각 항목에 대해 연평균 유출량의 14.9%, 24.8%, 44.9%가 각각 이 기간 동안 빠

져 나갔다(Sun et al., 2007). 미국 동부의 한 산림 유역에서 2011년 여름 허리케인 Irene이 통과할 때 연평균 DOC 유출량의 약 43%가 유출되었다는 연구 결과 역시 단기간에 걸친 집중 강수가 DOC 유출량에 많은 영향을 미침을 보여 준다(Yoon and Raymond, 2012). 즉, 연평균 값을 사용하거나, 따라서 강에서 빠져나가는 탄소 농도에 대한 측정데이터를 사용함에 있어 이와 같은 계절적인 변화요인을 고려해주지 못할 경우 탄소 유출량이 집중호우 기간 전후로 측정한 값만을 이용할 경우 비교적 적게, 집중호우 기간의 값만을 이용할 경우 비교적 크게 추정될 가능성이 있다.

하지만, 계절에 따라 한국의 5대강에서 직접 물을 채취하여 분석한 데이터를 이용하고, 전국에 고루 분포되어 있는 총량측정망에서 측정한 유량과 유기탄소의 농도를 바탕으로 계절별 탄소의 유출 추이를 분석하는 방법으로 계절적 변화에 의한 유출량 추정 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 또한 조사 지점과 측정 시기에 따른 강물의 탄소 유출에 대해 GIS를 이용한 시공간적 분석을 병행하면 각 유역별 탄소 유출에 대해 정량적으로 이해할 수 있고, 이는 유역별 유기오염물질 총량 관리에 필수적인 기초자료로 쓰일 수 있다.

제 3 장 연구 결과

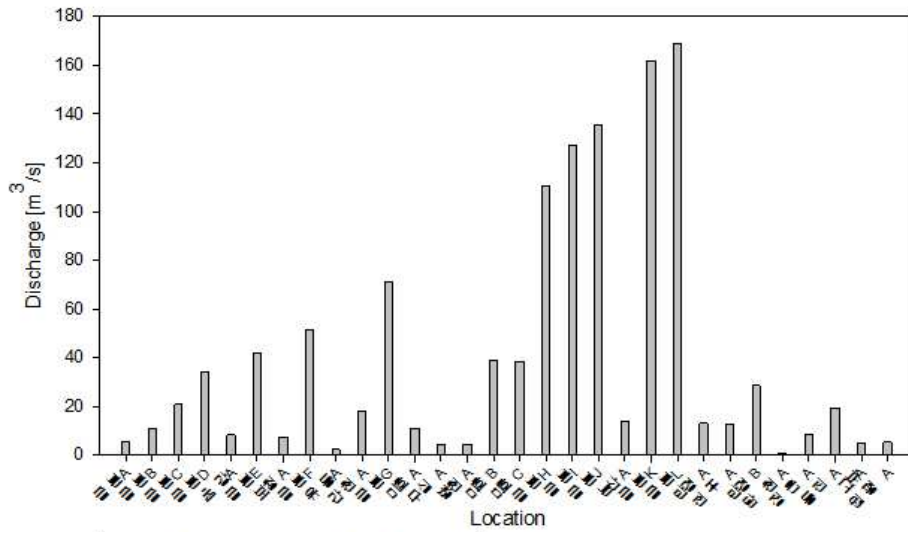
제 1절 데이터 검토

이 연구에서 사용한 수질측정망(일반, 총량)을 통한 자료는 국가 수자원 관리 종합 정보 시스템(www.wamis.go.kr)과 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)에서 다운받아 정리한 후, 데이터를 이용하기 전 다음과 같은 절차를 통해 이상치를 제거한 후 분석에 활용하였다.

1) 유량 자료 검토

먼저 총량시스템에서 제공하는 유량 중 유량이 음수로 기록된 데이터들을 제거하고 남은 데이터를 기준으로 강의 상류부터 하류까지 각각의 측정소에서 측정된 유량데이터를 정렬시켜 그 변화를 보아 값의 타당성을 정성적으로 확인하였다. 상류에서 하류로 갈수록 유량이 증가하는 경우를 보이고, 그 증가 정도가 지류의 유량을 누적하여 합산한 값과 비슷한 경우엔 데이터를 아무 보정 없이 그대로 사용하였다. 하지만, 영본E 지점(영산강 본류의 최하류 지점)의 경우 연평균 유량이 $1256\text{m}^3/\text{s}$ 로 바로 위의 본류 측정지점인 영본D 지점의 연평균 유량인 약 $85.8\text{m}^3/\text{s}$ 보다 약 14.6배 컸는데(그림 4), 이 값은 한강의 최하류 지점의 연평균 유량이 $622\text{m}^3/\text{s}$, 낙동강의 최하류 지점의 연평균유량이 $769\text{m}^3/\text{s}$ 로 측정된 것과 비교해 볼 때 타당성이 없다고 판단되어 자료 분석 시 영본E 자료는 제외하였다.

a)



b)

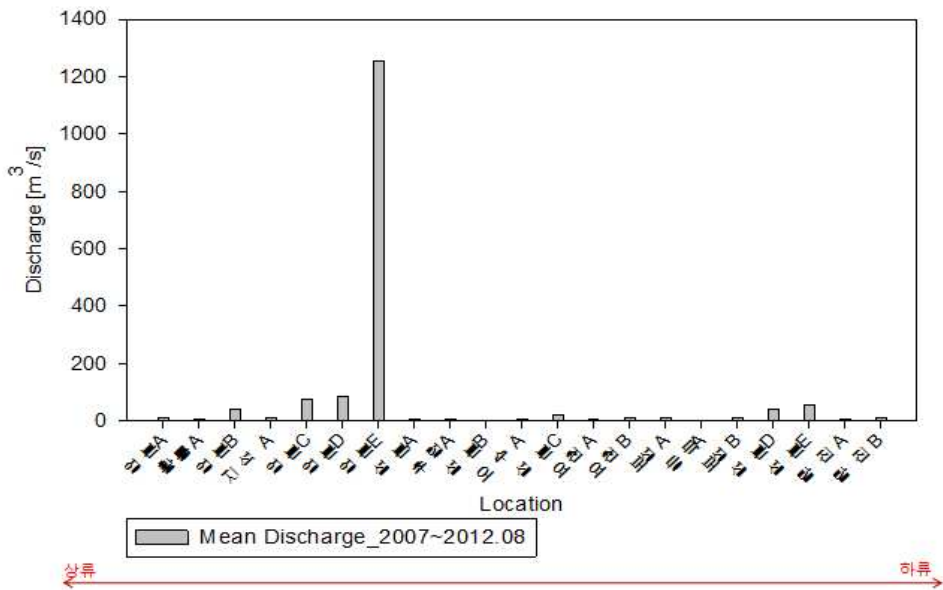


그림 4. a)금강과 b)영산강의 총량측정망의 상류부터 하류까지의 측정소에서의 연평균 유량

2) TOC 농도 자료 검토

TOC농도데이터의 타당성을 살펴보기 위해 측정망에서 측정된 데이터와 직접 실험을 통한 데이터를 비교하였다. 2012년 2월, 5월, 7월, 10월에 직접 강물을 채취하여 구한 DOC농도와 근처의 측정망에서 측정된 TOC 농도 데이터를 비교하였는데(표 3), 이 때, 측정일자와 강물 채취 일자가 일치하지 않는 경우 전후 일주일 사이에 측정된 TOC 농도 값의 평균과 비교하였다. 비록 우리가 측정한 수질 항목은 DOC이고, 총량 측정망의 TOC 측정일자가 실험 샘플의 채취 일자와 일치하지 않을 수 있어 정확한 비교는 어렵지만, TOC가 DOC와 POC의 합이고, 지역에 따라 다르겠지만 평균적으로 POC의 농도가 탄소 유출에 기여하는 바가 DOC와 비슷할 것이라는 선행 연구의 결과에 비교해 보았을 때(Meybeck, 1993; Huang et al., 2012), 수질측정망을 통해 측정된 TOC 농도 역시 분석에 이용 가능할 것으로 보인다.

