

서울대학교 통일평화연구원

연구과제 최종보고서

## 북한 산림생태계 하천수 유기물 특성

2021년 1월 29일

서울대학교 환경계획연구소

이규연, 이승철, 이은주, 차지연, 오능환

## I. 서론

남한 면적의 64%, 북한 면적의 약 75%를 차지하는 산림은 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 유기물로 저장하는 생태계의 주요 탄소저장고이다. 또한 산림생태계는 하천의 수원지로서 하천수의 성분을 분석하면, 북한 산림생태계 내 물질 순환 특성을 유추할 수 있다. 남한과 북한의 산림생태계는 정부의 정책방향에 따라 훼손되기도 복구되기도 하였다. 남한은 2015년 현재 산림면적이 6,184,000 ha(국토면적의 63.7%)이고 ha 당 임목축적은 148.0 m<sup>3</sup>인 반면, 북한은 산림면적이 5,031,000 ha(국토면적의 41.8%)이고 ha 당 임목축적은 63 m<sup>3</sup>(임업통계연보, 2020)로 남한의 1999년도 임목축적량과 비슷하다(63.46 m<sup>3</sup>/ha). 북한 산림면적 대비 산림비율과 임목축적량이 적는데, 특히 북한의 강원도에서는 산림생태계 황폐화율이 현재 31%에 이르는 것으로 추정된다(북한 통계포털, 2020). 산림황폐지는 개간산지, 무림목지, 산간나지로 구성된 경사 15° 이상의 산림을 뜻한다. 북한의 산림황폐는 사계청소(cleaning the field of fire)뿐만 아니라 1970~80년 대 이후 산림자원의 적극적 사용과 변화하지 못한 산업구조가 원인인 것으로 알려져 있다(배재수 외 2007, 박경식 2013, 오삼언 외 2019).

남한의 경우 1960년대 초반까지 산림황폐화율이 80% 이상으로 보고되었으나 1973년을 기점으로 화전정리사업과 농촌유입인구의 저하, 그리고 치산녹화가 동시에 이루어지면서 황폐화된 산림을 복구하고 증식까지 할 수 있었고 황폐화율은 1% 이하이다(배재수 외, 2007, 유병일 외 2014, 임업통계연보, 2020). 이러한 산림정책과 경제적 상황 변화로 인해, 북한 산림유역에서 유출되는 하천 탄소의 구성 성분과 계절에 따른 변화는 우리나라 산림유역 하천과는 다르리라 예상된다.

그럼에도 불구하고, 지금까지 발표된 북한 산림 실태조사의 대부분은 문헌연구나 위성자료를 통한 간접적인 추정에서 머물러 있다(최현아 외, 2017, 양아람 외, 2020). 이런 측면에서 볼 때, 북한에서 발원하여 휴전선을 넘어 남한으로 흘러 들어오는 하천은 실측이 어려운 북한 산림생태계의 현재 상태를 직접 측정하고 파악할 수 있는 중요한 연구 대상이다. 산림생태계 내 식생과 토양에 축적된 유기물 중 일부는 하천을 통해 유역으로부터 빠져나가 육수(inland water)는 물론 연안/해양생태계에까지 직접 영향을 미칠 수 있기 때문에, 산림생태계 하천수 성분을 면밀히 분석하는 것은 단순히 대상 산림유역 특성을 이해하는 것을 넘어 전반적인 수생태계 관리를 위해서도 필요하다.

이 연구에서는 북한에서 발원하여 휴전선을 넘어 남측으로 흘러오는 하천의 용존탄소 농도와 생지화학적 특성이 계절에 따라 어떻게 달라지는지 최초로 분석을 시도하였다. 향후 통일한반도의 하천생태계 관리를 위해서는 하천수의 주요 성분과 특성에 대해서도 정보가 필요하고, 이 연구의 결과물은 그 기초 자료로 하천 관리에 활용될 수 있다.

## II. 연구방법

### 1. 조사지점

북한 산림생태계와 남한 산림생태계에서 유출되는 하천탄소 성분을 비교하기 위해 북한하천, 소양강, 인북천, 방태천, 총 네 곳에서 하천수를 채수하였다(표 1; 그림 1). 연구대상지 선정에 사용한 유역분석 도구는 ArcGis Pro 10.8이며 유역면적과 피복분류 및 비율, 하천차수 계산을 위해 spatial analyst tool을 활용하였다. 유역의 기본 등고 데이터는 earthexplorer.usgs.gov에 등록된 SRTM 1 Arc-second Global의 최신 30m x 30m 영상을 활용하였다. 북한과 휴전선 부근을 계산할 때는 공간정보포털 오픈마켓(<http://data.nsd.gov.kr/dataset>)에 등록된 국토교통부 행정구역시군구 경계 shp 파일을 사용하였다. 각 하천유역에서 남한에 속한 ‘남한 유역면적 비율’을 구하고, 전체 하천유역에서 남한 유역면적을 빼 뒤 ‘북한 유역면적 비율’을 구했다(표 1). 토지피복도를 분류하여 유역 내 산림비율을 계산할 때는 환경공간정보서비스(egis.me.go.kr)에서 대분류지도를 받아 사용하였다.

북한하천 채수 지점은 휴전선에서 1 km 이내에 위치한 오작교로 대상 유역 내 북한 면적의 비율이 95.0%이다(표 1). 유역 내 산림의 비율은 82.7%이며 4차 하천에 해당한다. 이와 비교되는 우리나라 하천은 소양강으로 유역 내 산림 비율이 92.5%이며 하천차수는 5차이다. 북한하천과 소양강 유역보다 작은 면적의 유역에서 유출된 하천수의 성분도 비교하기 위해 우리나라의 방태천(북한 유역면적: 0%)과 인북천(북한 유역면적: 39.9%)에서도 채수하였다(표 1; 그림 1). 인북천의 유역 내 산림비율은 94.6%, 방태천의 유역 내 산림비율은 100%이다.

표 1. 연구대상 남북하천과 유역 정보.

	북한하천	소양강	인북천	방태천
총 유역면적 (km <sup>2</sup> )	3,131	2,080	262	3
하천차수	4	5	3	1
산림비율(%)	82.7	93.2	94.6	100.0
농지비율(%)	15.0	5.8	4.5	0.0
북한 유역면적 비율 (%)	95.0	7.5	39.9	0.0
남한 유역면적 비율 (%)	5.0	92.5	40.1	100.0

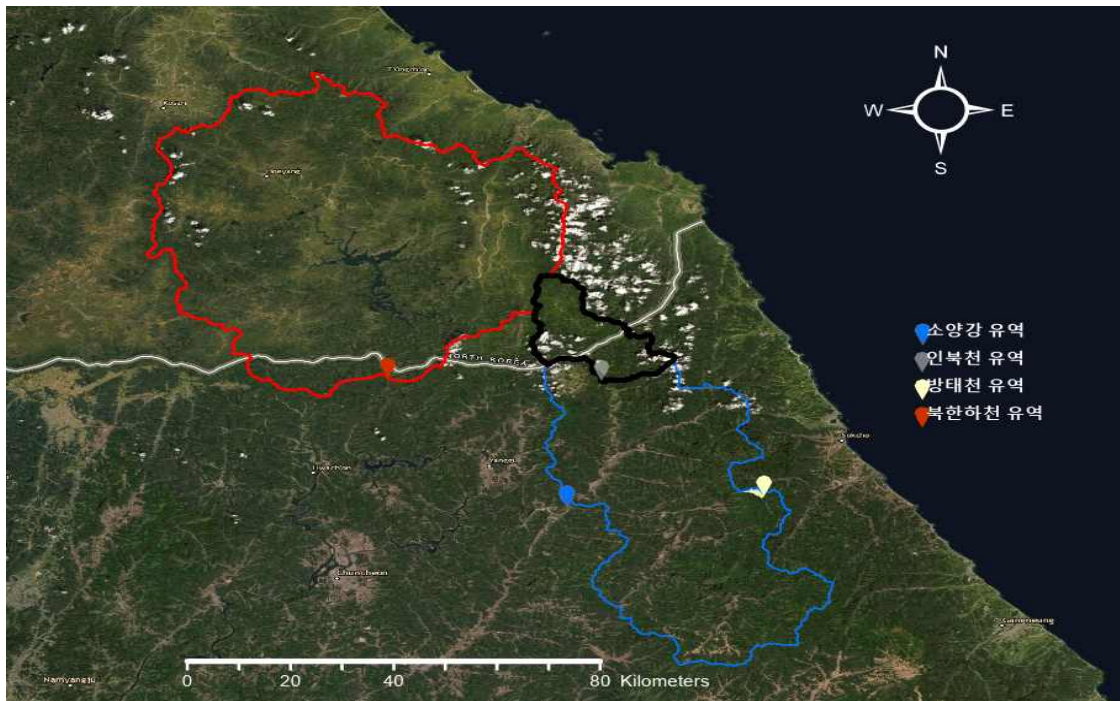


그림 1. 연구 대상 남북하천 유역과 채수 지점. 유역 경계는 실선으로 시료 채취 지점은 풍선모양으로 표시함. 빨강, 파랑, 노랑, 검정(회색)은 각각 북한하천, 소양강, 방태천, 인북천을 의미함. 단, 소양강 전체 유역은 파란색 경계와 검은색 경계를 합한 지역임.

