

남한강 수변역식생의 토양탄소축적량과 토양호흡 특성

정지선 · 이준석 · 이재호¹ · 심교문² · 이재석*

건국대학교 생명과학과, ¹국립생태원 생태평가부, ²국립농업과학원 기후변화생태과

Characteristics of Accumulated Soil Carbon and Soil Respiration on Vegetation in Namhangang Basin

Jisun Jung, Joonseok Yi, Jaeho Lee¹, Kyomoon Shim² and Jaeseok Lee*

Department of Biological Sciences, Konkuk University, Korea

¹Ecosystem Assessment Division, National Institute of Ecology

²Division of Agro-Climatic Change & Ecology, National Academy of Agricultural Science, Korea

Abstract - Various ecosystem carry out fundamental function of material circulation and energy flow through interrelationship with many environmental factors. Therefore, it is crucial to scientifically understand the value of nature to deduce correlation between environmental factor and change of ecosystem function. In this study, we determined the accumulated ecosystem carbon and characteristics of soil respiration on grassland vegetation in Namhangang basin in Namhangang Basin. It was found that the rate of soil respiration was highly correlated with the soil temperature in all communities. The measured soil respiration rates were 1,539 mgCO₂ m⁻² h⁻¹, 1,200 mgCO₂ m⁻² h⁻¹, 1,215 mgCO₂ m⁻² h⁻¹ in *Miscanthus sacchariflorus*, *Phragmites japonica*, *Salix koreensis* communities, respectively. Also, carbon quantities accumulated in litter and soil layers were 40.6 tCha⁻¹ (1.9+38.7), 46.9 tCha⁻¹ (43.0+3.9), 31.2 tCha⁻¹ (28.9+2.3) in *M. sacchariflorus*, *P. japonica*, *S. koreensis* communities, respectively.

Key words : Korea, forest, carbon cycle, production, riparian habitat

서 론

생태계의 탄소순환은 생산자인 식물이 광합성을 통해 대기의 탄소를 식생에 고정하는 것으로부터 시작되며, 고정된 탄소의 일부분은 고사목, 낙엽, 낙지 등을 통해 토양으로 공급되어 일부는 분해를 거쳐 대기로 환원되고, 일부가 토양에 축적되는 흐름을 가진다 (Lee 2004; Lee *et al.* 2010). 대기로부터의 탄소흡수량과 토양으로부

터의 방출량은 어떠한 생태계가 가지는 순수한 탄소흡수량 (NEP; net ecosystem production)을 계산하는데 필수적인 요소이며, 두 가지 요인의 상호조합에 의해 발생되는 결과 값은 생태계에 따라 매우 다양하다.

현재 육상의 다양한 생태계 중 산림생태계는 가장 큰 탄소의 저장 장소로 인식되고 있으며 (Lee *et al.* 2010), 더불어 IPCC의 탄소흡수원으로 인정되는 생태계이기도 하다 (Lee 2003). 산림생태계는 매년 광합성 과정으로 흡수된 탄소의 일부는 호흡으로 대기에 재 환원되고 나머지는 식물체를 구성한다. 식물체가 저장한 일정량은 리터형태로 토양표면에 공급되어 분해과정을 거쳐 분해력 차이에 따라 양분해성은 빠른 시간 내 분해되어 대기로

* Corresponding author: Jaeseok Lee, Tel. 02-450-3411, Fax. 02-3436-5432, E-mail. jaeseok@konkuk.ac.kr

환원되면 일부 난분해성은 오래 동안 토양에 축적되어 토양탄소저장의 중요한 원천이 된다(Suh *et al.* 2005; Lee *et al.* 2013). 이러한 산림은 미성숙 시기에는 광합성 기관이 비광합성기관보다 상대적으로 많지만 수목이 성장하면서 비광합성기관의 비율이 높아져 유지호흡이 증가하고 결국에는 광합성량과 호흡량이 비슷한 수준에 육박하는 단계에 이르게 된다. 따라서 일정 기간이 경과하여 도달하는 극상상태(climax stage)에 이르게 되면 순생태계생산량이 매우 낮아지는 것으로 인식되고 있다.