표 3. 우리나라 5대강의 총량측정망의 TOC농도와 실험을 통해 측정된
 DOC농도 비교 (GR:금강, HR: 한강, NR: 낙동강, SR: 섬진강, YR:영산강)
 [단위: mg/L]

| | 강물 채취 일자 | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 실험데이터(DOC) | 02-09-2012 | 05-11-2012 | 07-16-2012 | 10-26-2012 |
| | 02-11-2012 | 05-13-2012 | 07-17-2012 | 10-28-2012 |
| GR | 2.90 | 3.97 | 2.72 | 2.41 |
| HR | 1.35 | 1.70 | 1.63 | 1.40 |
| NR | 2.42 | 2.75 | 3.33 | 2.51 |
| SR | 1.30 | 2.12 | 1.91 | 1.66 |
| YR | 3.93 | 5.44 | 2.79 | 3.08 |
| 총량측정망(TOC) | 02-04-2012 | 05-10-2012 | 07-10-2012 | 10-19-2012 |
| | 02-18-2012 | 05-24-2012 | 07-24-2012 | 11-02-2012 |
| GR | 4.50 | 8.90 | 5.90 | 3.00 |
| HR | 5.10 | 3.53 | 3.95 | 2.50 |
| NR | 4.05 | 3.70 | 4.20 | 4.10 |
| SR | 1.80 | 2.20 | 3.25 | 2.10 |
| YR | 7.00 | 6.03 | 5.27 | 4.25 |

제 2 절 한국의 강에서의 유기탄소 농도

1) 일반 측정망

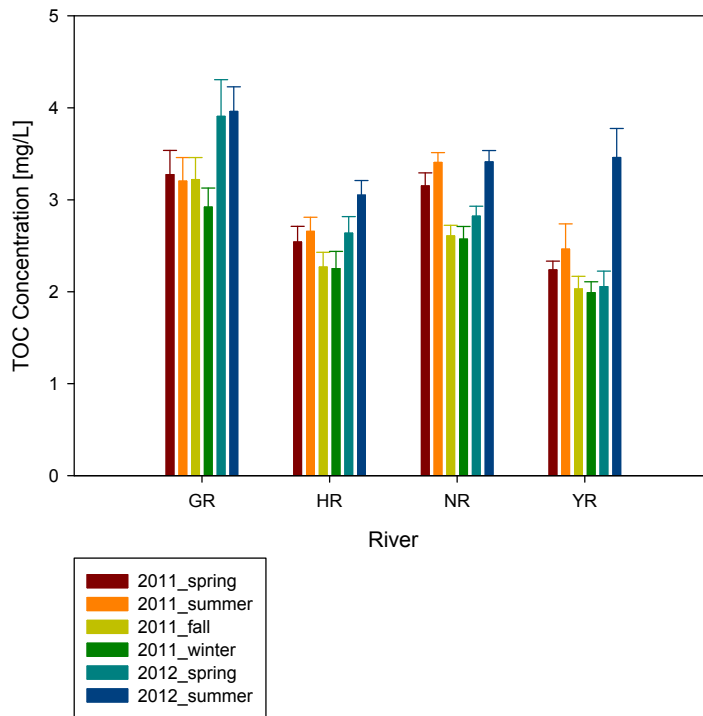


그림 5. 각 강별, 계절별 TOC농도(2011,01~2012.08)

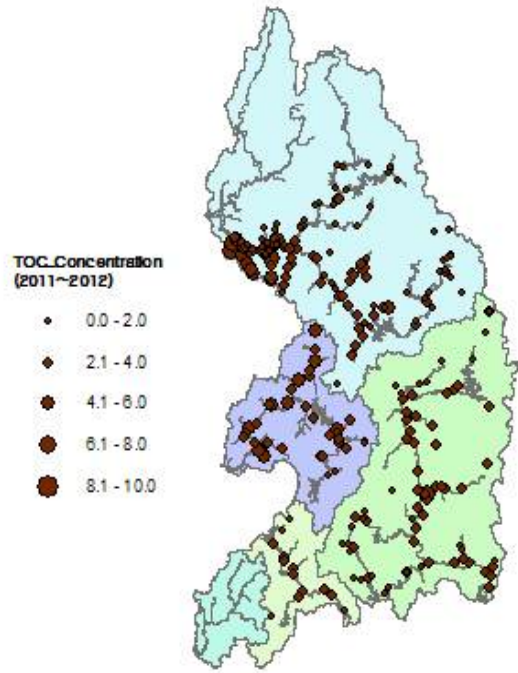
일반측정망을 통해 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 권역을 통해 2011년 1월부터 2011년 12월까지 관측된 강물의 TOC 데이터를 바탕으로 정리한 결과 우리나라 강물에서의 TOC 농도는 연평균 2.65 ± 0.05 mg/L(mean±s.e., n=910)였다. 계절별 TOC농도는 봄(3~5월, n=227)의 경우 평균 2.79mg/L, 여름(6~8월, n=231)의 경우 평균 2.94mg/L, 가을(9~11월, n=227)의 경우 평균 2.47mg/L, 겨울(12~2월, n=225)의 경우 평균

2.41mg/L로 계절에 따른 차이가 존재했으며(p-value: 7.89e-05), 여름>봄>가을>겨울 순으로 높았다(그림 5).

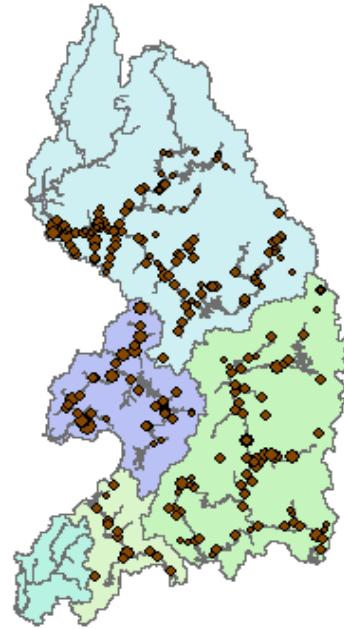
각 강별로 2011년 1월에서 2012년 8월까지의 계절별 TOC 평균농도의 변화를 살펴본 결과 2011년보다 2012년의 여름의 TOC농도가 높았는데, 특히 8월의 경우 모든 강에서 TOC의 평균 농도가 2011년 대비 0.32 mg/L(낙동강) ~ 2.34 mg/L(영산강) 높았다(그림 5). 이는 7월 하순부터 8월 상순동안 지속된 폭염 이후 '볼라벤(BOLAVEN)', '덴빈(TEMBIN)' 과 같이 많은 비를 포함한 태풍의 영향으로 집중된 강수현상이 있었기 때문으로 생각된다. 또한, 이 기간 동안의 각 강별 평균 TOC 농도는 금강(n=200)>낙동강(n=475)>한강(n=671)>영산강(n=179) 순으로 각 강별로 농도의 차이가 존재하였으며(p-value: 2.20e-16) 각각 3.35 mg/L, 2.96 mg/L, 2.55 mg/L, 2.30mg/L 였다.

이렇게 일반측정망을 통해 측정된 우리나라 4대강에서 유출되는 계절별 평균 TOC 농도는 여름이 겨울보다 높은 것으로 나타났지만, 측정소별 TOC 농도의 차이는 여름(sd = 1.39)보다 겨울의 경우 (sd = 1.49) 더 컸다(그림 6). 그리고 TOC 농도의 경우 도시지역에 위치한 측정소에서 더 높은 값을 가지는 경향이 보였다.

a)



b)



c)

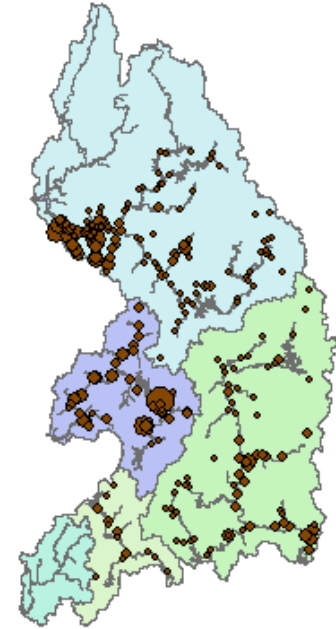


그림 6. 계절별 강물의 TOC 농도 분포. 왼쪽부터 a) 2011.01-2012.08 평균, b) 여름(6, 7, 8월)과 c)겨울(12, 1, 2월)의 TOC 평균 농도. (단위: mg/L)

2) 총량 측정망

2007년부터 2011년까지 총량 측정망에서 측정한 데이터를 이용하여 각 강에서 유출되는 TOC의 농도를 계절별, 강별로 분석하였는데, 연평균 금강 4.23mg/L (n=6660), 한강 3.34mg/L (n=10028), 낙동강 3.24mg/L (n=8971), 영산강 3.48mg/L (n=3265)의 값을 가졌으며(표 4) 강별로 TOC 농도의 차이가 있는 것으로 나타났다(p-value: 2.26e-16). 계절에 따른 TOC 평균 농도는 사계절에 걸쳐 금강이 가장 높았다.