### 1.1. 강수량

북한하천, 소양강, 인북천, 방태천은 산악지에 위치하여, 수 km의 짧은 거리내에서도 강수량의 차이가 날 수 있다. 이러한 현장 특성을 반영하기 위해 각 채수지점의 강수량을 ArcGis Pro 10.8의 IDW(Inverse distance weighted) 기능을 사용하여 보정하였다. 강수량은 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)의 방재기상관측(AWS, Automatic Weather Station)에서 측정된 자료를 사용하였다. 강수량 보정에 활용한 채수지점 주변의 기상관측 센터는 표 2와 같다.

표 2. 강수량 보정에 활용한 AWS 지점

하천명	북한하천	소양강	인북천	방태천
	평화(680)	원통(321)	원통(321)	기린(557)
AWS	원동(681)	신남(585)	해안(518)	양양영덕 (593)
지점명	임남(682)	양구(556)	서화(594)	오색(596)
(지점번호)	상서(322)	기린(557)	향로봉(320)	
	마현(323)			
	방산(587)			

시료 채취 일자를 기준으로 계산한 4개 하천의 30일 누적 강수량 평균은 7월 23일부터 8월 21일 동안 753.3 mm로 가장 높았으며, 그 다음은 8월 12일에서 9월 10일 사이로 419.8 mm였다(표 3). 100 mm 이상의 많은 강수는 방태천을 제외하고 6월부터 8월에 집중되었다.

표 3. 시료채취 날짜 기준 30일 누적 강수량 (mm)

시료채취 날짜	30일 누적 강수량 (mm)					표준편차
	북한하천	소양강	인북천	방태천	평균	
6월 9일	97	92	97	133	104	19
7월 17일	151	157	214	645	291	237
8월 21일	-	683	855	722	753	90
9월 10일	289	317	456	617	419	150
10월 8일	32	41	56	186	78	72
11월 9일	1	1	1	1	1	0
12월 10일	74	69	66	45	63	12

## 2. 분석 항목

### 2.1. 수온, 전기전도도, 주요 성분 농도와 광학적 특성

하천수 시료는 2020년 6월부터 12월까지 매월, 400℃에서 미리 태운 유리병에 약 2~4 L씩 채취하였다. 단, 폭우로 휴전선 접경지역 접근이 제한되었던 8월에는 북한하천 시료를 채수하지 못했다. 수온과 전기전도도는 YSI Model 60 pH meter (Yellow Springs Instruments, OH, USA)로 현장에서 측정하였다. 이 후 실험실에서 전기전도도와 pH를 각각 YSI Model 60 pH meter, 827 pH meter (Metrohm AG., Herisau, Switzerland)를 사용하여 재측정한 뒤, 0.4 µm 유리섬유필터(GF-5, Macherey-Nagel)로 입자성 물질을 걸러내었다. 여과된 시료를 사용하여 용존유기탄소 농도([DOC])는 TOC-VCPH (Shimadzu Corporation, Japan)로 측정하였으며, 알칼리도는 0.1M HCl 용액을 이용하여 Gran 적정법으로 분석하였다. 용존무기탄소 농도([DIC])는 알칼리도와 pH, 온도 등을 입력변수로 CO2SYS (CO2SYS Version.2.1, <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/co2sys/>; Rosentreter and Eyre, 2020; Zhang et al., 2009) 프로그램을 이용하여 계산하였다. 용존유기탄소 중의 방향족(aromaticity) 탄소 비를 보여주는 SUVA<sub>254</sub>는 용존유기물의 UV흡광도를 Cary 300 UV-Visible spectrophotometer (Agilent technologies, Santa Clara, CA, USA)로 측정한 뒤, 254nm에서의 UV흡광도를 [DOC]로 나누어 구했다.

## 2.2. 형광 특성

하천수 시료의 형광 특성은 Cary Eclipse Fluorescence spectrophotometer (Agilent technologies, Santa Clara, CA, USA)를 사용하여 분석하였다. Excitation-Emission Matrix(EEM) 분석을 위해 여기(excitation)파장을 5 nm 마다 240~450 nm에서, 방출(emission)파장을 2 nm 마다 300~600 nm로 하고 시료를 측정하였다. 시료 내 자연유기물의 형광값은 시료의 형광값에서 증류수의 형광값을 제외하고 산출하였다. 산출된 형광값은 Matlab (The MathWorks Inc. version R2020a)의 DOMFluor 프로그램을 사용하여 PARAFAC(parallel factor analysis) 분석을 수행하였다. PARAFAC 분석 결과, 총 3개의 구성성분을, 문헌에 보고된 기존 형광값과의 매칭(matching)을 비율%로 보여주는 “OpenFluor” 를 이용하여 구분하였다. 주성분 분석 결과는 OpenFluor(<https://openfluor.lablicate.com/>)에 등록하여 기존 연구 결과들과 비교, 확인하였다. 성분1(C1)은 여기파장(Ex)과 방출파장(Em)이 각각 240(325) nm, 464 nm인 휴믹계 성분으로 조사되었다 (Derrien et al., 2018; Derrien et al., 2019). 성분2(C2)는 여기파장과 방출파장이 각각 250 nm, 540 nm로 육상기원 휴믹물질의 특성을 보였다. 성분3(C3)은 수계에서 자라는 미생물의 단백질(protein bound amino acids)과 유사했다(Stedmon et al., 2007).

## 2.3. 수소 핵자기공명 분광법 ( $^1\text{H}$ Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy)

수소 핵자기공명 스펙트럼 분석을 위해 하천수 내 용존유기물을 추출하였다. 0.4  $\mu\text{m}$  공극 크기를 가지는 유리섬유필터(GF-5, Macherey-Nagel)로 거른 시료를 HPLC grade 12M HCl(Merck KGaA, Darmstadt, Germany)을 이용하여 pH 2로 조정하고 500 mg BondElut PPL cartridge (Agilent technologies, Santa Clara, CA, USA)에 약 4L의 시료를 10 mL/min 이하의 속도로 흘려주었다. 이후 PPL cartridge에 pH 2로 조정한 6 mL 초순수(deionized water)를 1 mL/min 이하로 흘려 PPL cartridge 안에 남아 있을 미네랄을 제거하였다. 여기에 HPLC grade의 99.9% 메탄올 (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)을 6 mL 흘려, 4 L의 하천수로부터 최종 2~10 mg의 유기물을 추출하였다. 추출된 시료를 서울대학교 농생명과학공동기기원에 의뢰하여 Bruker Avance III 600 MHz spectrometer (Bruker Biospin, Rheinstetten, Germany)를 이용하여  $^1\text{H}$  NMR Spectrum을 얻었다. 하천 용존유기물을 추출하여  $^1\text{H}$  NMR을 측정한 기존 연구들에서 방향족으로 판단하는 부분은 보통 6~9 ppm으로 알려져있다(Asakawa et al., 2007). 우리 연구에서는  $^1\text{H}$



NMR 스펙트럼에서 방향족 수소 피크(peak)가 나타나는 부분으로 7.2~8.2 ppm, 알콜과 당의 수소 피크가 나타나는 곳을 3.5~4.4 ppm으로 기준을 잡고, 피크 면적을 적분하였다.

#### 2.4. 탄소동위원소비( $\Delta^{14}\text{C}$ 와 $\delta^{13}\text{C}$ )

0.4  $\mu\text{m}$  유리섬유필터(GF-5, Macherey-Nagel)로 거른 하천시료를 40%  $\text{H}_3\text{PO}_4$ 로 산화시키고 초고순도 헬륨 가스를 불어주어 하천시료에 포함된 용존무기탄소를 우선 제거하였다. 하천 수 내 용존유기탄소를 이산화탄소로 바꾸기 위해 초고순도 산소를 UV reactor안에 하천시료와 함께 채운 뒤, UV를 4시간 이상 쬐여주었다. 이렇게 얻어진 이산화탄소를 액체질소를 이용하여 분리한 뒤 Pyrex 관에 밀봉하였다. 밀봉된 시료를 미국 해양과학질량가속분석센터(National Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry; NOSAMS)로 보내 탄소동위원소비( $\Delta^{14}\text{C}$ 와  $\delta^{13}\text{C}$ )를 분석하였다.

#### 2.5. 통계처리

각 하천의 변수(강수량, 전기전도도, pH, 수온, 용존유기탄소, 용존무기탄소,  $\text{SUVA}_{254}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ , PARAFAC의 성분 C1, C2, C3, Proton NMR 측정 alkyls과 aromatics)에 대해 상관분석, ANOVA(일원배치), 사후분석으로 Tukey 분석을 수행하였으며 IBM SPSS statistics 26을 이용하였다.

### Ⅲ. 연구결과 및 고찰

#### 1. 강수량, 현장 전기전도도, pH1.

##### 1. 강수량

강수량의 증가는 지표수와 지하수의 유출량을 증가시키고 결국 하천에서 관찰되는 유기물의 특성과 양도 변화시킬 수 있기 때문에, 연구대상 하천들 사이에 30일 누적 강수량의 유의미한 차이가 있는지 확인하였다. 각 채수 시점과 지점에 따른 차이를 살펴보면 방태천의 7, 9월을 제외하고는 4 곳 하천 사이의 강수량 차이가 크지 않았다(그림 2). 사후분석에서 6~12월 전체에 대한 강수량의 차이는 유의미하지 않은( $p>0.05$ ) 것으로 나타났다(그림 3).