한편 산림생태계와는 달리 초원생태계는 매년 지상부가 고사하고 새롭게 형성되기 때문에 광합성기관에 대한 비광합성기관의 비율이 산림보다 현저히 낮아 유지호흡으로 방출되는 탄소 소실량이 순 탄소고정능력이 산림보다 큰 것으로 취급되고 있다(Lee 2003; Lee 2004). 또한 전년도에 축적한 지상부는 동계의 저온기에 접어들며 대부분 고사하여 토양으로 공급되기 때문에 천이 단계의 초본 식생기에 토양탄소축적량은 급격히 높아지는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 매년 갱신되는 초원식생의 지상부를 바이오에너지의 원료로 사용하는 등의 이용을 통해 초원식생의 높은 탄소고정능력을 대기의 탄소흡수원으로 이용하려는 시도가 이루어지고 있다(Saigusa and Oikawa 1994; Saigusa *et al.* 1998; Toda *et al.* 2000).

한반도는 몬순아시아의 기후 하에 위치하고 있어 자연적으로 형성되어 유지되는 초원식생은 거의 없지만, 주기적인 범람으로 인해 환경 교란이 발생하고 그로인해 초원식생이 형성되는 수변지역이 넓게 분포한다. 이러한 수변의 초원식생은 고정된 유기탄소가 그 식생에 그대로 축적되기는 어려운 특이한 환경이지만 탄소의 고정형태는 초원과 유사하게 유지된다.

본 연구에서는 국내 다양한 생태계 중 높은 생산성을 가지는 탄소순환의 요소로서 그리고 그동안 생태적 이용에 대해 관심권 밖에 있던 하천변 유역활용에 대한 여러 가지 방안이 제시되고 있는 상황에서 탄소순환에 관한 연구가 거의 전무한 수변식생에 대한 탄소축적량 및 토양호흡 자료의 정량을 통해 수변식생이 가지는 본래의 탄소순환 특성을 이해하고, 그를 통해 교란 후 변화되는 수변식생의 탄소순환 특성 변화의 이해를 증진시키며, 나아가서 국내 생태계의 탄소순환 특성 이해와 변화의 예측에 기여한다. 이를 위해 400 km 이상에 길이를 가지고 있는 우리나라의 하천 중, 중부지역에 위치하고 있는 한강(남한강) 유역에 생육하고 있는 주요 수변식생군락의 탄소축적량과 순생태계생산량을 정량하였다. 이를 위해 토양방출 이산화탄소량, 군락별 순일차생산량(NPP; net primary production)을 정량하여 주요 하천의 수변식생에서 흡수할 수 있는 순수한 탄소량흡수의 잠재능력을 평가하였으며, 또한 수변식생이 가지는 탄소순환 형태와 순생태계 탄소흡수량과 관련된 기온, 지온, 토양습도 등의 환경적 요인을 측정하여 토양호흡과의 상호 관계성을 파악하였다.

조사 방법

1. 조사지 개황

조사지는 2008년 하반기부터 추진된 4대강 정비 사업에 속한 경기도 여주군 강천면에 위치한 남한강 유역으로, 본 조사가 진행된 후 현재에는 정비 사업으로 인해 식생이 모두 파괴된 지역에 위치한다(Fig. 1).

이러한 남한강은 강원도 오대산에서 발원하여 충청북



Fig. 1. Study site in Namhangang basin.

도 동북부와 경기도 남부를 흘러 경기도 양평군 양수리에서 북한강과 합류하여 한강으로 흘러드는 강으로 본류의 길이는 375 km이며, 유역 면적은 12,577 km²에 이른다. 하천은 심하게 굴곡된 곡류천을 이루며, 상류는 비교적 높은 산악지대를 흐르는 급류천을 형성한다. 조사지역이 속해있는 경기도 여주의 연평균기온은 11~13°C로 남한강유역의 최한월인 1월의 평균기온은 -4~-6°C 정도를 보인다. 연평균 강수량은 1,100 mm 내외로 다우 지역에 속한다 (Korean Meteorological Administration 2011).

남한강 유역의 주요 식물상을 보면 중류·상류 유역은 남부 난온대낙엽·활엽수림대가 발달되어 있으며 수변지역에는 물억새 (*Miscanthus sacchariflorus*) 군락, 달뿌리풀 (*Phragmites japonica*) 군락, 버드나무 (*Salix koreensis*) 군락이 우세하게 형성되어 있다 (Lee 2013).