표 4. 2007~2011년 계절별, 강별 TOC 농도(단위: mg/L)

| River | Spring | | Summer | | Fall | | Winter | | Annual | |
|-------|--------|------|--------|------|------|------|--------|------|--------|------|
| | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD |
| GR | 4.49 | 2.41 | 4.31 | 2.14 | 3.76 | 1.91 | 4.24 | 2.40 | 4.23 | 2.25 |
| HR | 3.58 | 3.33 | 3.61 | 3.16 | 2.74 | 2.37 | 3.29 | 3.52 | 3.34 | 3.13 |
| NR | 3.37 | 1.59 | 3.80 | 1.91 | 2.70 | 1.26 | 2.95 | 1.78 | 3.24 | 1.70 |
| YR | 3.46 | 2.12 | 4.16 | 2.20 | 2.89 | 1.32 | 3.09 | 1.86 | 3.48 | 2.01 |

하지만, 2009~2011년 3년 동안의 TOC를 측정한 관측소의 데이터를 이용하여 연간 유량 가중 평균⁶⁾(대상측정망수=119; HR=36, NR=41, GR=23, YR=19)을 비교한 결과, TOC 유량 가중 평균은 금강>한강>낙동강>영산강 순으로 높게 나타났다(표 5). 이 중에서 각 강의 본류의 데이터(n=39; HR=9, NR=14, GR=12, YR=4)만으로 유량 가중 평균 구한 결과는 영산강>낙동강>금강>한강의 순이었다.

6) 각 측정소 별 TOC의 연간 유량 가중 평균을 구한 후, 이를 강별로 산술 평균하여 구한 값

표 5. 2009~2011년 각 년도의 4대강의 TOC 연유량가중평균 농도
(단위: mg/L)

| | 2009 | | 2010 | | 2011 | |
|-------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|------|
| River | TOC Discharge Weighted Mean | SD | TOC Discharge Weighted Mean | SD | TOC Discharge Weighted Mean | SD |
| GR | 4.26 | 1.71 | 3.89 | 1.58 | 4.39 | 1.64 |
| HR | 3.85 | 2.93 | 3.47 | 2.76 | 3.45 | 2.26 |
| NR | 3.72 | 1.21 | 3.70 | 1.26 | 3.40 | 1.06 |
| YR | 3.55 | 1.51 | 3.26 | 1.16 | 3.33 | 1.6 |

3) 계절별 5대강의 탄소 농도 측정 결과

바다의 영향을 받지 않는 5대강의 하류지점에서 2012년 2월부터 10월 까지 4번(2월 9~11일, 5월 11~13일, 7월 16~17일, 10월 26~28일)에 걸쳐 채취한 샘플을 실험을 통해 분석하여 강을 통해 빠져나가는 용존탄소(DOC, DIC)농도를 분석한 결과, 우리나라 5대강 하류의 DOC농도는 평균 2.57mg/L였으며 DIC농도는 12.6mg/L였다. DOC농도는 영산강, 금강, 낙동강, 섬진강, 한강 순으로 높았으며(p-value: 1.12e-3), 그 값은 각각 3.81mg/L, 3.00mg/L, 2.75mg/L, 1.75mg/L, 1.52mg/L였고, DIC의 경우 영산강, 금강, 한강, 섬진강, 낙동강의 순으로 높았으며(p-value: 0.403), 그 값은 각각 14.6mg/L, 13.6mg/L, 13.4mg/L, 10.8mg/L, 10.4mg/L이었다(표 6). 우리나라의 경우 용존 무기탄소의 형태로 유출되는 양이 유기탄소의 양보다 약 4.90배 높았다.

표 6. 2012년 2월~10월 우리나라 5대강의 DOC, DIC 농도 (mg/L)

| DOC | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| 강물 채취년월 | GR | HR | NR | SR | YR |
| 02-2012 (Winter) | 2.90 | 1.35 | 2.42 | 1.30 | 3.93 |
| 05-2012 (Spring) | 3.97 | 1.70 | 2.75 | 2.12 | 5.44 |
| 07-2012 (Summer) | 2.72 | 1.63 | 3.33 | 1.91 | 2.79 |
| 10-2012 (Fall) | 2.41 | 1.40 | 2.51 | 1.66 | 3.08 |
| 02-2012~ 10-2012 | 3.00 | 1.52 | 2.75 | 1.75 | 3.81 |
| DIC | | | | | |
| 강물 채취년월 | GR | HR | NR | SR | YR |
| 02-2012 (Winter) | 17.6 | 16.6 | 16.2 | 11.3 | 21.7 |
| 05-2012 (Spring) | 13.5 | 11.6 | 9.63 | 7.79 | 15.2 |
| 07-2012 (Summer) | 10.2 | 11.9 | 6.46 | 11.3 | 9.54 |
| 10-2012 (Fall) | 13.2 | 13.6 | 9.48 | 12.8 | 12.0 |
| 02-2012~ 10-2012 | 13.6 | 13.4 | 10.4 | 10.8 | 14.6 |

제 3 절 한국의 강에서의 유기탄소 유출

1) 한국의 강에서의 유기탄소 유출량

총량측정망의 TOC 농도와 수문연보의 유량자료를 이용하여 구한 우리나라의 5대강을 통한 TOC 유출량(yield)은 약 $2.37 \pm 0.30 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (금분J: $37.5 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 중랑A: $18.8 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 낙분J: $21.8 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 낙분M: $339 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 제외)였다. 각 강별 평균은 영산강>섬진강>낙동강>금강>한강 순으로 높았으며, 각각 $5.05 \pm 0.29 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $3.30 \pm 0.99 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $2.41 \pm 0.41 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $1.65 \pm 0.46 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $1.35 \pm 0.39 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 강별로 차이가 존재했다(p-value: 0.003). 하지만 한강의 경우 유출량(yield) 산정 시 기준이 된 유역이 남한강 상류에 치중되어 있고 강 하류의 데이터가 포함되어 있지 않아 전체 강을 대표하는 것으로 보기는 어렵다.

연간 각 유역에서 단위 면적 당 빠져나가는 TOC의 양은 측정소별 (n=30)로 $0.02 \sim 6.6 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이내로, 이 중 63%(n=19)의 유역에서 TOC yield는 $1 \sim 4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 사이였다(그림 7).

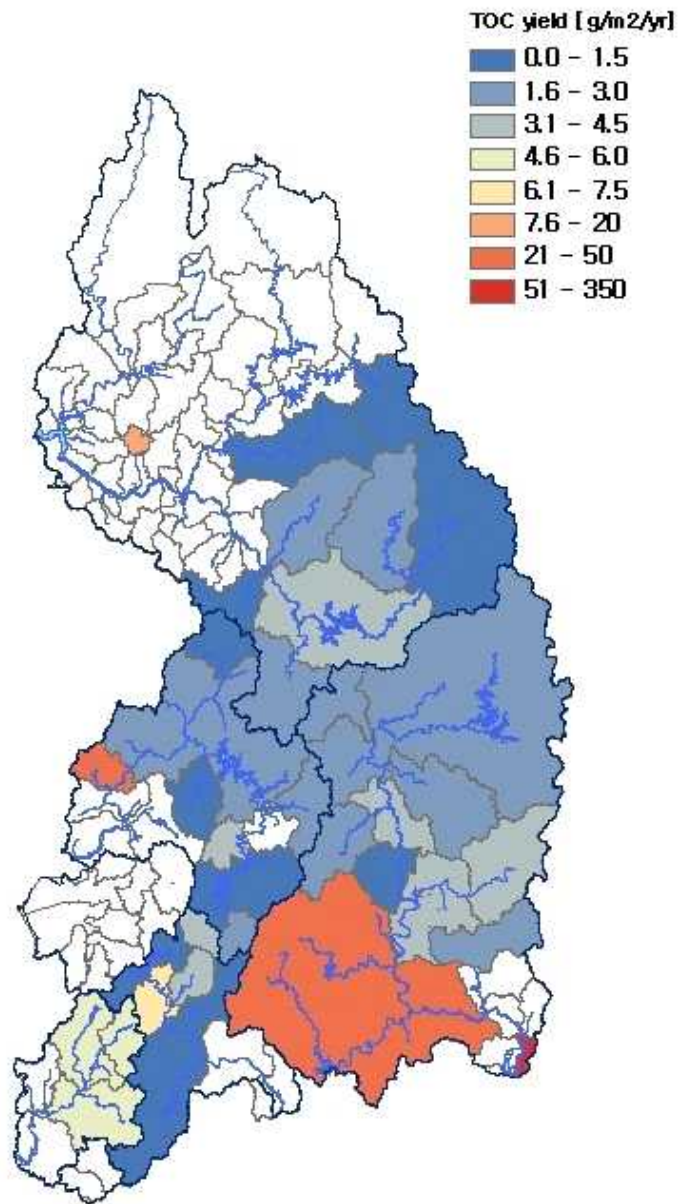


그림 7. 우리나라 5대강 유역에서 빠져나가는 탄소 유출량
(yield: g C m⁻² yr⁻¹)