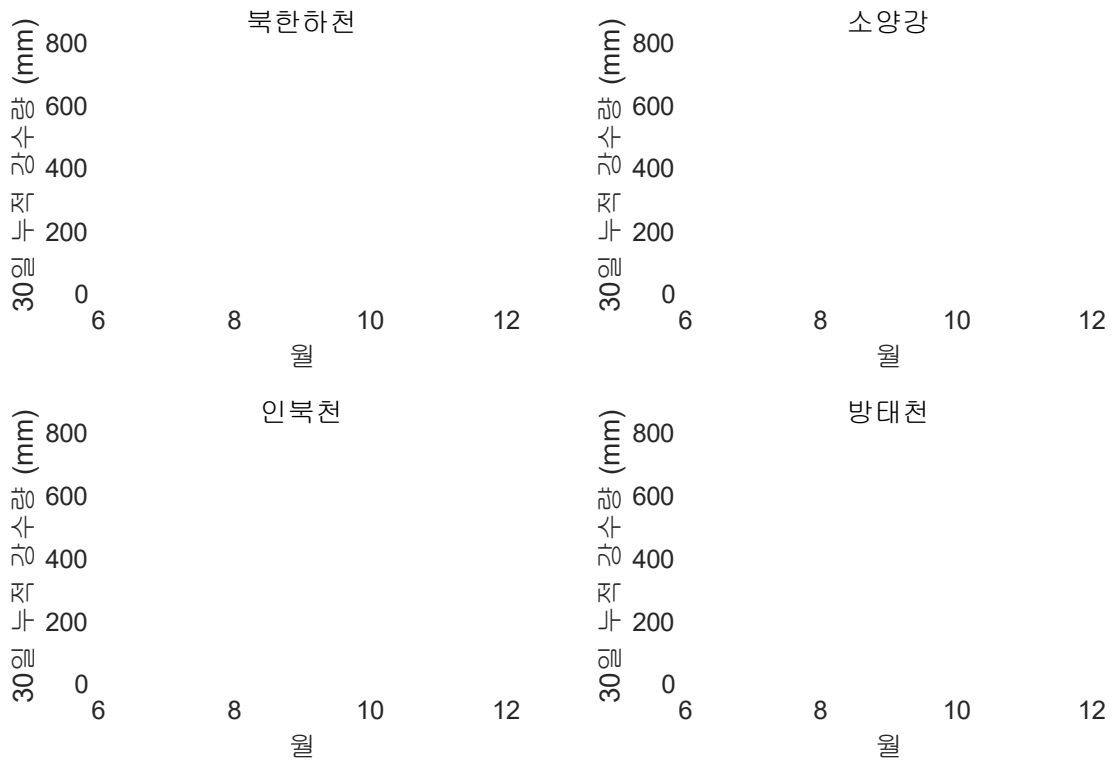


그림 2. 연구대상 남북하천들의 채수시점 기준 30일 누적 강수량(mm)

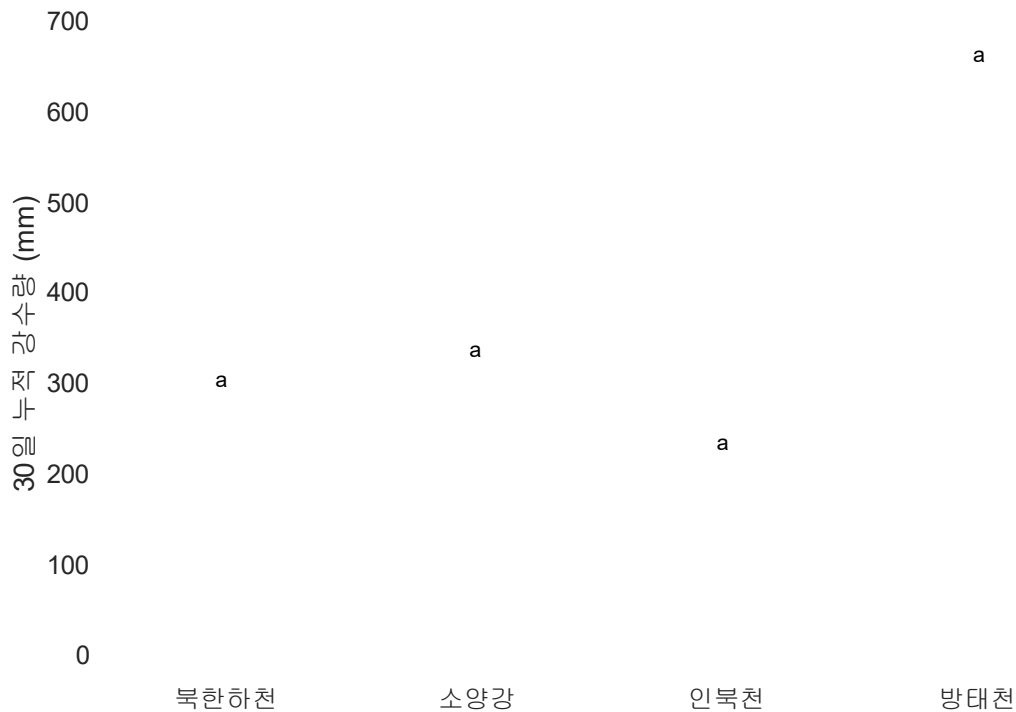


그림 3 남북하천들의 채수시점 기준 30일 누적 강수량(mm) 분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함(Tukey's HSD,  $P > 0.05$ )

## 1.2. 전기전도도

총 4개의 하천 가운데 평균 전기전도도가 제일 높은 곳은 북한하천으로  $168.9 \mu\text{m/cm}$ 이었으며, 나머지 연구대상 3곳 하천들과 유의미한 차이를 보였다( $p < 0.05$ , 그림 5). 소양강은 평균 전기전도도가  $76.2 \mu\text{m/cm}$ , 인북천은  $54.6 \mu\text{m/cm}$ 이었으며, 방태천은  $35.3 \mu\text{m/cm}$ 로 가장 낮았다(그림 4, 5). 평화의 댐으로부터 충주댐 인근의 101개 수질측정소(북한강 6개 지점과 남한강 95개)에서 2019년 1월부터 2020년 8월 사이에 측정된 전기전도도와 비교하면, 연구대상 하천들의 전기전도도는 주변 산림유역 가운데에서도 1분위 값 이내로 낮은 값을 보였다(그림 6).

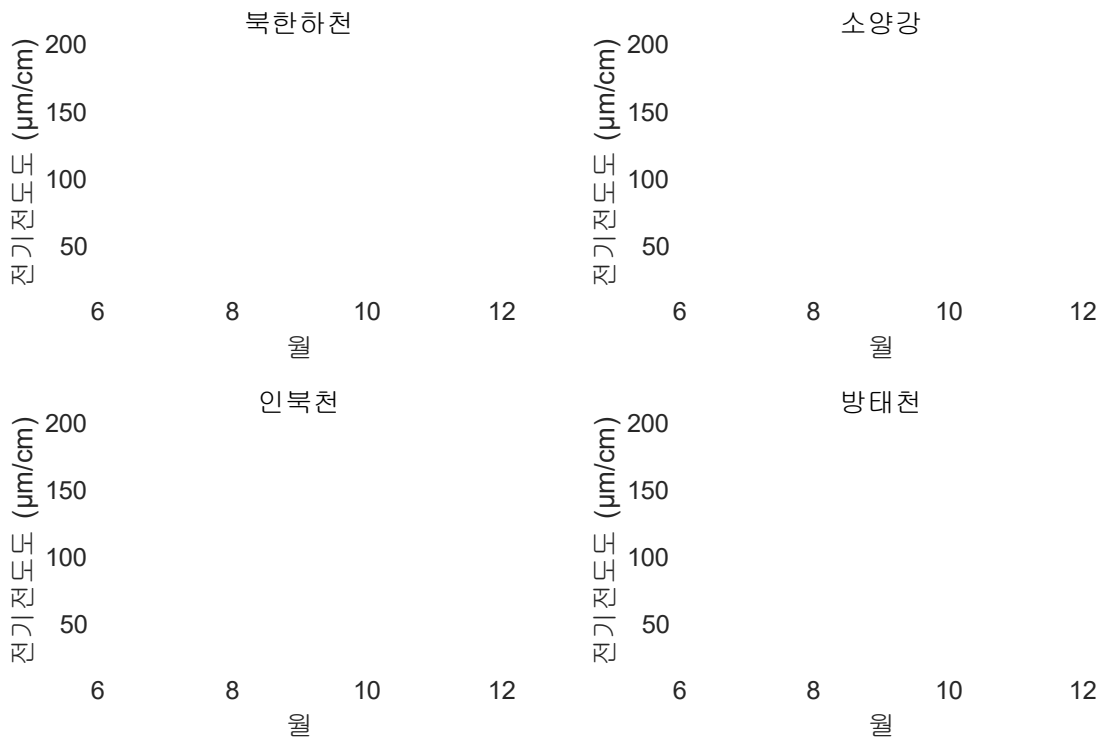


그림 4. 연구대상 남북하천들의 월별 전기전도도( $\mu\text{m/cm}$ )



그림 5. 남북하천들의 전기전도도 분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함 (Tukey's HSD,  $P > 0.05$ )

전기전도도 ( $\mu\text{m/cm}$ )

600

500

400

300

200

100

1

전기전도도 n=101 (남한강,북한강)

그림 6. 남한강과 북한강(평화의댐, 소양강댐, 충주댐 주변 101개 지점)의 2019.1~2020.8 전기전도도 분포

### 1.3. 하천수 pH

2020년 6월부터 12월 사이에 측정된 하천수 pH의 평균은 북한하천에서 7.79, 소양강은 7.45, 인북천은 7.51, 방태천은 7.23이었다(그림 7, 8). 6개월 동안 pH 변화가 가장 큰 곳은 소양강으로 8.18에서 7.33까지 내려갔다. 변화 폭이 제일 적었던 곳은 북한하천으로 7.65~8.00이었다. 앞서 살펴본 남한강과 북한강 101개 수질측정소의 2019년 1월에서 2020년 8월 사이 pH의 최소값은 7.6, 최대값은 8.7, 중간값은 8.2이었다. 이번 연구대상 하천수 pH도 전기전도도와 마찬가지로 남한강 북한강 101개 측정소 값을 기준으로 1분위 이하의 낮은 값으로 나타났다. 남북하천수의 pH를 비교하면, 북한하천수의 pH가 가장 높고 방태천 pH가 제일 낮았고, 통계적으로 유의미한 차이가 있는 하천으로 분류되었다( $p < 0.05$ )(그림 8).

