

산림 유역에서 호우 발생시 용존유기탄소의 농도 변화

김수진¹, 최인혁², 유재윤³, 김경하³, 우남철², 김준¹

¹연세대학교 지구환경연구소/대기과학과, ²연세대학교 지구시스템과학과,
³국립산림과학원 임지보전과

Concentration changes in dissolved organic carbon in forest catchment during storm events

S. J. Kim¹, I. H. Choi², J. Y. Yoo³, K. H. Kim³, N. C. Woo², and J. Kim¹

¹Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University,

²Department of Earth System Sciences, Yonsei University,

³Forest Water Resources Laboratory, Korea Forest Research Institute

(Correspondence: sujin@atmos.yonsei.ac.kr)

1. 서 언

1980년대 이후 화석연료 사용, 토지이용의 변화 등과 같은 인위적 활동의 증가로 인해 대기 중 이산화탄소 농도는 급격하게 증가하였고, 이에 대해 많은 관심이 집중되었다. 따라서 산림생태계의 탄소 저장능 증감에 대한 이해는 중요한 과제로 다루어지고 있으며, 전지구 탄소 순환에 중요한 요소로 인식되고 있다. 대기 중 이산화탄소는 육상생태계에 분포하는 지표 식생뿐만 아니라 뿌리와 토양의 지하부에도 저장된다. 습윤지역의 경우 낙엽과 분해 산물 등(POC; Particulate Organic Carbon)은 지표유출을 통해 물과 함께 수생생태계로 이동한다. 또한 이 과정에서 물은 토양 중 뿌리대에서 용존유기탄소(DOC; Dissolved Organic Carbon)와 용존무기탄소(DIC; Dissolved Inorganic Carbon)를 운반하게 되는데, DIC는 뿌리대 아래의 무기토양층과 암반층에서 방출되기도 한다. 육상에서 해양으로 운송되는 탄소는 1980년대 이후 관측이 실시되었으며, 육상생태계의 1차생산량(61.3 Gt-C yr⁻¹; IPCC 1995)과 비교할 경우 약 0.4 Gt-C yr⁻¹로 작은 양을 나타내고 있다. 그러나 육상생태계로부터 운송되는 용존탄소는 육상생태계 탄소 저장량(1.8 Gt-C yr⁻¹; IPCC 1995)과 비교할 경우 무시할 수 없는 양이며, 생태계 탄소 균형의 중요한 인자임을 시사하고 있다. 이 때문에 탄소 저장소로서의 육상 생태계의 역할은 물과 함께 유출되는 탄소의 평가에 따라서 과대/과소 평가될 수 있다. 또한 유역규모에서 탄소순환을 논할 때에는 용존 탄소가 물의 이동에 의해 운반되므로 반드시 수문 변수들을 포함한다. 따라서 본 연구에서는 천연활엽수림을 대상으로 호우 발생시 DOC 농도 변화를 집중 관측하였으며, 강우유출과정이 용존 탄소의 운송에 미치는 영향에 대해 논하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지 및 분석항목

본 연구의 조사 대상지는 경기도 포천시 소흘면 직동리에 위치한 국립수목원 활엽수 천연림(200ha)의 원두부 소유역에서 실시하였다. 조사대상 원두부 소유역의 총면적은 22ha로 임상은 활엽수 천연림, 표고는 280~470m이다. 조사대상 유역의 모양은 편마암이며, 토성은 사질양토다. 원두부 소유역에 V노치를 설치하고 자기수위계를 유출수량관측시설 내 기기실에 설치하여 10분 간격으로 측정하였으며, 강우시의 계류수 시료는 자동채수기(ISCO, 6712FR)를 이용하여 2시간 간격으로 48

시간 채취하였다. 평수시 지하수가 존재하는 지역에 0.5~1m 깊이의 간이관정을 매설하였으며, 압력식 수위계를 이용하여 지하수위 변화를 측정하였다. 또한 평수시 계류수, 강수, 임내우, 토양수, 지하수를 채취하였다. 채취된 시료로부터 현장 pH와 EC를 측정하였으며, DOC는 TOC 분석기 (Analytik Jena, multi N/C 3000 analyzer), 용존이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+)은 이온 크로마토그래피(음이온, Sykam, DE/S-135; 양이온, Dionex, DX-320 IC System)로 측정하였다.