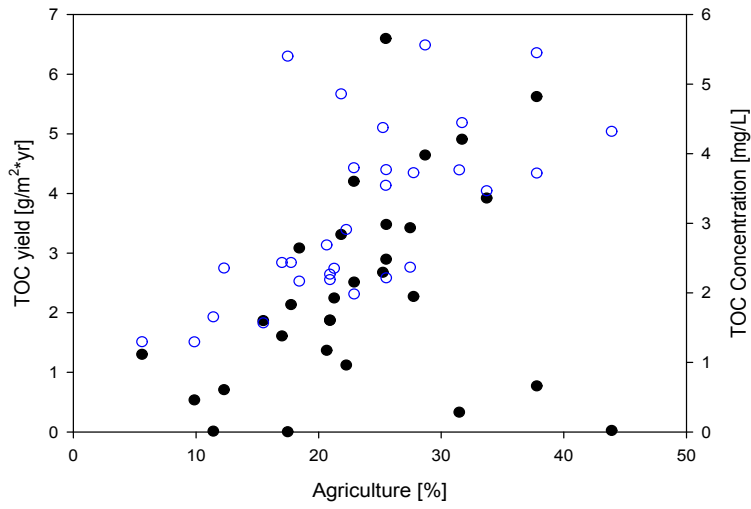
2) 영향 인자 분석

1. 토지이용

환경부에서 제공하는 토지피복도(2007년) 데이터를 기준으로 각 유역의 탄소 유출에 토지이용이 어떻게 영향을 미치는지 상관분석을 통해 살펴보았다.

각 유역(4개 유역 포함)의 TOC 농도와 토지이용(도시지역, 농업지역, 산림지역)과의 관계를 살펴본 결과 세 가지 토지이용 모두가 TOC 농도에 영향을 주는 것으로(p-value: 1.67e-05(도시), 2.36e-03(농업), 1.02e-08(산림)) 나타났으며 도시지역과 농업지역이 차지하는 넓이가 늘어날수록 그 유역을 통해 빠져나가는 TOC 농도가 증가하는 경향이 보였다(R = 0.659(도시), R = 0.497(농업)) 산림지역이 차지하는 넓이가 늘어날수록 TOC 농도가 감소하는 경향이 보였다(R = -0.797)(그림 8.a), 8.b), 9).

a)



b)

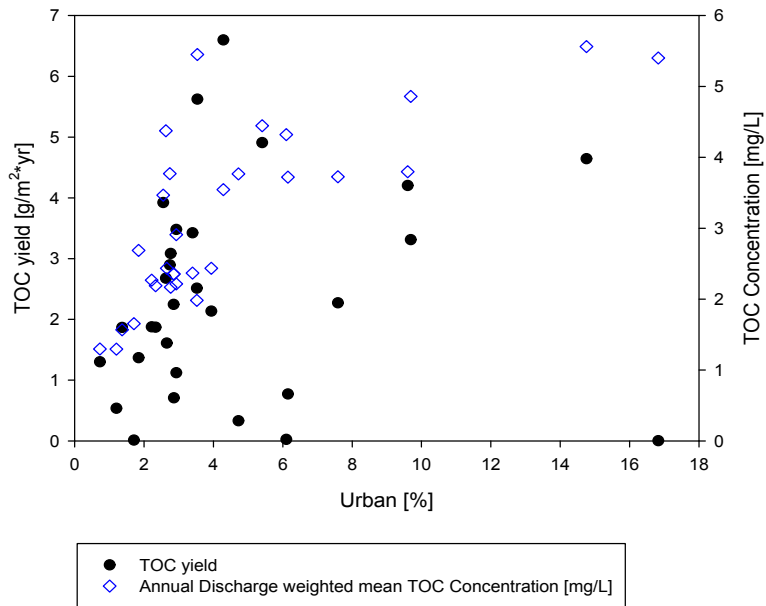


그림 8. 유역의 a)농업, b)도시지역 토지이용비율에 따른 TOC yield와 강의 TOC농도 변화

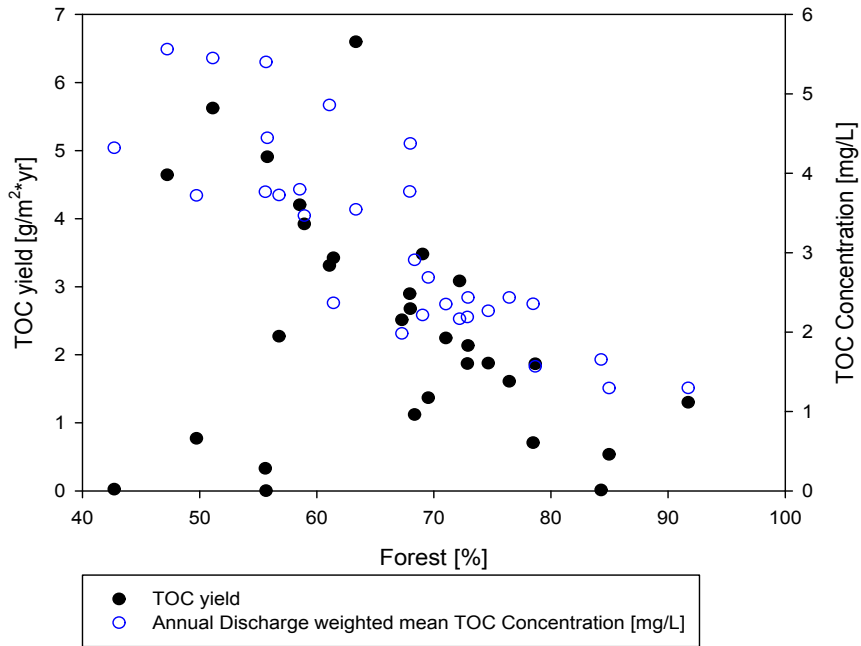


그림 9. 산림지역 토지이용비율에 따른 TOC yield와 TOC농도 변화

각 유역(4개 유역 제외)의 탄소유출량(yield)와 토지이용과의 상관관계를 살펴본 결과 도시지역과 농업지역이 증가할수록 탄소유출량(yield)이 증가하고 산림지역이 증가할수록 탄소유출량(yield)이 감소하는 경향이 보였지만 모두 통계적으로 유의미하지 않았다(p-value: 0.55(도시), 0.07(농업), 0.08(산림)).

2. 토양

각 유역의 탄소 유출에 토양의 특성이 어떻게 영향을 미치는지 살펴 보기 위해 수자원 관리 종합 정보 시스템에서 제공하는 토양기호별 분류를 기준으로 상관분석을 실시하였다.

각 유역(4개 유역 제외)의 탄소유출량(yield)과 토양특성관의 상관관계를 살펴본 결과 토양기호 raa인 토양(적황색토, 저구릉, 홍적 및 산성암, 배수 양호 식질 내지 식양질; 평균적으로 우리나라 유역 넓이의 약 5.32% 차지)이 차지하는 넓이가 그 유역의 TOC 유출량(yield)과 TOC 농도와 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다(yield의 경우 $R = 0.47$, $p\text{-value} = 7.24e-03$; 농도의 경우 $R = 0.39$, $p\text{-value} = 0.03$). 하지만 그 외의 토양들에서는 별다른 상관관계가 보이지 않았다(그림 10).

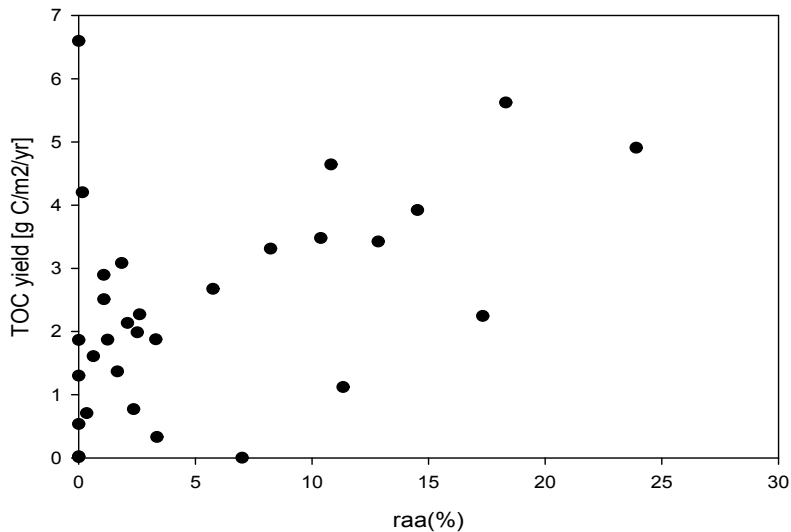


그림 10. 토양기호 raa의 토양의 분포비율에 따른 TOC yield 변화

3. 강수량

강수량이 유역의 탄소 유출에 미치는 영향을 살펴보기 위해 총량측정망 데이터의 근처에 있는 강우측정망을 선택하여 그 지역의 강수를 대신하여 분석에 사용하였다. 전체 데이터를 대상으로 월강수량(mm/month)과 TOC load(kg/month), 유량(m³/month)를 그래프로 나타낸 결과, 강수량, 유량 및 TOC 총 유출량(load)의 변화 양상이 같았다(그림11). 이는 우리나라 5대강을 통한 탄소유출은 유량에 변화에 민감하다는 것을 나타내며, 5대강의 하류를 통해 빠져나가는 TOC load를 기준으로 계산한 결과 여름철(6~8월)에 탄소 전체 유출량의 약 42%가 되는 양이 빠져나갔다(그림 11).