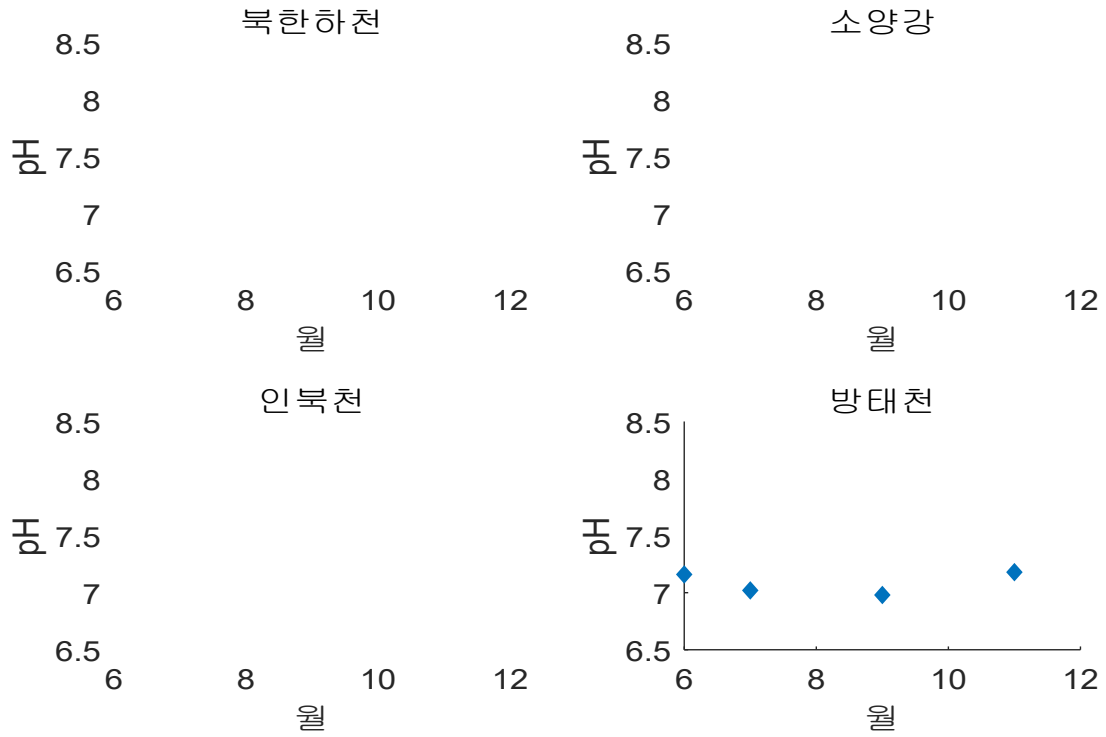


그림 7. 연구대상 남북하천들의 월별 pH

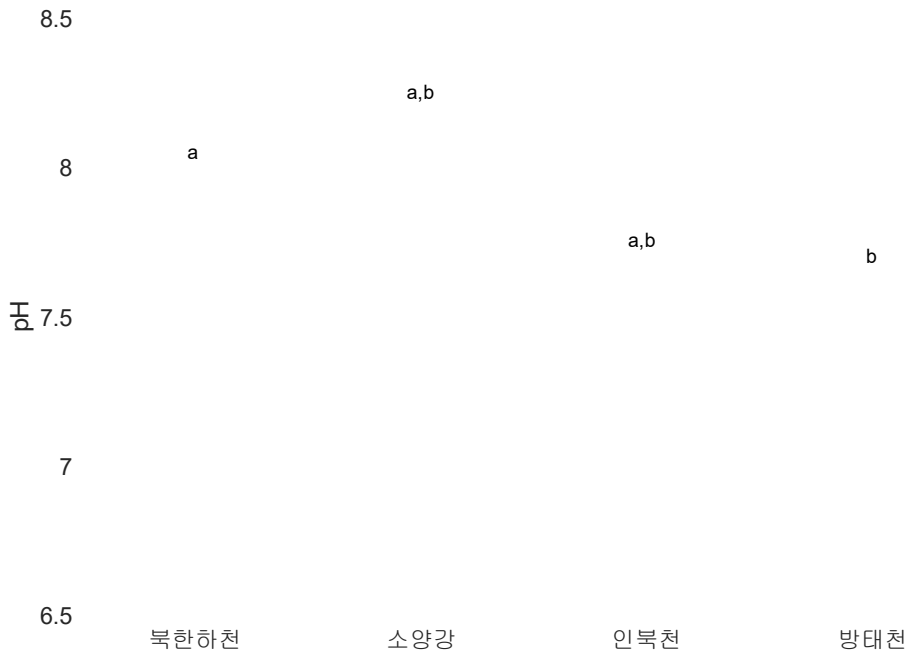


그림 8. 남북하천들의 pH 값 분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함 (Tukey' s HSD, P > 0.05)

## 2. 용존유기탄소

북한하천의 [DOC]는 6월부터 12월까지 1.0 mg/L 정도로 비교적 일정하게 나타났다(그림 10). 소양강의 [DOC]는 1.4~2.0 mg/L로 가장 농도가 높았고 통계적으로 나머지 하천들과 유의미한 차이가 있었다(그림 11;  $p < 0.05$ ). 소양강의 경우 인북천이나 방태천과 달리 하천 상류의 인구밀도(최소 2만 여명 이상이 거주; 인제군, 홍천군 국가통계포털 자료)가 높고, 농지비율이 높은 유역(예: 만대천 유역)을 포함하고 있어 [DOC]가 높을 수 있다(Lee et al., 2021). 인북천과 방태천의 [DOC]는 각각 0.6~1.1 mg/L, 0.6~0.9 mg/L 였다(그림 10).

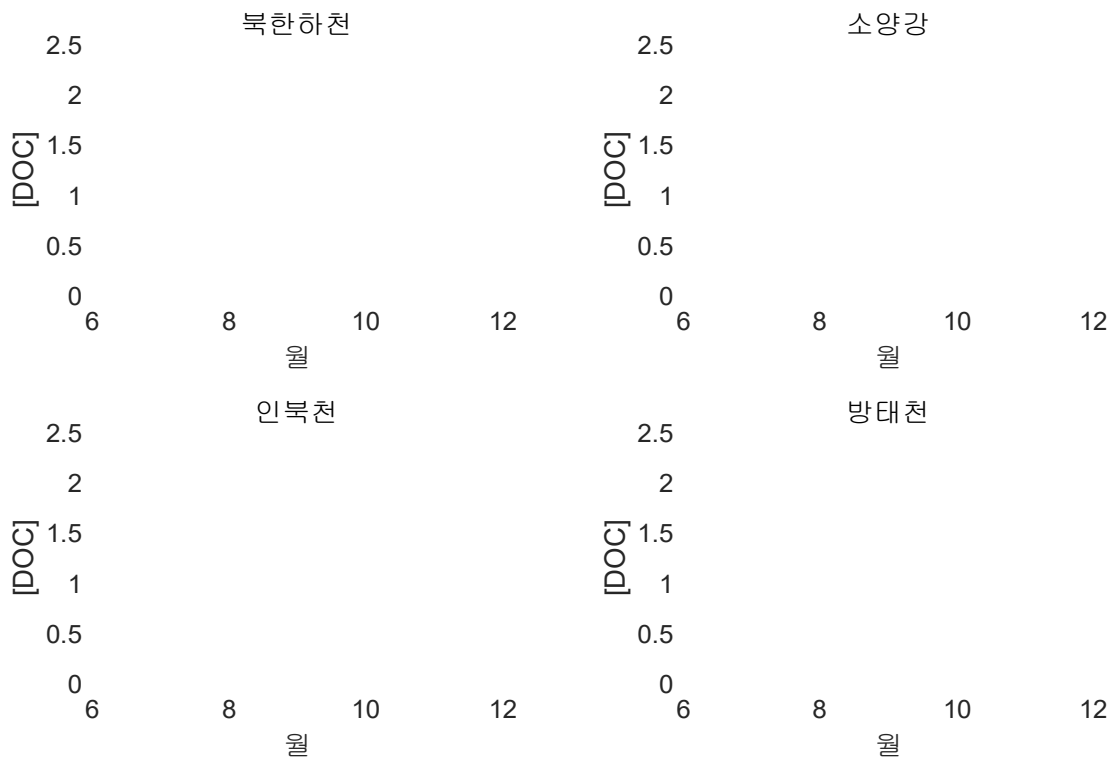


그림 10. 연구대상 남북하천들의 2020년 월별 [DOC]