2.2 EMMA를 이용한 유출분리

본 연구에서는 유출분리를 위해 End Member Mixing Analysis(EMMA) 모형을 이용하였으며, 각 요소는 다음과 같은 질량수지(mass balance) 식에 의해 계산하였다.

$$\begin{aligned} f_a + f_b + f_c &= 1 \\ C1_a f_a + C1_b f_b + C1_c f_c &= C1_{st} \\ C2_a f_a + C2_b f_b + C2_c f_c &= C2_{st} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 f 는 각 구성요소가 계류수에 기여하는 비율, a, b, c 는 end member의 각 구성요소, $C1$ 과 $C2$ 는 추적자의 농도를 나타내며, st 는 계류수를 각각 의미한다. 본 연구에서는 end member의 구성요소로 토양수, 천부지하수, 계류수를 사용하였으며, 식(1)은 계류수의 수질 자료를 이용하여 계산이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우 사례별 유출특성

Table 1은 각 강우사례의 48시간 수문조건을 나타내고 있다. 2회의 강우사례 관측 중 10분간 최대강우량은 7월 1일에 관측된 17.7mm/10min. 이었다. E1과 E2의 10일간 선행강우량은 각각 1.3과 161.9mm로 큰 차이를 나타내고 있으며, 총강우량은 E1이 E2보다 56.5mm 많았다.

Table 1. Characteristic of precipitation and stream discharge in two storm events.

	E1	E2
Sampling date	June. 26~29, 2005	July 1~3, 2005
Precipitation in event (mm)	160.5	104.0
Antecedent precipitation within 10 days (mm)	1.3	161.9
Max. precipitation intensity (mm/10min.)	11.1	17.7
Max. stream discharge (mm/10min.)	0.3	1.0

3.2 수문곡선, DOC 및 추적자 농도 변화

Fig. 1은 관측된 두 강우사례의 수문곡선, DOC 및 추적자의 농도변화 및 지하수위 변동을 나타내고 있다. 기저유출시 계류수의 DOC 농도는 1 mg/L 이하였으나, 호우 발생과 동반해 유출수량이 증가함에 따라 6 mg/L 까지 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 2는 두 강우사상의

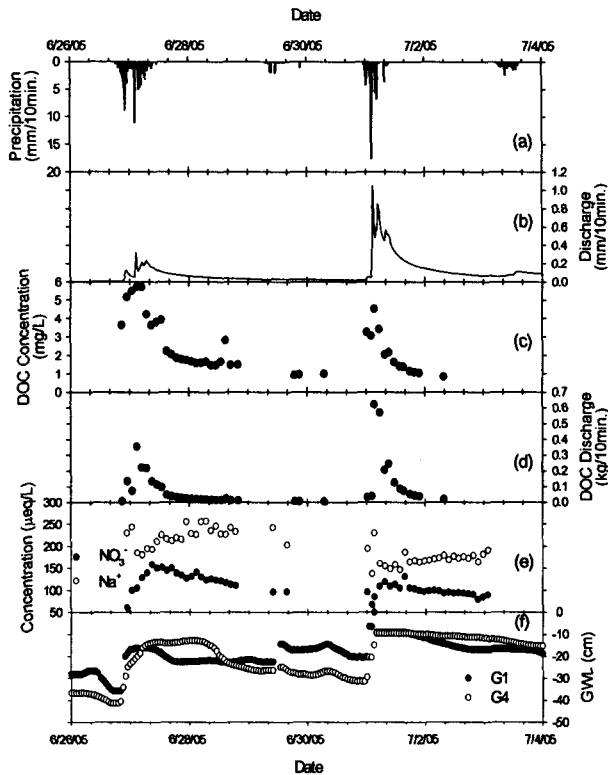


Fig. 1. Change of (a) precipitation, (b) stream discharge, (c) DOC concentration, (d) DOC discharge, (e) NO_3^- and Na^+ concentration, and (f) groundwater level.