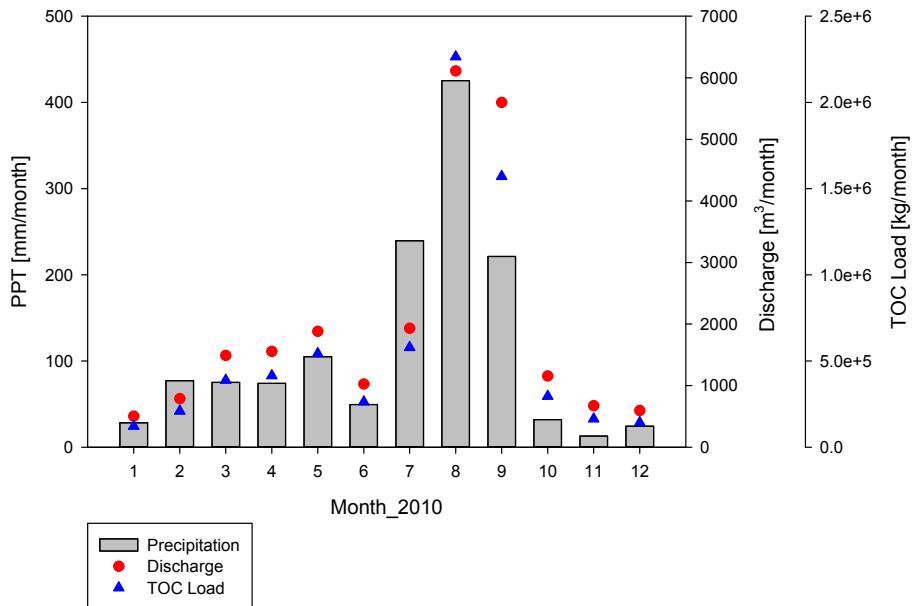


그림 11. 2010년 5대강의 측정지점의 강수량, 유량, TOC 총유출량(load)의 월변화

TOC 농도, TOC load, 유량에 강수량이 미치는 영향을 확인하기 위해 5대강의 하류에 위치하는 유역(총량측정유역 구분으로 금본I, 낙본G, 섬본D, 영본C, 한강D에 해당)의 강수자료, 유량 및 TOC load, TOC농도

자료를 이용해 분석한 결과 강수량과 유량, 강수량과 TOC load와는 양의 상관관계가 있었지만(유량의 경우 $R = 0.60$, $p\text{-value} = 4.83e-07$; load의 경우 $R = 0.59$, $p\text{-value} = 5.93e-07$), 강수량과 TOC 농도와는 유의미한 관계가 보이지 않았다(그림 12, 13).

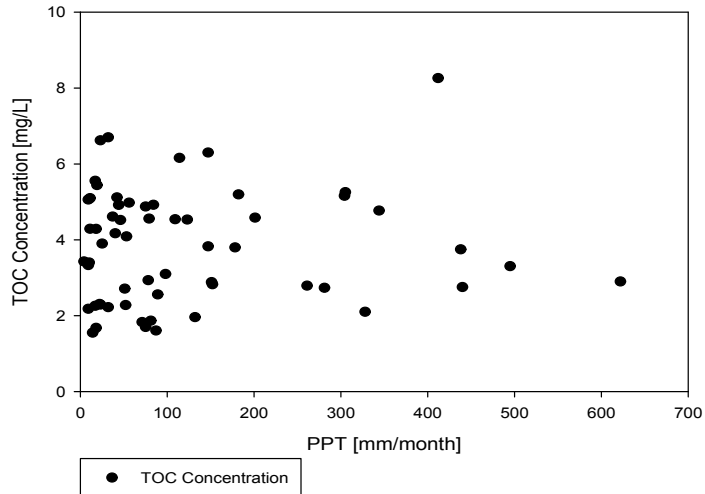


그림 12. 5대강 하류에서의 강수량에 따른 TOC 농도 변화

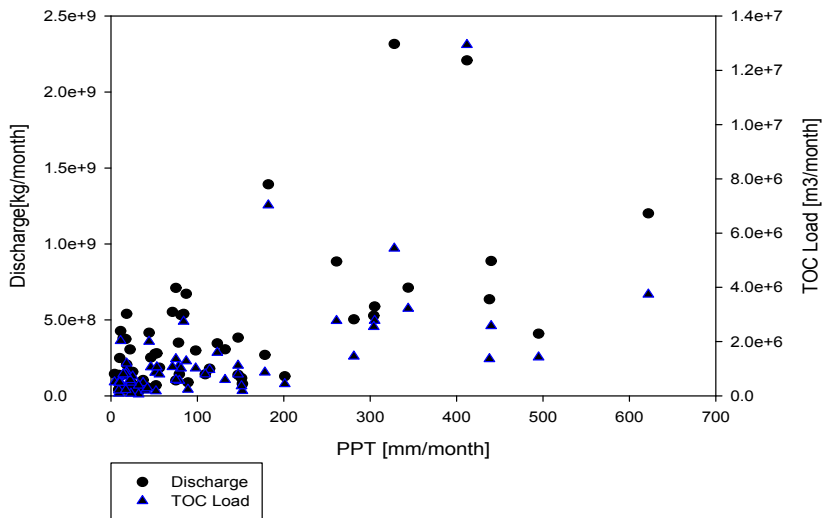


그림 13. 5대강 하류지점에서의 강수량의 변화에 따른 유량 및 TOC 총유출량(load) 변화

2010년 5대강에서의 TOC 농도, 유량, 강수량의 월 변화를 각각 살펴 보면, 낙동강과 섬진강의 경우, TOC 농도가 강수량과 비례하여 증가하는 현상을 보였지만, 나머지 세 개의 강에서는 겨울철 TOC 농도가 높았으며, 봄에는 감소하였다가 여름철 다시 증가하는 경향을 보였다. 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강의 경우 강수량이 증가하는 여름철에 유량과 TOC load가 비례하여 증가하는 것처럼 보이지만, 한강의 경우 강수량의 증가보다 늦게 유량과 TOC load 증가현상이 나타났다(그림 14, 15.a), 15.b), 16.a), 16.b)).