2. 토양 탄소축적량

조사지의 각 군락에 축적된 탄소량을 산정하기 위하여, 각 군락에서 리터와 토양을 채취하여 토양밀도, 유기물함량, 토양탄소축적량을 조사하였다.

각 군락에 50 cm × 50 cm 방형구를 설치하여 토양표면의 리터를 수거한 뒤, 0 cm에서 20 cm 깊이까지 직경 5 cm, 높이 5.1 cm인 토양 샘플관(100 mL)을 이용하여 5 cm 깊이 단위로 토양을 채취하였다. 채취한 토양은 실험실로 운반하여 곧 바로 토양밀도 및 유기물함량을 분석하였다.

토양밀도(soil density)는 채취한 토양을 105°C 건조기에서 48 hr 이상 건조시킨 무게를 측정하여 건조토양의 중량을 토양 채취에 사용된 샘플관의 체적으로 산정하여 구하였다(식 1).

$$\text{토양 밀도 (kg cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{건조토양 (kg)}}{\text{샘플관체적 (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

토양 유기물함량(organic matter contents)은 작열감량법(loss on ignition method, Oliver *et al.* 2001; Santisteban *et al.* 2004)으로 측정하였으며, 이를 위해 채취한 토양을 건조시킨 후 작열용 도가니에 2 mm체로 친 토양을 약 15 g씩 넣고 무게를 측정한 후, 800°C 전기로에서 4 hr 동안 작열시켜, 상온에서 약 24 hr 동안 식힌 후 무게를 측정하였다. 유기물함량의 계산은 작열 전 토양의 무게에서 작열 후 토양의 무게를 뺀 값을 작열 전 토양 무게로 나누어서 백분율을 구하였다. 유기물함량은 다음의 식 2에 의해 계산하였다.

유기물함량(%)

$$= \frac{\text{작열전토양 (g)} - \text{작열후토양 (g)}}{\text{작열후토양 (g)}} \times 100 \quad (2)$$

토양탄소축적량은 Wang *et al.* (2002)의 방법을 기준으로 하였으며, 단위 토양 깊이별 유기물량(식 3)을 구하고, 여기에 탄소계수를 곱하여 토양 내의 축적된 탄소량(식 4)을 계산하였다.

$$\text{토양층유기물량} = rHbka \quad (3)$$

(r: 토양밀도, H: 토양두께, b: 유기물비, a: 토양비)

$$\text{토양탄소축적량} = \text{층유기물함량} \times k \quad (4)$$

(k: 탄소계수, 0.458)

3. 토양호흡 측정

토양호흡은 밀폐법(closed chamber method; Lee *et al.* 2010)을 기초로 하여 측정하였다. 토양호흡량 측정을 위해, 2009년 8월, 남한강 유역(물억새군락, 달뿌리풀군락, 버드나무군락)에 직경 21 cm, 깊이 12 cm의 원통형 collar(칼라)를 각각의 군락에 6개씩 설치하였다.

Collar는 아크릴 재질로 상부의 양측에 약 4 mm 두께의 볼트 2개를 박아 토양에 칼라를 설치한 후 칼라가 쉽게 설치 장소로부터 이탈되지 않도록 길이 약 15 cm 핀으로 고정하는 걸림쇠가 부착되어 있다. 또한 칼라를 토양에 설치 할 때에는 리터를 전정기위로 절단하여 칼라의 하면이 토양 속에 들어 갈 수 있도록 하는 방법으로 설치하였다. 또한 칼라가 토양에 매설되는 깊이는 토양 표면에 축적된 리터의 양에 따라 다르나, 리터를 제거한 높이를 기준일 경우, 약 5 cm 깊이에 해당한다.

토양호흡의 측정은 상단부는 막혀 있으나, 하단부는 칼라와 결합 시 칼라, 지면과 함께 밀폐공간이 만들어지는 구조를 가진 상단 캡에 내부 공기의 CO₂ 농도의 측정이 가능한 센서(GMT-222, Vaisala)를 부착시켜 제작하였다.