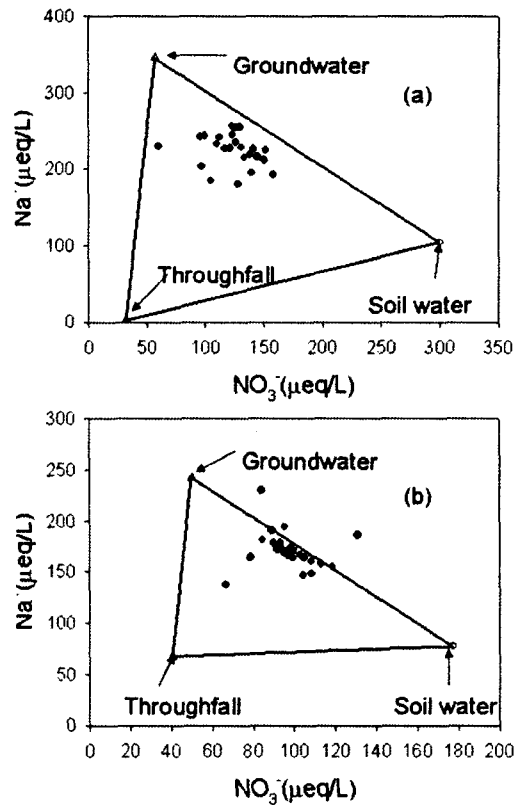


Fig. 2. Three-component mixing diagram. (a) 26~28 June, 2005 (b) 1~3 July, 2005.

EMMA에 이용된 임내우, 토양수, 지하수 3요소 혼합도를 나타내고 있다. 본 연구에서 EMMA를 위해 추적자로 사용한 NO_3^- 와 Na^+ 의 계류수 중 농도 변화는 서로 반대의 경향을 나타내고 있다 (Fig. 2), E2에서 혼합도의 한계를 초과하는 일부 값을 제외하고 모든 관측치는 EMMA를 위한 기본조건을 만족하였다. 한편 지하수위는 강우사상 발생에 따라 급격히 상승하는 경향을 나타내었다 (Fig. 2). 호우발생 이전의 토양수 DOC 농도는 20~80 mg/L로 높은 농도를 나타내었다(Fig. 3). 천부지하수의 경우 심도가 깊어질수록 DOC 농도가 감소하는 경향을 보였으며(Fig. 3), 이는 토양층을 통과하는 동안 흡착과 분해과정을 통해 DOC 농도가 감소한 결과라 추측된다. 한편, 기저유출시 계류수의 DOC 농도는 1 mg/L 이하였으나, 호우 발생과 동반해 유출량이 증가함에 따라 6 mg/L 까지 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 용출수의 DOC 농도는 기저유출시와 비교할 때 약 10배 정도 증가하는 경향을 나타내었다.

3.3 유출분리 및 수문과정이 DOC 유출에 미치는 영향

각 추적자의 기여도를 질량수지 식에 의해 계산한 후 유출분리를 실시한 결과는 Fig. 4와 같다. 본 연구의 대상유역에서 호우 발생시 주된 유출 경로는 토양층과 지하수대로 나타났다. 특히 E2의 경우 E1보다 포화지표류 기원이 낮은 경향을 나타내었는데, 이는 선행강우에 의해 포화되었던 토양으로부터 계류로 유출되는 물의 비율이 증가하였기 때문이라고 생각된다. 한편 계류수 중의 DOC 농도는 E1이 E2보다 높은 경향을 나타내었는데, 이는 강우강도 및 선행강우의 차이에 의한 것이라 판단된다. 즉 E1의 경우 고농도의 DOC가 분포하는 토양표층의 유출기여도가 상대적으로 높아 계류수 중의 DOC 농도가 E2보다 높은 값을 나타내고 있으며, E2는 선행강우에 의해 많은 양의 DOC가 유출되어 농도가