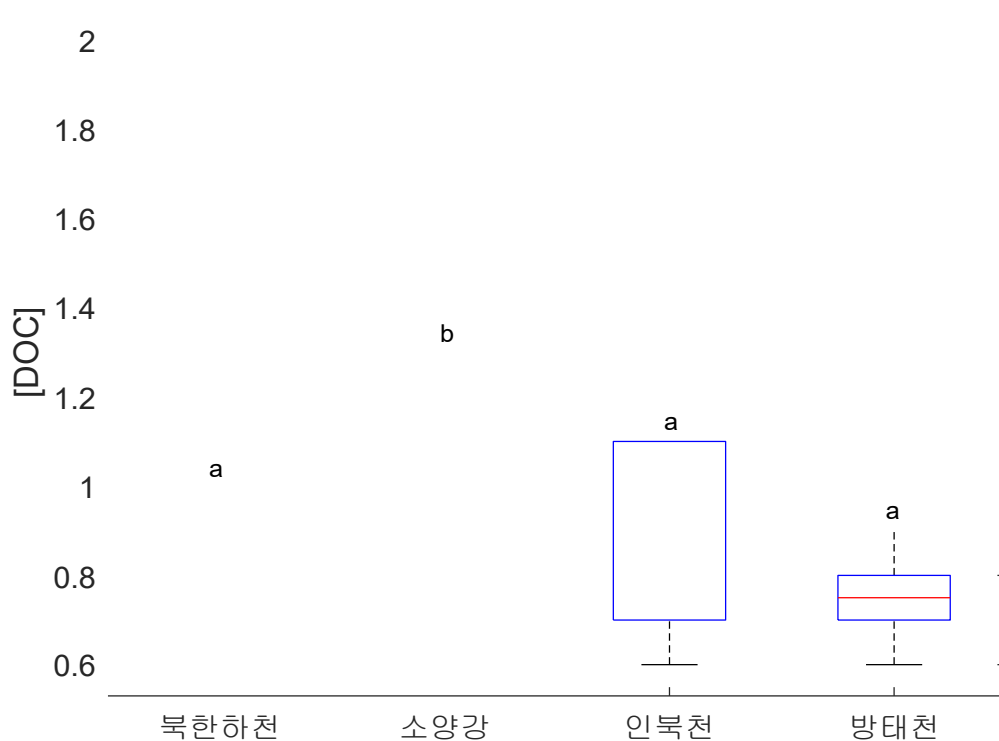


그림 11. 남북하천들의 [DOC] 분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함(Tukey's HSD,  $P > 0.05$ )

### 3. 용존무기탄소

북한하천의 평균 [DIC]는 15.9 mg/L로, 소양강(5.1 mg/L)의 3배, 인북천(3.9 mg/L)의 4배, 방대천(2.4 mg/L)의 5배 이상으로 통계적으로 유의하게 높았다(그림 12, 13). 북한하천의 경우 북한 접경지역 정보가 제한되어있으나 다른 연구대상 하천들 보다 농지비율(~10%)이 높은 동시에 남한과 달리 무림 목지(unstocked forest land) 등 산림황폐화율(북한 강원도 30%)이 높은 것이 [DIC]를 높이는 원인일 수 있으나(예: 농업활동을 위한 탄산칼슘 시비) 기반 암과 토양 특성에 따라서도 달라질 수 있어 추가 분석이 요구된다.



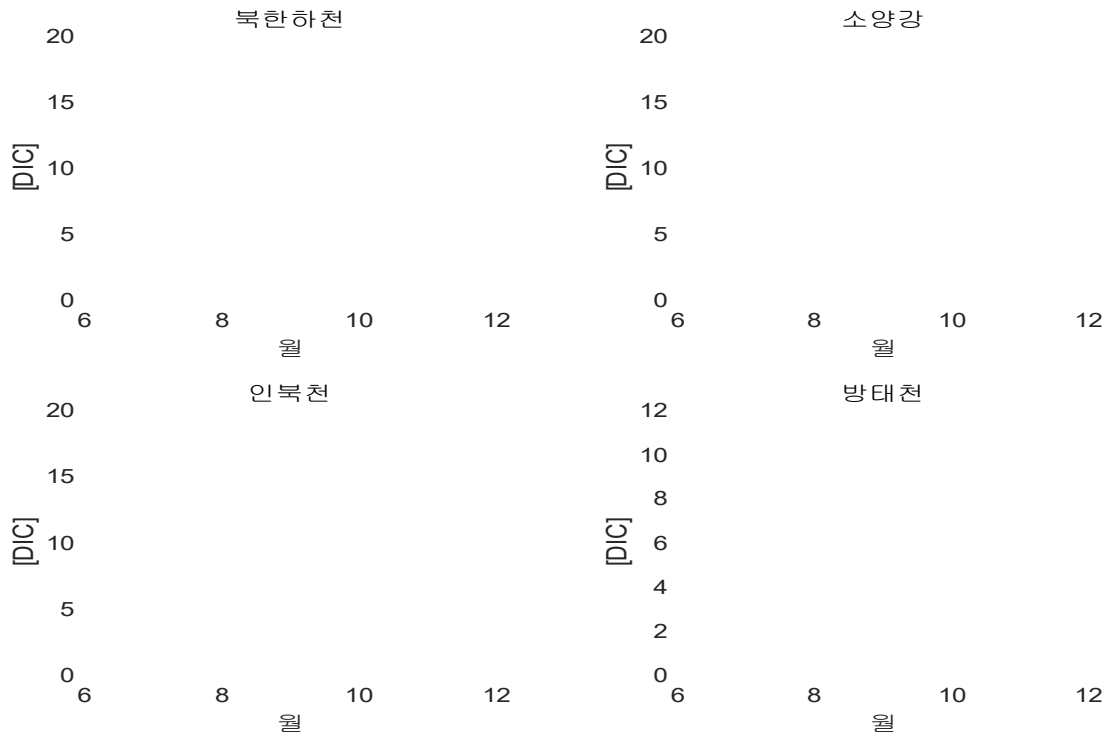


그림 12. 연구대상 남북하천들의 월별 [DIC]

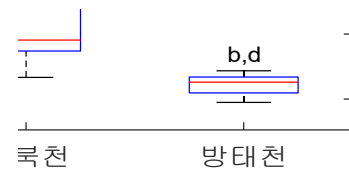


그림 13. 남북하천들의 [DIC] 분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함 (Tukey' s HSD,  $P > 0.05$ )

#### 4. $SUVA_{254}$

평균  $SUVA_{254}$ 는 산림비율이 높은 소양강(3.0 L/mg-m), 인북천(3.2 L/mg-m), 방태천(3.5 L/mg-m)에서 북한하천(2.3 L/mg-m)보다 높게 나타났다(그림 14, 15). 소양강과 인북천의  $SUVA_{254}$ 에 대해서 북한하천과 방태천의 평균 차이는 모두 유의미하지 않았(그림 15). 모든 하천에서 여름 풍수기에  $SUVA_{254}$ 가 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 강우 시 육상식물에서 기원한 방향족 유기물의 유입이 증가하기 때문인 것으로 추정된다(Lee et al., 2021).

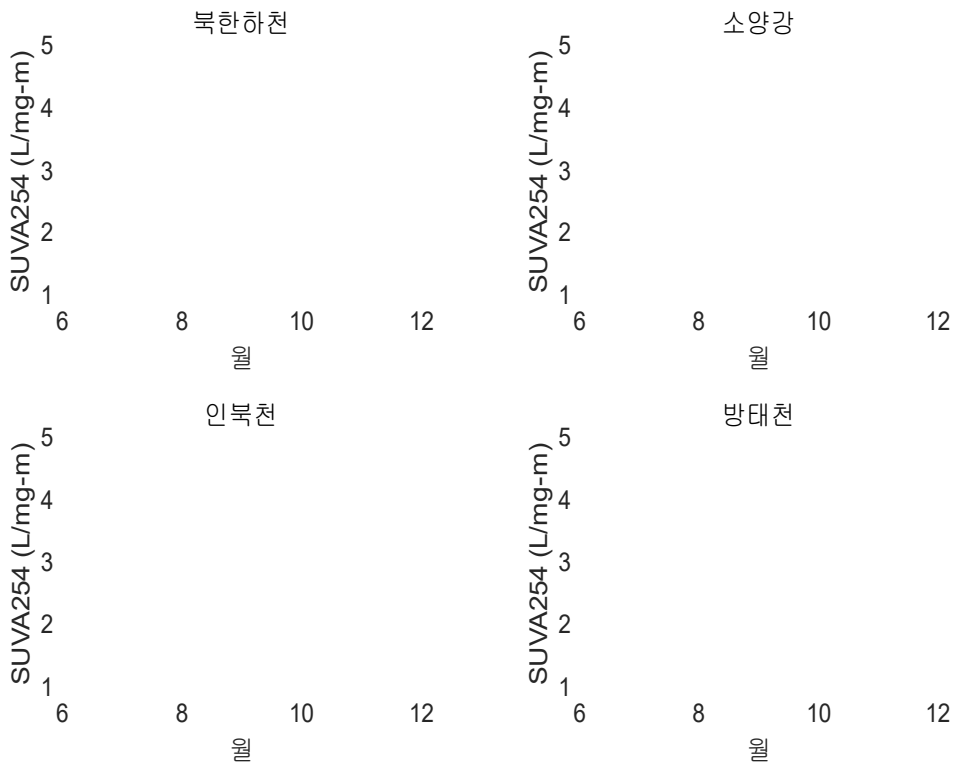


그림 14. 연구대상 남북하천들의 월별 SUVA<sub>254</sub>



그림 15. 남북하천들의 SUVA<sub>254</sub> 분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함(Tukey's HSD, P > 0.05)