토양호흡량 산정을 위해 CO₂ 농도 측정 센서가 부착된 상단캡을 칼라에 장착한 상태에서 밀폐된 칼라와 상단캡의 공간 내 공기의 CO₂ 농도 변화를 20분 동안 5분 간격(0, 5, 10, 15, 20 min)으로 측정하여 시간에 따른 CO₂의 농도의 증가속도를 계산하였으며, 동시에 기온과 대기압을 측정하여 CO₂ 밀도를 계산하여 최종적으로 단위시간당 단위면적에서의 CO₂ 방출량, 즉, 토양호흡량으로 산정하였다. 밀폐법(closed chamber method)으로 토양 표면에서 방출되는 CO₂의 증가속도로 토양호흡을 계산

하는 식 5와 같다.

$$\text{토양호흡}(\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = \rho \text{pH} \quad (5)$$

a: CO₂ 농도 변화, ρ: CO₂ 밀도 (mg m⁻³), H: chamber 높이 (m)

토양호흡의 측정은 매월 중순을 기점으로 1회 씩 측정하여 해당 월의 대푯값으로 사용하였다. 생태계순생산량을 구하기 위해 필요한 토양의 미생물호흡량 (HR; heterotrophic respiration)은 산림토양에서 인용되고 있는 토양호흡량에 미생물호흡 계수 0.45로 뿌리호흡량 (RR; root respiration)을 계산하였다. 또한 누락된 월의 값을 산정하기 위해 측정지점과 가까운 이천지역 기상값을 기초로 토양호흡과 지온 및 토양습도와와의 상관관계를 파악하여 사용하였으며, 이를 위한 자료는 토양호흡 측정 시 칼라의 측면 부근에서 지온을 측정하였다. 또한 토양습도와 토양호흡과의 상관성을 파악하기 위해 토양습도는 휴대형 토양수분센서 (HydroSense, Campbell Co.)를 토양호흡 측정 시 측정하였다.

조사지역의 순생태계생산량은 측정지역이 육상의 산림이나 초지군락과는 다른 수변지역에 위치하기 때문에 수류에 의한 토양의 이출입이 나타나는 특징이 있다. 이러한 특징은 지상부 리터에 의한 토양탄소축적 기여가 매우 어려운 상황을 조성하는 반면에 토사에 의한 탄소의 유이요소가 되므로 본 조사지역의 순생태계생산량 산정에 있어서 축적된 리터는 수류에 의해 소실되는 양으로, 반면에 5 cm 깊이까지 축적된 표면 토양탄소는 이입량으로 처리하여 산정하였다. 결국, 수변지역 생태계의 탄소 이입은 식물에 의한 순일차생산량과 수류에 의해 운반 퇴적되는 토사유기물의 유입양이 되며 반대로 탄소의 이출은 토양호흡 중의 미생물호흡량과 리터의 소실량으로 처리하였다.

결과 및 고찰

1. 수변식생 군락의 토양호흡 특성

8월부터 측정이 개시된 토양호흡은 측정개시 시 가장 높은 값을 보였으나, 이후 급격히 감소하는 일반적인 변화 경향을 보였다 (Fig. 2). 본 연구지에서도 지온변화와 매우 높은 상관성을 보였으며, 이러한 지온 변화가 토양호흡의 계절적인 변화에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 작용한다고 하는 사실은 이미 다른 많은 연구에서 제시되고 있다 (Suh *et al.* 2005; Wang *et al.* 2013). 이러한 경

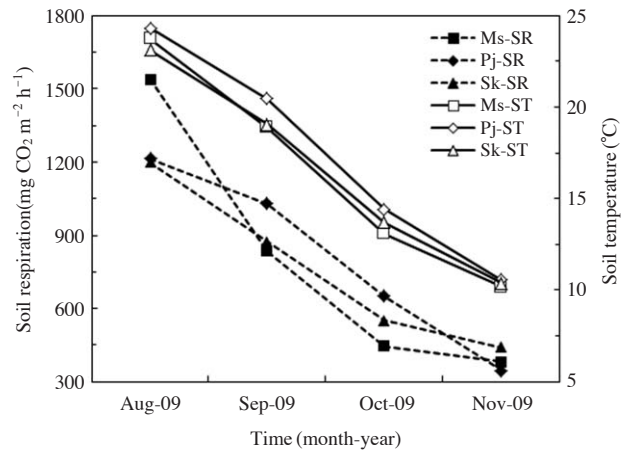


Fig. 2. Seasonal variation of soil respiration (SR) and soil temperature (ST) in three communities in Namhangang basin. Ms; *Miscanthus sacchariflorus*, Pj; *Phragmites japonica*, Sk; *Salix koreensis*.