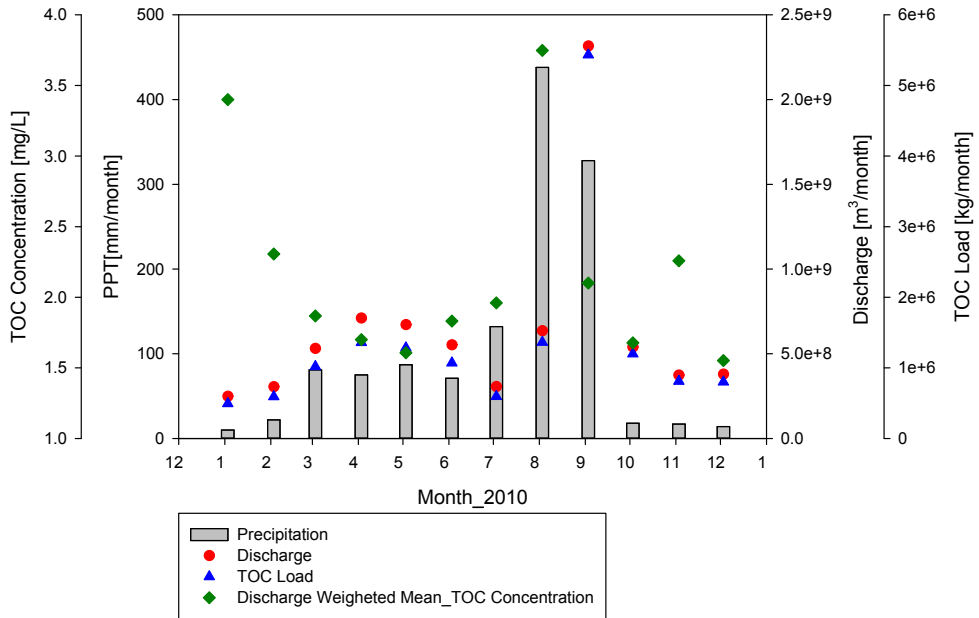
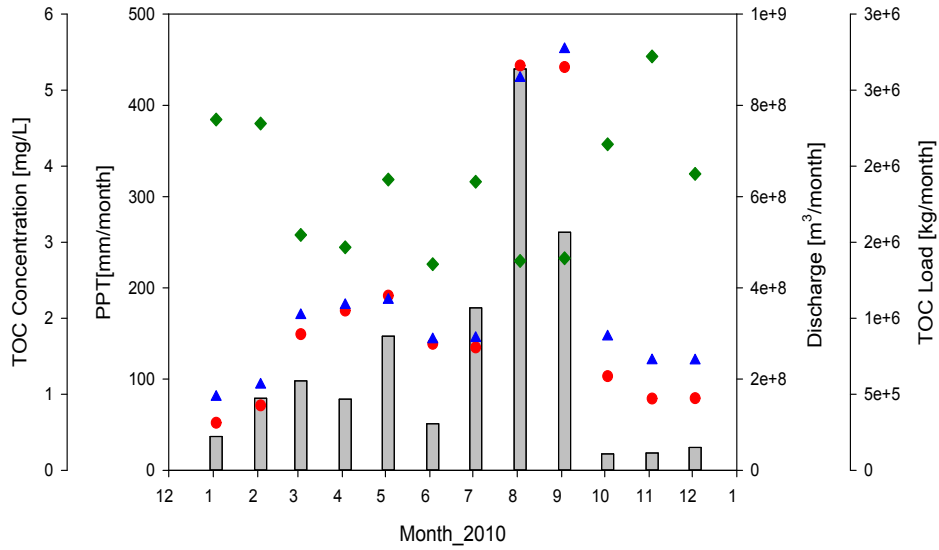


그림 14. 한강(한강D)의 월평균 강수량, 유량, TOC 총유출량(load), TOC 농도 변화 (2010년)

a)



b)

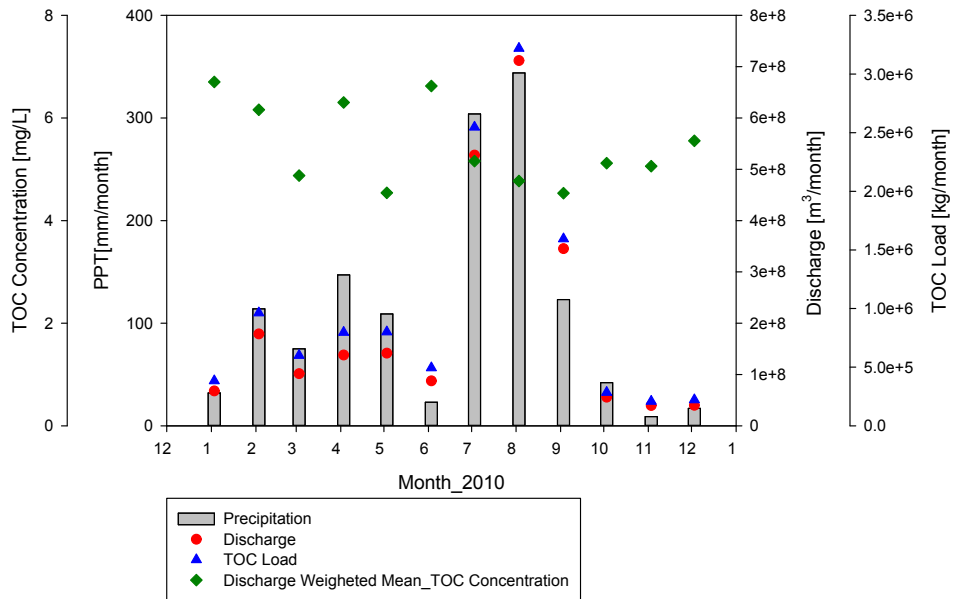
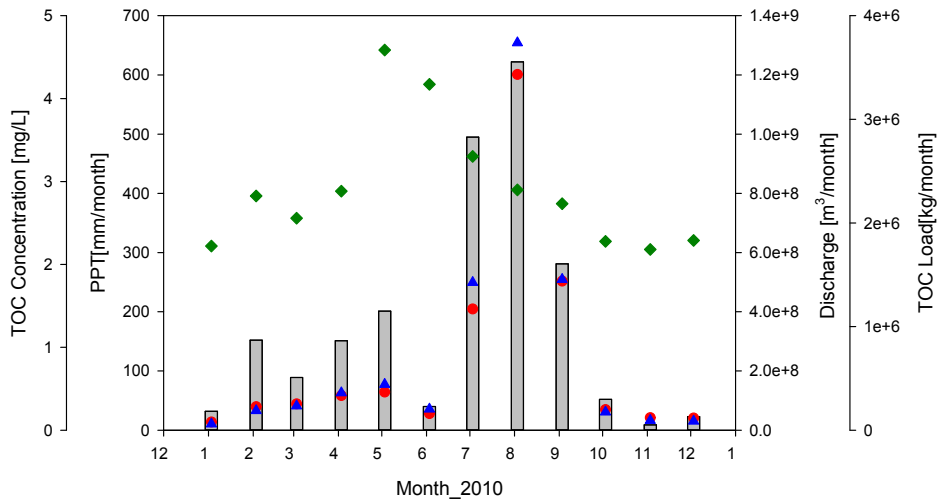


그림 15. (a)금강(금본I), (b)영산강(영본C)의 월평균 강수량, 유량, TOC 총유출량(load), TOC 농도 변화 (2010년)

a)



b)

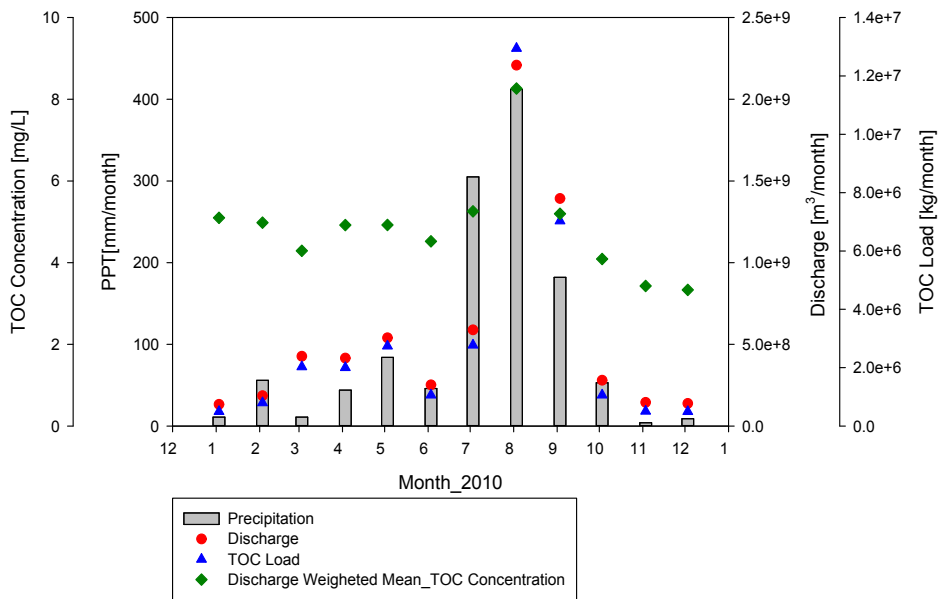


그림 16. a)섬진강(섬본D), b)낙동강(낙본G)의 월평균 강수량, 유량, TOC 총유출량(load), TOC 농도 변화 (2010년)

4. 인자별 분석

앞서 살펴본 토지이용, 토양특성, 강수량의 인자를 중심으로 stepwise 분석을 통해 각 구역에서의 총 유기탄소 유출(yield)에 미치는 변수별 영향정도를 알아본 결과, 강수량, 토지이용(도시지역, 농업지역, 산림지역, 나지), 토양특성(afc:범람지 및 충적토, 배수약간양호 내지 매우양호, 사질 내지 사양질, rla:적황색토 및 암쇄토, 저구릉, 석회암, 배수양호, 식양질 내지 식질, raa: 적황색토, 저구릉, 홍적 및 산성암, 배수 양호 식질 내지 식양질)순으로 나타났다.