## 5. 형광특성분석

북한하천에서 C1은 6, 9월을 제외한 나머지 기간 동안 C2와 C3에 대한 상대적 비율이 100%였다. 북한하천에서는 풍수기 직전인 6월에 C3가 100% 였고, 풍수기 뒤에는 C1이 45.2%, C2가 11.3%, C3가 43.5%로 나타났다(그림 16). 연구대상 하천들 가운데 방태천에서 C2 비율이 가장 높았으며 6월에서 12월까지 8.5%에서 57.3%로 증가했다(그림 16). 북한하천과 인북천에서는 9월 풍수기 이후에 육상기원 휴믹물질 C2와 단백질계 성분 C3가 나타나지 않았다(그림 16). 그러나, 연구지점 사이에 각 구성성분 비율의 유의한 차이는 보이지 않았다(그림 17). C1, C3 비율의 하천 간 차이는 유의하지 않았던 반면, C2 비율의 경우 북한하천에서 거의 검출되지 않았기 때문에 방태천과 비교하여 통계적으로 유의한 차이를 보였다(그림 17).

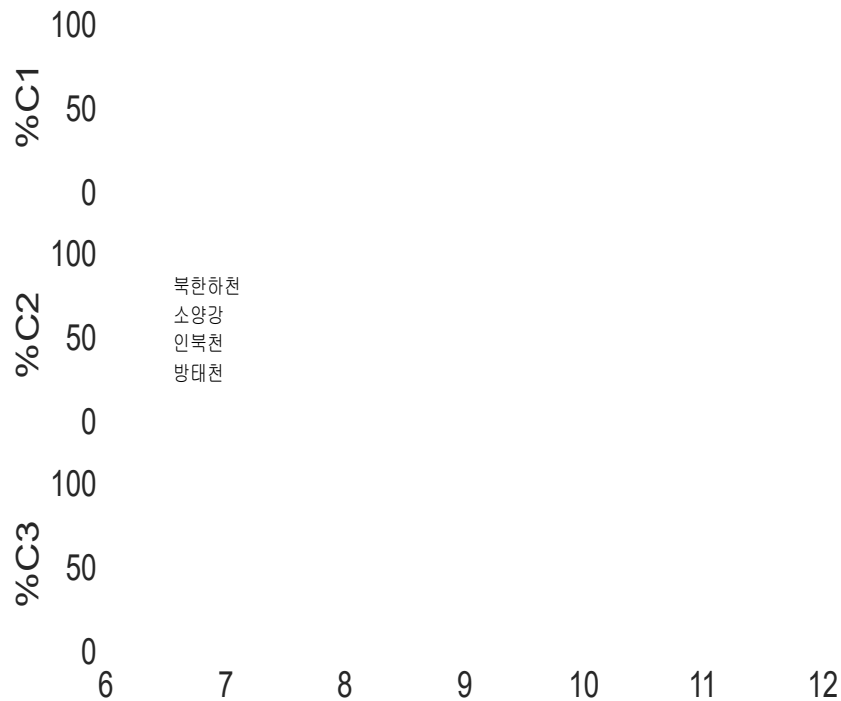


그림 16. 연구대상 남북하천들의 월별 PARAFAC 성분 (C1, C2, C3)

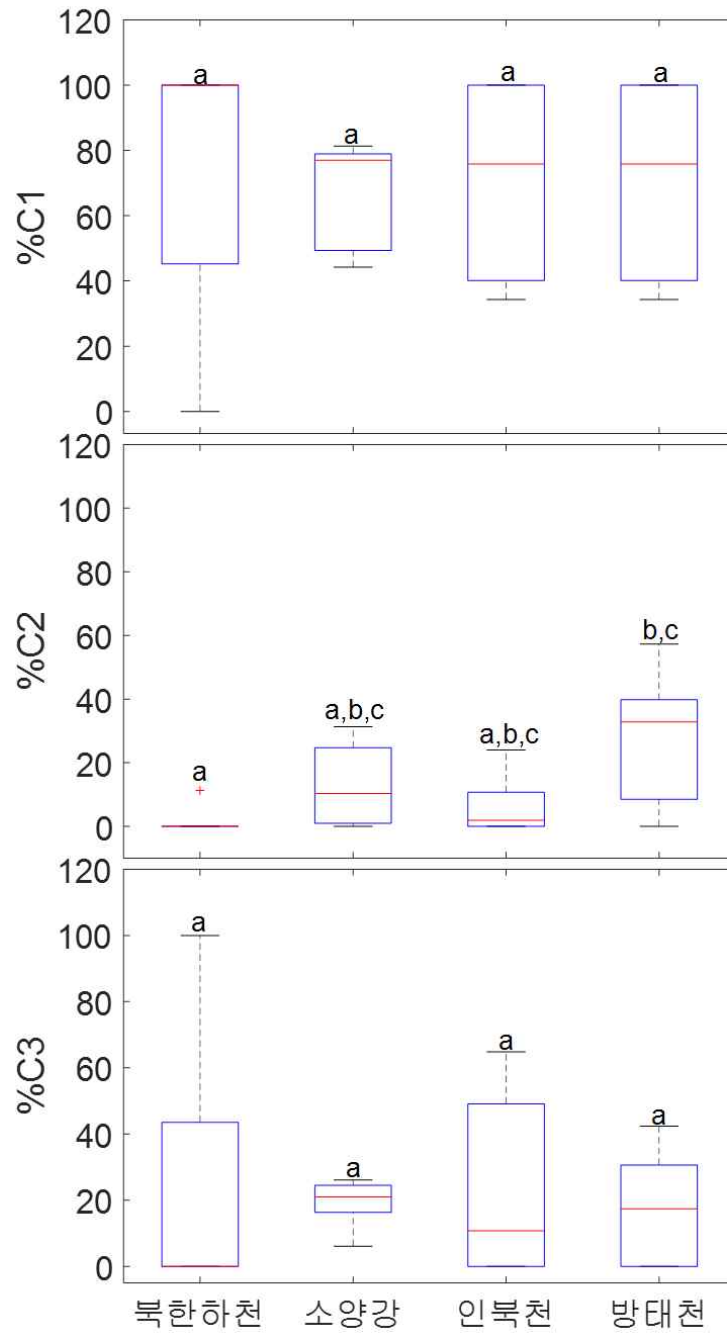


그림 17 남북하천들의 PARAFAC 성분 (C1, C2, C3) 분포 (상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함(Tukey's HSD,  $P > 0.05$ )

## 6. $^1\text{H}$ NMR(Nuclear Magnetic Resonance)

남북하천 모두 방향족 유기물의 비율이 6월에 가장 높고 겨울로 갈수록 줄어드는 경향을 보였다. 우리나라와 기후가 비슷한 일본 산림 계류수에서도 방향족 유기물의 비율이 풍수기 직전까지 증가하다 강수가 크게 증가하는 여름철부터 줄어드는 경향이 나타났다(Asakawa et al., 2007). 알킬기 수소 피크 적분량은 북한하천에서 평균 81.3%로 가장 높았고, 방태천에서 평균 76.5%로 제일 낮았으며, 반면에 방향족 피크 적분량과 알콜 피크 적분량 등은 방태천의 평균이 23.5%로 가장 높고 북한하천이 18.7%로 제일 낮았다(그림 18). 하지만, 알킬기와 방향족의 평균 차이는 하천간 통계적으로 유의하지 않았다(그림 18).

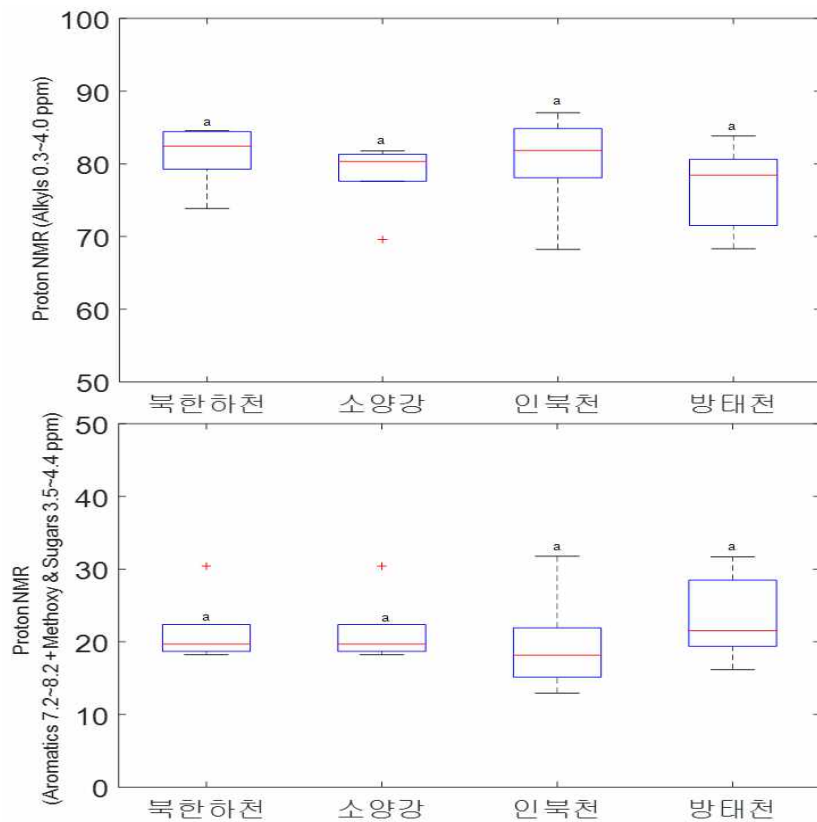


그림 18. 남북하천들의 proton NMR에서 나타난 alkyls와 aromatics & sugars의 분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함(Tukey's HSD,  $P > 0.05$ )