향을 반영하여 측정 개시 이후 계절에 따른 지온의 감소와 함께 토양호흡도 확연히 감소하는 경향을 보였다. 토양호흡 변화의 지온 의존성은 이미 다양한 생태계에 대한 장단기적 토양호흡 측정 결과에서 일반적으로 보고되었으며, 본 연구결과 또한 그러한 경향과 큰 차이가 없다. 본 측정지 또한 충분한 조사 자료가 확보되지 않았으나, 측정된 토양호흡의 지온의존성을 볼 때 일반적인 토양호흡의 계절변화 경향과 크게 다르지 않는 일반적인 식생의 토양호흡 특성을 가진 것으로 보인다. 측정된 자료를 바탕으로 추정하여 산정한 Fig. 3에서 1, 2월의 저온기에는 토양호흡이 낮고 3월 이후 지온의 상승과 함께 급격히 증가하여 7, 8월에 최고값을 보이며, 이후 점진적으로 감소하여 1월경에 이르면 연중 최저치를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 측정치와 추정치로부터 연간 생태계탄소유입과 유출량의 개략적인 추정이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 토양호흡과 지온의 측정 결과로부터 관측되지 않은 기간의 토양호흡을 추정 계산하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 실선은 8월부터 11월까지 실제로 측정된 지온과 토양호흡량이며 점선은 토양호흡량과 지온과의 상관관계를 이용하여 계산한 추정값을 나타낸다. 계산 추정값은 8월~11월에 측정된 지온과 지온의 관계식을 구하여, 1월~7월, 12월의 월평균 지온으로 지온을 구한 후, 토양호흡량과 지온과의 회귀식을 통해 토양호흡량을 구하였다. 그림에서와 같이 지온의 계절적인 변화에 따라 토양호흡이 같은 경향으로 변화하는 것을 알 수 있다. 지온이 가장 높게 나타나는 8월에 토양호흡 또한 가장 높은 값을 보이고 있으며, 12

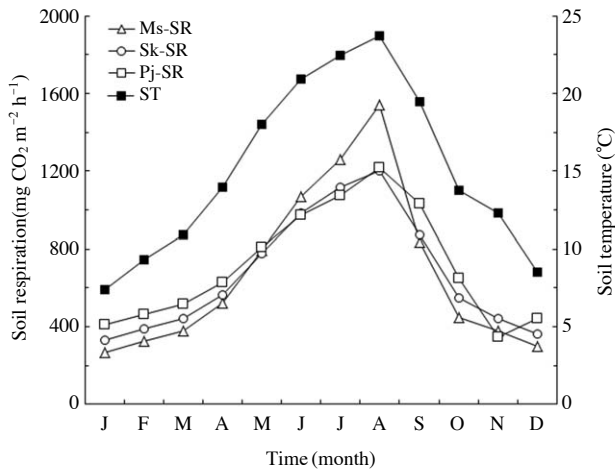


Fig. 3. Estimated soil respiration from relationship between soil temperature (ST) and soil respiration (SR) based on field data. Ms; *Miscanthus sacchariflorus*, Sk; *Salix koreensis*, Pj; *Phragmites japonica*.

월 및 1월은 저온기에는 가장 낮은 값을 보이는 전형적인 계절변화 양상을 보여주고 있다.

한편, 토양호흡의 지온 의존성 패턴은 온도대에 따라 토양 수분과 같은 토양환경에 매우 크게 영향을 받는 시기가 나타난다. 이는 저온기의 경우, 지온의 영향 정도가 큰 반면 수분 영향은 적고, 반면 고온기에는 이미 저온에 의한 토양미생물 활성 저하가 해소된 만큼 온도보다는 수분의 많고 적음이 미생물과 식물 근계의 활성에 영향을 미치는 것으로 판단된다 (Davidson *et al.* 2000; Liang *et al.* 2004; Guntiñas *et al.* 2013).