제 4장 토의 및 결론

우리나라의 강을 통해 빠져나가는 탄소의 양을 수질측정망인 총량 측정망과 계절별로 직접 채취하여 구한 값을 이용하여 분석한 결과, 강을 통해 빠져나가는 총 유기탄소(TOC)와 용존 유기탄소(DOC)의 농도는 각각 금강, 영산강에서 4.23mg/L, 3.81mg/L로 가장 높았다. 또한 용존 무기탄소(DIC)의 경우 영산강에서 가장 높은 14.6 mg/L의 농도로 빠져나가는 것을 알 수 있었다(표 4, 6). 단위시간당 단위면적당 빠져나가는 총유기 탄소의 양(TOC yield)을 기준으로 보았을 경우에도 영산강이 $5.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 다른 강들보다 2~3배 정도 높았다.

강을 통한 TOC yield에 강수량, 토지이용, 토양특성이 영향을 미치는 것으로 분석되었다. TOC의 경우 용존 상으로 있는 탄소(DOC)뿐만 아니라 입자성 유기 탄소까지 포함하기 때문에 강수현상이 있는 경우 강의 부유물질이 증가하게 될 뿐만 아니라 침식에 쉽게 영향 받는 곳으로부터 흘러 내려오는 입자성 물질의 유입량의 증가가 발생해 여름철 TOC 유출에 많은 영향을 줄 수 있다. 또한, 도시지역과 농업지역의 인간 활동에 의한 TOC농도의 증가로 인한 탄소유출량의 증가는 기존 선행연구의 결과와 부합하는 것이다(Aldrian et al., 2008; Xia and Zhang, 2011).

우리나라 주요 5대강 중, 특히 영산강 유역의 경우 농업지역의 분포비율이 31.41%로 가장 높고(표 7), 토양기호 분류상 ra(적황색토, 저구릉, 홍적 및 산성암, 배수 양호 식질 내지 식양질), apc(충적토, 배수 약간 불량 내지 양호, 자갈이 있는 식양질 내지 자갈이 있는 사양질) 토양의 비율이 다른 강 유역에서의 비율보다 높았다. 농업활동(예: 석회질 비료의 사용)으로 인한 영향으로 DIC농도가 높아지고(Oh and Raymond, 2006) 저지대의 농업지역인 영산강 유역에 풍화된 토양입자가 유기물질을 함유한 채 축적이 되기 쉽기 때문에(박승필, 1996) 강물의

DOC 농도도 높아질 수 있다. 또한 영산강의 경우 도시지역의 비율이 8.01%로 다른 강 유역보다 높는데 도시화지역일수록 시멘트, 생활 오수와 같은 인간 활동으로 인한 물질의 유입 때문에 DIC, DOC 농도가 높을 수 있다는 선행연구 결과를 볼 때, 이 역시 하나의 요인으로 작용할 수 있다(Sickman *et al.*, 2007; Barnes and Raymond 2009).

표 7. 5대강 샘플링 지역의 토지 이용 분류(2007년 기준) (단위: %)

| | 한강G | 영본C | 섬본D | 금본K | 낙본H |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 도시 | 2.87 | 8.01 | 2.66 | 5.97 | 4.12 |
| 농업 | 14.71 | 31.41 | 22.93 | 27.08 | 22.98 |
| 산림 | 75.37 | 52.00 | 67.39 | 59.97 | 67.98 |
| 초지 | 1.67 | 2.54 | 3.03 | 2.36 | 1.06 |
| 습지 | 0.41 | 1.02 | 1.17 | 0.57 | 0.60 |
| 나지 | 1.26 | 1.87 | 0.53 | 1.23 | 1.56 |
| 수역 | 2.00 | 3.16 | 2.30 | 2.82 | 1.69 |

우리나라의 강을 통해 빠져나가는 용존탄소(DC)는 유기탄소(DOC)보다 무기탄소(DIC)의 형태로 빠져나가는 양이 약 다섯배 높았는데, 이 때, 실험을 통해 구한 DIC 농도는 우리나라 6개의 강(한강, 금강, 만경강, 영산강, 낙동강, 섬진강)의 강물의 화학적 조성에서 HCO_3^- 농도가 약 289~1662 μmol (약 3.47~20.0 mg C/L) 라는 선행연구의 결과와 비슷한 수치였다(Shin *et al.*, 2011a).

실험데이터를 이용하여 5대강의 하류지점에서 강을 통해 빠져나가는 용존탄소(DOC, DIC)의 유출량(load, yield)을 계산하였는데, 이 때, 유량자료는 측정지점과 가까운 유량측정소의 2010년 일유량자료를 이용하였다. 계산결과, 용존탄소의 형태로 강을 통해 빠져나가는 양(DC load)의 경우 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강의 순으로 높았지만, 이를 단위넓이 당 탄소유출량(yield)으로 환산한 결과 영산강, 한강, 섬진강, 금강, 낙동강의 순으로 높게 나타났다(표 8).

표 8. 우리나라 5대강을 통해 빠져나가는 탄소 유출량(load, yield)
(2012년 실험데이터 기준)

| | DOC load (10^9 g C yr ⁻¹) | DIC load (10^9 g C yr ⁻¹) | DOC yield (g C m ⁻² yr ⁻¹) | DIC yield (g C m ⁻² yr ⁻¹) |
|-----|--|--|---|---|
| 낙동강 | 19.6 | 57.6 | 1.37 | 4.04 |
| 섬진강 | 5.10 | 31.0 | 1.34 | 8.14 |
| 영산강 | 8.26 | 30.0 | 3.49 | 12.7 |
| 한강 | 26.5 | 208 | 1.22 | 9.57 |
| 금강 | 14.6 | 61.7 | 1.56 | 6.58 |
| 총 합 | 74.1 | 388 | 8.98 | 41.0 |

우리나라의 경우 주요 5대강을 통해 연간 약 462Gg의 탄소가 용존탄소(DIC+DOC)의 형태로 강물을 통해 바다로 빠져나가며, 이 값을 총량측정망의 데이터를 통해 구한 총 유기탄소(DOC+POC) 유출량(110 ± 4.90 Gg)과 합쳐서 정리하면 PIC형태로 빠져나가는 탄소를 제외하고 약 499Gg의 탄소가 5대강을 통해 빠져나가는 것으로 계산된다. 또한, 전체 탄소 유출량 중 약 75.6%가 DIC로 빠져나갔으며, 총량측정망의 TOC 농도와 직접 실험을 통해 구한 DOC 농도의 차이를 POC 농도라 계산하면 우리나라 5대강을 통해 빠져나가는 유기탄소(TOC) 중 약 32.4%가 POC, 약 67.6%가 DOC의 형태로 빠져나가는 것을 알 수 있다.

이 연구에서 탄소의 단위면적당 유출량(yield)를 계산할 때, 일유량자료가 있는 유역만을 대상으로, 2010년 한 해 동안의 측정데이터를 기준으로 하였기 때문에, 더 정확한 탄소 유출량을 산출하기 위해서는 강의 탄소 농도와 유량에 대한 장기적인 모니터링이 필요하다. 총량측정망의 데이터를 이용하여 구한 TOC yield의 경우, 한강유역 중 남한강유역만이 포함되었으며 그마저도 하류지점은

포함되지 않아 서울과 같은 대도시가 위치함으로 인한 토지이용효과를 분명히 보이지 못했다. 직접 강물을 채취한 뒤 실험을 통하여 구한 DOC, DIC 농도를 이용하여 추정된 총 용존탄소(DC) 유출(load, yield)의 경우는 5대강의 하류지점을 기준으로 분석한 결과이기 때문에 5대강의 전체 유역을 대표하는 값이라 할 수 있지만, 바다의 영향을 받지 않는 최하류 지점을 선택하다보니 한강의 경우 광진교가 측정지점이 되어, 광진교보다 하류지점에 위치한 서울지역을 포함하지 못했다. 우리나라 하수 종말 처리장 방류수의 유기탄소와 화학적 산소 요구량(COD)를 측정하여 분석한 한 연구에서 실험기간동안 방류수에 포함된 TOC 농도가 약 3.8~8.1 mg/L로 5대강의 TOC 농도보다 높았는데(변주대, 2010), 인구가 밀집된 서울에 다수의 하수 종말 처리장이 존재하기 때문에 이 유역을 포함하여 계산할 경우 우리나라 강에서 바다로 이동하는 탄소의 양이 더 증가할 수 있다. 그리고 TOC yield를 구하기 위해 2010년의 유량자료를 사용하였는데, 검증된 2012년 유량자료를 이용하여 보완이 필요하다. 또한, PIC의 경우 다른 형태의 탄소(DIC, DOC, POC)보다 적은 비율(전체 탄소 유출량의 약 17.4%; Meybeck, 1999)로 강물에 포함되어 나갈 것으로 기대되지만, 이번 연구에 포함되지 못한 PIC 유출량까지 고려한다면 우리나라의 강을 통해 빠져나가는 전체 탄소 유출량은 예측 값보다 높아질 것으로 보인다.