## 7. 용존유기탄소 동위원소비( $\Delta^{14}\text{C}$ 와 $\delta^{13}\text{C}$ )

### 7.1. $\Delta^{14}\text{C}$ -DOC

북한하천의 평균  $\Delta^{14}\text{C}$ -DOC는 -80.90%로 소양강, 인북천, 방태천보다 유의하게 낮았다(그림 19). 북한하천과 인북천은 갈수 시기가 길었던 6월에  $\Delta^{14}\text{C}$ -DOC가 각각 -95.08%, -30.92%로 가장 낮게 나타난 반면, 소양강은 9월 풍수기에  $\Delta^{14}\text{C}$ -DOC 값이 가장 낮았고(-41.27%), 방태천은 연구기간 내  $\Delta^{14}\text{C}$ -DOC의 변화폭이 가장 적었다(-12.67~8.93%).

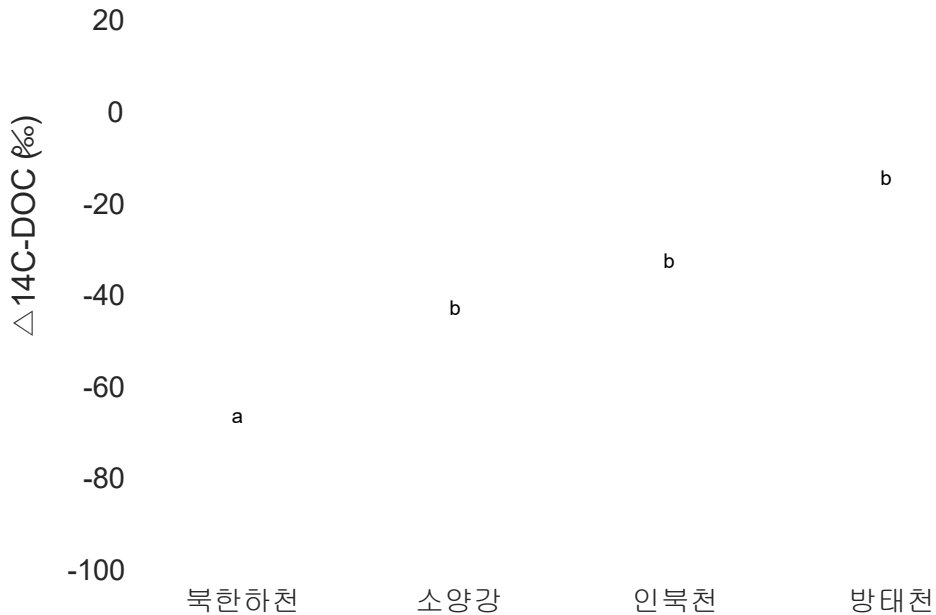


그림 19. 남북하천들의  $\Delta^{14}\text{C}$  분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함 (Tukey's HSD,  $P > 0.05$ ))

### 7.2. $\delta^{13}\text{C}$ -DOC

북한하천의 평균  $\delta^{13}\text{C}$ -DOC는 -19.25%으로, 소양강, 인북천, 방태천의  $\delta^{13}\text{C}$ -DOC(-25.15~-24.09%)보다 높았고, 특히 6월(-18.38%)과 9월(-15.31%)의  $\delta^{13}\text{C}$ -DOC가 높게 관찰되었다. 하지만 하천 간 평균  $\delta^{13}\text{C}$ -DOC의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(그림 20).



그림 20. 남북하천들의  $\delta^{13}\text{C}$  분포(상자의 위쪽은 75%, 아래쪽은 25% 구간을 나타내며 가운데 붉은선은 중앙값, 수염은 이상값이 아닌 점까지 최대 최소를 표시함. 이상값은 '+' 기호를 사용. 각 하천의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있지 않을 때 같은 알파벳으로 표시함 (Tukey' s HSD,  $P > 0.05$ )

### 7.3. 탄소동위원소비 비교

연구기간 내내 북한하천에서 다른 하천보다 낮은  $\Delta^{14}\text{C}$ 의 DOC가 유출되었는데(그림 21), 이는 북한하천 유역 내 농업 활동의 영향으로 추정된다. 산림에 비해 농지 면적의 비율이 늘어날수록 토양풍화가 가속되어 [DIC]가 높아질 수 있으므로(Raymond and Cole, 2003), 북한하천의 높은 전기전도도와 [DIC]는 북한하천 상류에 농경지가 존재할 가능성을 뒷받침한다. 북한하천 유역의 약 15%가 농지로 분류되었으며, 다른 세 하천의 농지 비율인 0-5.8%보다 최소 세배 가량 높았다(표 1). 북한하천의 높은  $\delta^{13}\text{C}$ -DOC도, 북한에서 재배 중인 옥수수과 같은 C4 식물에서 유래된 유기물질의 영향일 수 있다(그림 21).



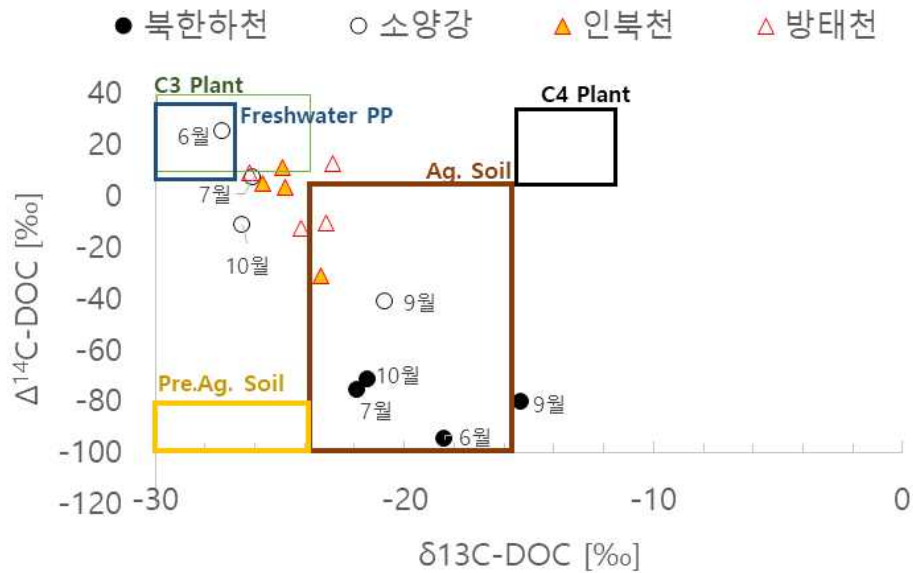


그림 21.  $\delta^{13}\text{C-DOC}$  vs  $\Delta^{14}\text{C-DOC}$  탄소동위원소비. 그림에 네모로 표시된 'C3 Plant'는 탄소 3개인 화합물을 거쳐 광합성된 유기물(예: 수목과 벼 등)의 탄소동위원소비 범위를, 'C4 Plant'는 탄소 4개인 화합물을 거쳐 광합성된 유기물(예: 옥수수 등)의 탄소동위원소비 범위를, 'Ag. Soil'은 C4 식물이 우점하고 있는 농경지 토양의 탄소동위원소비 추정 범위를, 'Pre.Ag. Soil'은 농지 이전의 C3 식물이 우점하였던 토양의 탄소동위원소비 추정 범위(Whiticar, 1996)를 나타냄.

방태천의  $\text{SUVA}_{254}$ 는 3.5 L/mg-m로 북한하천(2.3 L/mg-m)보다 유의미하게 높았는데( $p < 0.05$ ), 이는 산림비율의 차이 때문으로 보인다. 산림생태계에서 유출되는 식물유래 방향족 유기화합물은  $\text{SUVA}_{254}$ 와 양의 관계를 보이며(Weishaar et al., 2003), 따라서 산림지역에서 높은  $\text{SUVA}_{254}$ 가 나타날 수 있다. 상대적으로 높은 수치의  $\text{SUVA}_{254}$ 와 높은  $\Delta^{14}\text{C-DOC}$ 가 측정된 방태천 유역은 산림이 계획적으로 보호되고 있는 지역으로, 이에 비해 낮은  $\text{SUVA}_{254}$ 와  $\Delta^{14}\text{C-DOC}$ 가 측정된 북한하천에서 측정되었다.