본 조사에서 하계의 고온기가 지남에 따라 일정 비율로 감소하는 일반적인 경향을 보였으나, 토양호흡의 경우, 9월부터 11월까지의 감소 속도보다는 8월에서 9월까지의 감소가 속도가 월등히 높은 현상을 보였다 (Fig. 4). 고온기의 이러한 큰 토양호흡의 감소는 건조가 그 원인으로 보이며, 고온기의 경우, 저온기 보다 토양수분 함량 변화에 보다 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 하지만 전국적으로 강우량이 매우 적어 토양이 건조해 지는 시기였으나, 측정지의 식생이 비교적 수변 가까이 위치하고 있어 전체적으로 토양의 수분환경이 비교적 양호한 상태로 유지된 것으로 보이고 이러한 양호한 토양수분 상태는 높은 토양호흡이 높은 상태를 유지하도록 하는데 영향을 준 것으로 보인다 (Guntiñas *et al.* 2013).

토양 수분함량이 높은 상태로 유지되었던 8월과 9월의 평균 토양호흡량을 보면, 달뿌리풀군락에서 8월에 1,539 mg CO₂ m⁻², 9월에 835 mg CO₂ m⁻², 물억새군락이 8월에 1,200 mg CO₂ m⁻²에서 9월에 873 mg CO₂ m⁻², 버

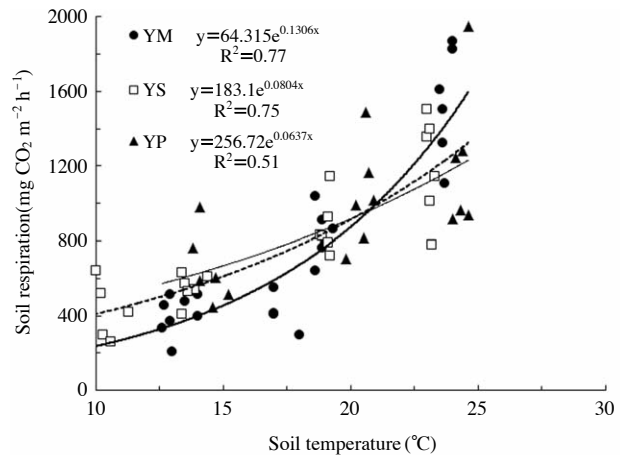


Fig. 4. Relationships between soil respiration and soil temperature calculated from each communities in Namhangang basin. YM; *Miscanthus sacchariflorus*, YS; *Salix koreensis*, YP; *Phragmites japonica*.

드나무군락의 경우, 8월에 1,215 mg CO₂ m⁻²에서 9월에 1,031 mg CO₂ m⁻²로 매우 높은 토양호흡속도를 보여주었다. 이러한 토양호흡의 토양수분 의존성은 일반적으로 사용하고 있는 지온과 토양호흡의 지수상관식의 상관성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 회귀분석에 나타난 r² 값은 물억새군락의 경우, 0.77, 버드나무군락은 0.75, 달뿌리풀군락은 0.51이었으나, 낙동강지역은 물억새군락에서 0.48, 버드나무군락에서 0.60, 달뿌리풀군락은 0.6으로 남한강지역이 평균 0.68로 나타났다 (Fig. 4). 이러한 토양수분이 원인으로 추정기간 전체의 토양호흡값은 잘 발달된 산림에서의 토양호흡 정도 (약 400~800 mg CO₂ m⁻²)의 높은 값을 나타냈다 (Suh *et al.* 2005).

2. 수변식생 토양의 탄소축적량

남한강지역의 물억새군락, 버드나무군락, 달뿌리풀군락의 깊이 별 토양 유기물함량은 5.3% (0~5 cm), 5.3% (5~10 cm), 3.4% (10~15 cm), 3.3% (15~20 cm)로 깊이가 증가할수록 토양유기물함량은 적어지는 결과를 보였다 (Fig. 5). 토양 깊이가 증가할수록 유기물함량이 감소하는 경향은 일반적인 식생토양에서 나타나는 결과 (Eswaran *et al.* 1995; Kern 1994; Peter *et al.* 2006)로 본 지역에서도 이와 유사한 결과로 보인다. 하지만 주기적인 교란을 받는 지역임에도 산림에 필적하는 높은 유기물함량을 보이는 것 (Jeong *et al.* 2013)은 본 조사지점 하천의 중하류 지역에 위치하는 관계로 축적된 수류에 의해 운반되어 축적된 식물유래 유기물이 원인으로 보인다. 이러한 유기물은 이듬해 물에 의해 교란이 재발할 때까지 해당 식