이 연구를 통해 우리나라 5대강에서 빠져나가는 탄소량을 탄소의 종류별로 정량하였고, 세부 유역별로 단위 넓이 당 빠져나가는 탄소의 양을 지도로 표현하였다. 또한, 토지이용, 토양, 강수량이 강을 통해 빠져나가는 탄소의 유출에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 앞서 언급한 몇 가지 한계점에도 불구하고, 우리나라에서의 탄소유출(yield) 지도와 각 유역의 특성에 따른 탄소 유출량에 대한 분석 결과는 탄소 순환을 이해하고, 강의 수질을 관리하기 위한 정책을 수립하는데 필요한 기초 자료로 쓰일 수 있다.

참 고 문 헌

- Ågren, A., Buffam, I., Bishop, K., Laudon, H., 2010. Modeling stream dissolved organic carbon concentrations during spring flood in the boreal forest: A simple empirical approach for regional predictions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, n/a-n/a.
- Aitkenhead, J.A., McDowell, W.H., 2000. Soil C : N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 127-138.
- Aldrian, E., Chen, C.T.A., Adi, S., Prihartanto, Sudiana, N., Nugroho, S.P., 2008. Spatial and seasonal dynamics of riverine carbon fluxes of the Brantas catchment in East Java. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 113.
- Alvarez-Cobelas, M., Angeler, D.G., Sanchez-Carrillo, S., Almendros, G., 2012. A worldwide view of organic carbon export from catchments. *Biogeochemistry* 107, 275-293.
- Barnes, R.T., Raymond, P.A., 2009. The contribution of agricultural and urban activities to inorganic carbon fluxes within temperate watersheds. *Chemical Geology* 266, 318-327.
- Berner, R.A., 2003. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature* 426, 323-326.
- Bird, M.I., Robinson, R.A.J., Oo, N.W., Aye, M.M., Lu, X.X., Higgitt, D.L., Swe, A., Tun, T., Win, S.L., Aye, K.S., Win, K.M.M., Hoey, T.B., 2008. A preliminary estimate of organic carbon transport by the Ayeyarwady (Irrawaddy) and Thanlwin (Salween) Rivers of Myanmar. *Quaternary International* 186, 113-122.
- Cai, W.-J., 2011. Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO₂ sinks or sites of terrestrial carbon incineration? *Annual Review of*

Marine Science 3, 123-145.

Cole, J.J., Prairie, Y.T., Caraco, N.F., McDowell, W.H., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., Duarte, C.M., Kortelainen, P., Downing, J.A., Middelburg, J.J., Melack, J., 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10, 171-184.

Dai, M., Yin, Z., Meng, F., Liu, Q., Cai, W.-J., 2012. Spatial distribution of riverine DOC inputs to the ocean: an updated global synthesis. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 170-178.

Degens, E.T., Kempe S, Richey JE., 1991. Biogeochemistry of major world rivers / edited by Egon T. Degens, Stephan Kempe, and Jeffrey E. Richey. Published on behalf of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) of the International Council of Scientific Unions (ICSU), and the United Nations Environment Programme (UNEP) by Wiley, Chichester ; New York :

Galy, A., France-Lanord, C., 1999. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget. *Chemical Geology* 159, 31-60.

Hartmann, J., 2009. Bicarbonate-fluxes and CO₂-consumption by chemical weathering on the Japanese Archipelago - Application of a multi-lithological model framework. *Chemical Geology* 265, 237-271.

Huang, T.-H., Fu, Y.-H., Pan, P.-Y., Chen, C.-T.A., 2012. Fluvial carbon fluxes in tropical rivers. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 162-169.

Jeong, J.-J., Bartsch, S., Fleckenstein, J.H., Matzner, E., Tenhunen, J.D., Lee, S.D., Park, S.K., Park, J.-H., 2012. Differential storm responses of dissolved and particulate organic carbon in a mountainous headwater stream, investigated by high-frequency, in situ optical measurements. *J. Geophys. Res.* 117, G03013.

Kim, B., Choi, K., Kim, C., Lee, U.H., Kim, Y.H., 2000. Effects of the

summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Research* 34, 3495–3504.

Kim, S.J., Kim, J., Kim, K., 2010. Organic carbon efflux from a deciduous forest catchment in Korea. *Biogeosciences* 7, 1323–1334.

Lal, R., 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 29, 437–450.

Ludwig, W., Probst, J.L., Kempe, S., 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* 10, 23–41.

Mayorga, E., Aufdenkampe, A.K., Masiello, C.A., Krusche, A.V., Hedges, J.I., Quay, P.D., Richey, J.E., Brown, T.A., 2005. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. *Nature* 436, 538–541.

Meybeck, M., 1993. Riverine transport of atmospheric carbon - sources, global typology and budget. *Water Air and Soil Pollution* 70, 443–463.

Meybeck, M.M., C.J. Vörösmarty, 1999. Global transfer of carbon by rivers. *IGBP Global Change Newsletter* 37, 18–19.

Moore, S., Gauci, V., Evans, C.D., Page, S.E., 2011. Fluvial organic carbon losses from a Bornean blackwater river. *Biogeosciences* 8, 901–909.

Oh, N.-H., Raymond, P.A., 2006. Contribution of agricultural liming to riverine bicarbonate export and CO₂ sequestration in the Ohio River basin. *Global Biogeochem. Cycles* 20, GB3012.

Raymond, P.A., Oh, N.H., 2007. An empirical study of climatic controls on riverine C export from three major U.S. watersheds. *Global Biogeochemical Cycles* 21.

Runkel, R.L., Crawford, C.G., Cohn, T.A., Geological, S., 2004. Load estimator (LOADEST) a FORTRAN program for estimating constituent loads in streams and rivers. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Va.

- Sickman, J.O., Zanolli, M.J., Mann, H.L., 2007. Effects of urbanization on organic carbon loads in the Sacramento river, California. *Water Resour. Res.* 43, W11422.
- Ryu, J.S., Lee, K.S., Chang, H.W., Shin, H.S., 2008. Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea. *Chemical Geology* 247, 66–80.
- Schlesinger, W.H., 1997. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Academic Press, San Diego.
- Schlunz, B., Schneider, R.R., 2000. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux- and burial rates. *International Journal of Earth Sciences* 88, 599–606.
- Shin, W.J., Chung, G.S., Lee, D., Lee, K.S., 2011a. Dissolved inorganic carbon export from carbonate and silicate catchments estimated from carbonate chemistry and delta C-13(DIC). *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 2551–2560.
- Shin, W.J., Ryu, J.S., Park, Y., Lee, K.S., 2011b. Chemical weathering and associated CO₂ consumption in six major river basins, South Korea. *Geomorphology* 129, 334–341.
- Suchet, P.A., Probst, J.L., Ludwig, W., 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.
- Sun, H.G., Han, J.T., Zhang, S.R., Lu, X.X., 2007. The impacts of '05.6' extreme flood event on riverine carbon fluxes in Xijiang River. *Chinese Science Bulletin* 52, 805–812.
- Ushie, H., Kawahata, H., Suzuki, A., Murayama, S., Inoue, M., 2010. Enhanced riverine carbon flux from carbonate catchment to the ocean: A comparative hydrogeochemical study on Ishigaki and Iriomote islands, southwestern Japan. *J. Geophys. Res.* 115, G02017.
- Xia, B., Zhang, L.J., 2011. Carbon distribution and fluxes of 16 rivers

discharging into the Bohai Sea in summer. *Acta Oceanologica Sinica* 30, 43-54.

Yao, G.R., Gao, Q.Z., 2006. Riverine inorganic carbon dynamics: overview and perspective. *Chinese Geographical Science* 16, 183-191.

Yoon, B., Raymond, P.A., 2012. Dissolved organic matter export from a forested watershed during Hurricane Irene. *Geophys. Res. Lett.* 39, L18402.

박승필, 위., 1996. 영산강 하류 유역에 분포하는 유기물층에 관한 연구 - 양장리 일대를 중심으로. *한국지형학회지* 3, 73-82.

변주대, 김.정.신.김., 2010. 논문 : 하수처리장 방류수 중 유기물 함량 지표로써 총유기탄소의 활용. *한국환경분석학회지* 13, 99-103.

기상청, 2011, [기상연보]

기상청, 2012.06, [기상월보]

기상청, 2012.07, [기상월보]

기상청, 2012.08, [기상월보]

환경부, 2012, [수질측정망 운영계획]