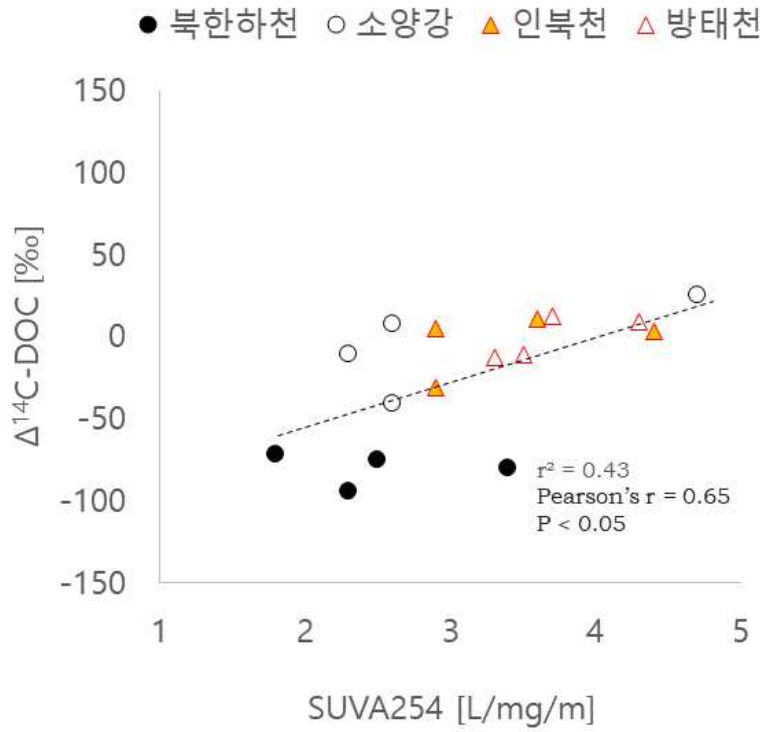


그림 22. 연구지점 총 4곳의 하천을 대상으로 측정된 SUVA<sub>254</sub>와  $\Delta^{14}\text{C-DOC}$ 의 관계

#### IV. 결론 및 제언

북한에 대한 연구는 주로 문헌연구나 보도자료를 분석한 것이었고, 국립산림과학원에서 위성자료를 활용하여 북한산림자원을 조사한 것은 1999년, 2008년, 2018년 이다(양아람 외, 2020). 접근성이 북한연구의 가장 커다란 제약 요소이므로 하천을 이용한 이번 연구는 직접 북한에 가지 않고도 북한의 산림생태계를 이해할 수 있다는 점에서 다른 연구에 비해 특별하다. 이 연구를 통해 북한하천이 비슷한 면적의 우리나라 유역 하천(소양강)에 비해 상대적으로 낮은  $\Delta^{14}\text{C-DOC}$ 를 유출하고 있음을 알아냈고, 하천수 성분 중 용존무기탄소 농도는 통계적으로 유의하게 높음을 확인하였다. 방태천은  $\text{SUVA}_{254}$ 와  $\Delta^{14}\text{C-DOC}$  평균이 4개 하천 가운데 제일 높아 가장 낮은  $\text{SUVA}_{254}$ 와  $\Delta^{14}\text{C-DOC}$ 를 유출한 북한하천과 대조를 이루었다.

북한하천의 높은 [DIC]와 낮은 [DOC]는 산지를 개간한 뒤 만들어진 농경지를 효율적으로 관리하지 못하는 북한의 현실(박경석 외, 2017, 오삼언 외, 2019)을 반영하는 것으로 추정된다. 그러나, 이 연구는 6월부터 12월까지의 월별로 채수된 하천수에 대한 측정 결과로, 특히, 폭우로 접근이 제한된 8월 북한하천 시료가 분석에 빠져있다. 추후 3월부터 5월까지의 봄철 갈수기 시료와 여름철 풍수기 시료 측정을 보완하면 온전히 4계절에 걸친 북한하천수 성분의 변화를 더 자세히 파악할 수 있다.

이 연구를 통해 북한하천수 성분을 실측하였고, 첨단 분석 방법인 탄소동위원소비 측정도 수행하였다. 산림생태계 교란 정도를 유추할 수 있는 북한하천수 성분에 대한 측정이 앞으로도 계속되어, 통일한반도 생태계 변화에 대응할 수 있는 기초자료가 구축될 수 있기를 기대한다.

## V. 참고문헌

- 감사원. 2013. 산림자원 조성 및 관리실태 감사결과보고서
- 김경민, 임중빈, 김은희, 양아람, 박진우, 박주원. 2020. 위성영상과 AI를 활용한 북한산림정보 구축 방법 개발. 국립산림과학원. 192pp.
- 박경석, 북한의 산림현황 및 산림정책. 2013. 북한과학기술네트워크.
- 배재수, 이기봉, 오기노 지히로. 2007. 1970년대 산림녹화정책 : 1차 치산녹화 10년계획 수립 및 화전정리사업. 국립산림과학원.
- 산림청. 2020 임업통계연보.
- 양아람, 김경민, 임중빈, 김은희. 2020. 위성영상을 이용한 북한의 산림 변화 해석. 통계청 북한통계포털([kosis.kr/bukhan/nkAnals](https://kosis.kr/bukhan/nkAnals))
- 오삼언, 김은희, 김경민, 박소영. 2019. 남북 산림법 및 정책에 관한 비교 연구. 통일정책연구. 28(1): 159-181.
- 유병일, 김철상, 전준헌, 이호상, 정세경, 윤보은. 2014. 2013 경제발전경험모듈화사업: 임산자원개발. 기획재정부.
- 윤성탁, 김종환, 문현귀. 2007. 북한의 옥수수 생산현황 및 증수방안. 한국국제 농업개발학회지. 19(1): 1.
- 최현아, 배상원, 이슬기, 젤리거 베른하르트, 이우균. 2017. 북한 산림복구 지원을 위한 용도별 조림수종 선정. 통일문제연구 67: 37-56.
- 하천수의 수질현황-한강권역 (<https://kosis.kr/statisticsList>)
- Asakawa, D., Mochizuki, H., Yanagi, Y., & Fujitake, N. (2007). Characterization of hydrophobic acid fractions in water-soluble organic matter in Dystric Cambisol and in a stream in a small forested watershed: Seasonal and vertical variations in chemical properties. *Soil science and plant nutrition*, 53(5), 551-561.
- Chen M, Kim S, Park J-E (2016) Effects of dissolved organic matter (DOM) sources and nature of solid extraction sorbent on recoverable DOM composition: Implication into potential lability of different compound groups. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 408:4809-4819.
- Dalmagro, H., Lathuillière, M., Sallo, F., Guerreiro, M., Pinto, O., De Arruda, P., Couto, E., & Johnson, M. (2019). Streams with Riparian Forest Buffers versus Impoundments Differ in Discharge and DOM Characteristics for Pasture Catchments in Southern Amazonia. *Water*, 11(2), 390.
- Derrien, M., Kim, M. S., Ock, G., Hong, S., Cho, J., Shin, K. H., & Hur, J. (2018). Estimation of different source contributions to sediment organic matter in an agricultural-forested watershed using end member mixing

- analyses based on stable isotope ratios and fluorescence spectroscopy. *Science of The Total Environment*, 618, 569–578.
- Derrien M, Shin KH, Hur J. (2019). Assessment on applicability of common source tracking tools for particulate organic matter in controlled end member mixing experiments. *Sci Total Environ.* May 20;666:187–196.
- Dittmar T, Koch B, Hertkorn N, Kattner G (2008) A simple and efficient method for the solid-phase extraction of dissolved organic matter (SPE-DOM) from seawater. *Limnology and Oceanography: Methods* 6:230–235.
- Lee, S. C., Shin, Y., Jeon, Y. J., Lee, E. J., Eom, J. S., Kim, B., & Oh, N. H. (2020). Optical properties and <sup>14</sup>C ages of stream DOM from agricultural and forest watersheds during storms. *Environmental Pollution*, 116412.
- Li, Y., Harir, M., Uhl, J., Kanawati, B., Lucio, M., Smirnov, K. S., ... & Hertkorn, N. (2017). How representative are dissolved organic matter (DOM) extracts? A comprehensive study of sorbent selectivity for DOM isolation. *Water research*, 116, 316–323.
- Lu, Y. H., Bauer, J. E., Canuel, E. A., Chambers, R. M., Yamashita, Y., Jaffé, R., & Barrett, A. (2014). Effects of land use on sources and ages of inorganic and organic carbon in temperate headwater streams. *Biogeochemistry*, 119(1), 275–292.
- Raymond, P. A., & Cole, J. J. (2003). Increase in the export of alkalinity from North America's largest river. *Science*, 301(5629), 88–91.
- Stedmon, C. A., Markager, S., Tranvik, L., Kronberg, L., Slätis, T., & Martinsen, W. (2007). Photochemical production of ammonium and transformation of dissolved organic matter in the Baltic Sea. *Marine Chemistry*, 104(3–4), 227–240.
- Weishaar, J. L., Aiken, G. R., Bergamaschi, B. A., Fram, M. S., Fujii, R., & Mopper, K.. (2003). Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon. *Environmental Science & Technology*, 37(20), 4702–4708.
- Whiticar, M.J., 1996. Stable isotope geochemistry of coals, humic kerogens and related natural gases. *International Journal of Coal Geology* 32, 191–215.
- U. S. Geology Survey TWRI Book 9. Alkalinity and Acid Neutralizing Capacity (second edition)

[https://pubs.usgs.gov/twri/twri9a6/twri9a66/twri9a\\_chapter6.6\\_9-2001.pdf](https://pubs.usgs.gov/twri/twri9a6/twri9a66/twri9a_chapter6.6_9-2001.pdf)