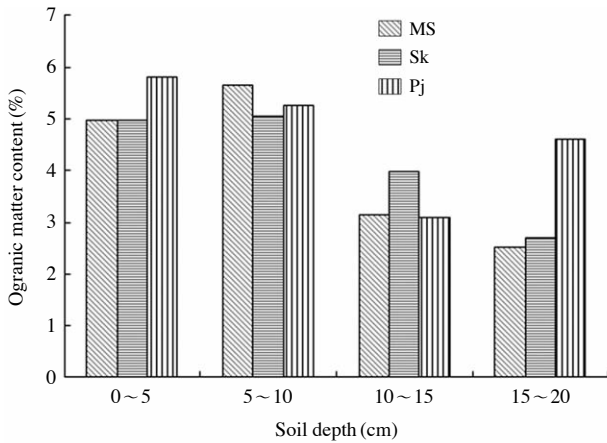


Fig. 5. Soil organic matter content in each community. Ms; *Miscanthus sacchariflorus*, Pj; *Phragmites japonica*, Sk; *Salix koreensis*

생 토양의 표면에 정착하며 분해되는 과정을 거치고 그 과정에서 일부가 토양에 축적된 것으로 판단된다. 또한 수류에 의해 운반이 용이한 상류지역 식생의 점토성 유기물질은 상류지역 토양표면 또는 토양 중에 축적되어 있다가 일시적으로 높은 강우 시 물과 함께 이동하여 하류의 바다 또는 수변지역에 침전되어 해당 지역 토양의 유기물함량 증가에 기여하고 있는 것으로 판단된다.

이는 산림지역의 식생토양과는 전혀 다른 생태계 탄소 수지 시스템으로 이러한 경우, 수류에 의해 유입되는 탄소량, 즉 해당년도에 축적된 토양탄소축적량을 식물의 순일차생산량과 함께 생태계 유입량으로 계산해야 하는 근거가 된다. 하지만 전년도에 생산 공급된 리터는 수류에 의해 빠져나가므로 유출량으로 계산하여야 할 것이다.

3. 수변 식생군락 별 연간 탄소수지

측정기간에 수집된 토양호흡 자료를 바탕으로 한 계산한 토양에서 대기로의 탄소방출량은 Table 1과 같다. 지운을 바탕으로 추산한 연간 토양호흡방출량은 물억새군락의 경우 30.12tCha⁻¹ yr⁻¹, 버드나무군락은 19.83tCha⁻¹ yr⁻¹, 달뿌리풀군락은 21.96tCha⁻¹ yr⁻¹으로 나타났다.

탄소흡수원의 관점에서의 경우, 토양호흡은 식물의 뿌리호흡과 토양미생물 호흡으로 구분하고 순생태계생산량을 산정할 경우, 미생물호흡만을 사용하게 된다. 이러한 미생물 호흡량은 물억새군락, 버드나무군락, 달뿌리풀군락에서 각각 16.6tCha⁻¹ yr⁻¹, 10.9tCha⁻¹ yr⁻¹, 12.1tCha⁻¹ yr⁻¹로 매우 높은 수치를 보였다.

토양호흡량 (Table 2), biomass 조사, 토양탄소축적량의 자료를 바탕으로 계산한 생태계순생산량 (NEP)은 버드

Table 1. Annual soil respiration of major communities in Namhangang basin (tCha⁻¹ yr⁻¹, SR; soil respiration, HR; heterotrophic respiration, RR: root respiration)

Community type	Annual SR	HR	RR
<i>Salix koreensis</i>	19.8	10.9	8.9
<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	30.1	16.6	13.6
<i>Phragmites japonica</i>	22.0	12.1	9.9
Average	24.0	13.2	10.8

Table 2. Annual carbon flux of three communities established in Namhangang basin (tCha⁻¹ or tCha⁻¹ yr⁻¹, HR; heterotrophic respiration, NEP: net ecosystem productivity)

Community type	NPP	Flower	Litter	HR	NEP
<i>Salix koreensis</i>	22.3	5.8	2.3	7.5	18.3
<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	5.6	14.0	3.9	10.9	4.8
<i>Phragmites japonica</i>	6.6	9.9	1.9	8.3	6.3
Average	11.5	9.9	2.7	8.9	9.8