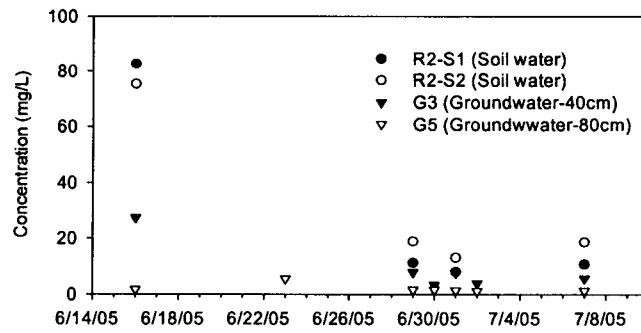


Fig. 3. Change of DOC concentration in soil water and groundwater.

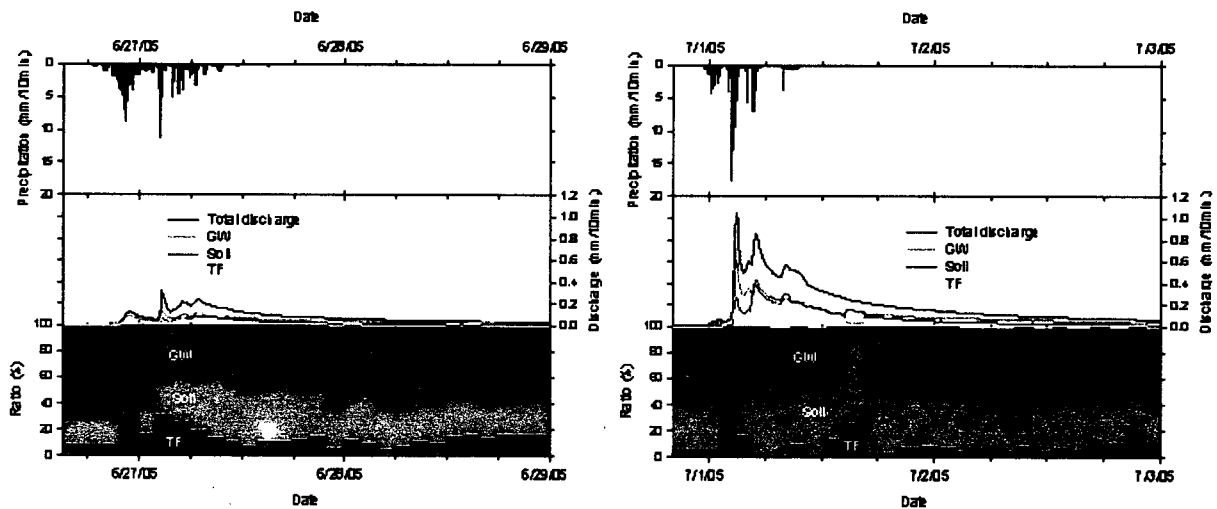


Fig. 4. Hydrograph separation.

저하되었다고 판단된다. 이러한 경향은 유출분리에 사용한 추적자에서도 같은 경향을 나타내었다.

이상의 결과는 여름철 호우 발생이 산림 유역으로부터 방출되는 탄소량에 큰 영향을 미치고 있다는 점을 시사하며, 보다 정밀한 탄소 수지 계산을 위해서 토양층의 물수지 계산을 통해 용존 상태로 이동/집적되는 탄소의 정밀한 정량화가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호: 1-8-2)과 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-Technopia 21 Project)의 지원으로 수행되었다.

인용문헌

IPCC. 1996: *Climate change 1995: the science of climate change*. J. T. Houghton, L. B. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.