나무군락에서 18.3 tCha⁻¹ yr⁻¹, 물억새군락에서 4.8 tCha⁻¹ yr⁻¹, 달뿌리풀군락에서 6.3 tCha⁻¹ yr⁻¹으로 버드나무군락에서 가장 높게 나타났다 (Table 2). 군락 각각에 대한 순일차생산량은 버드나무군락이 22.3 tCha⁻¹ yr⁻¹, 물억새군락이 5.6 tCha⁻¹ yr⁻¹, 달뿌리풀군락이 6.6 tCha⁻¹ yr⁻¹로 버드나무군락이 가장 높은 값을 보였다. 또한 수류에 의해 운반 유입된 것으로 간주되는 0~5 cm 깊이의 토양 탄소축적량은 버드나무군락이 5.8 tCha⁻¹ yr⁻¹, 물억새군락이 14.0 tCha⁻¹ yr⁻¹, 달뿌리풀군락이 9.9 tCha⁻¹ yr⁻¹로 물억새군락이 가장 높은 값을 보였다. 이러한 수류에 의한 운반 유입과 반대로 유출될 것으로 판단되는 지표면의 리터량은 버드나무군락이 2.3 tCha⁻¹ yr⁻¹, 물억새군락이 3.9 tCha⁻¹ yr⁻¹, 달뿌리풀군락이 1.9 tCha⁻¹ yr⁻¹로 유입량보다 비교적 적은 것으로 나타났다. 이러한 수치는 지상부 20 cm 깊이까지 축적된 토양탄소량은 버드나무군락이 28.9 tCha⁻¹ yr⁻¹, 물억새군락이 43.0 tCha⁻¹ yr⁻¹, 달뿌리풀군락이 38.7 tCha⁻¹ yr⁻¹로 식물 biomass성 탄소에 비해 대단히 높은 양의 탄소가 축적되어 있는 것으로 조사되었다 (Table 2). 하지만 이러한 토양축적탄소량은 산림과 같은 육상식물군락 생태계와는 달리 홍수와 같은 일시적인 물의 흐름 증가와 그로 인한 유기물 함유 토양의 유입과 유출에 의해 크게 영향을 받는 것으로 생태계 탄소수지를 정량할 경우, 이에 대한 부분을 어떻게 처리하여야 할 것인가에 대한 명확한 기준을 설정하는 것이 필요하다.

결과적으로 수변지역 생태계의 탄소축적량은 목본식물이 초본식물보다 2.9~3.8배 효과적일 수 있다는 결과

를 얻었다. 하지만 이러한 수치의 정확성을 확보하기 위해서는 수류에 의해 운반 또는 유실되는 탄소량에 대한 정확한 정량 자료가 보충되어야만 한다. 또한 이러한 버드나무군락을 수변 인근이 아닌 제방 위 또는 그 가까이에 조성한다면 이는 수류에 의한 영향이 배제되는 환경 하에서의 흡수원이 되기 때문에 본 조사에서 도출된 것과 양적인 차이가 발생할 수 있다. 따라서 수류의 영향을 받지 않는 지역에 대한 추가적인 조사 자료가 보충될 필요가 있다.

적 요

생태계가 담당하는 기능의 크기와 그 변화에 관여하는 환경요인과의 상호관계성 도출은 생태계의 과학적 속성 이해에 필수불가결한 요소이다. 본 연구는 수변의 특이적 환경조건에 의해 주기적인 교란과 토양 퇴적환경이 발달하는 하천 수변지역에 형성되어 있는 하천식생에 대해 토양탄소축적량을 정량하고 그러한 식생의 토양으로부터 방출되는 토양호흡과 환경요소 자료를 수집하여 각 요소의 상호간의 관계성을 분석하였다. 남한강 여주지역에서 물억새, 달뿌리풀, 버드나무에서 토양호흡은 2009년 8월부터 11월까지 각 군락에서 수집하였으며, 토양탄소축적량은 각 군락의 3지점에서 수집하였다. 토양호흡은 지온변화에 민감하게 반응하였으며, 가장 높게 관찰되는 8월의 토양호흡값은 달뿌리풀군락, 물억새군락, 버드나무군락에서 각각 $1,539 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}$, $1,200 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}$, $1,215 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2}$ 으로 측정되었다. 이러한 자료를 바탕으로 산정한 연간 토양호흡량은 달뿌리풀군락, 물억새군락, 버드나무군락에서 각각 $19.8 \text{ tCha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, $30.1 \text{ tCha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, $22.0 \text{ tCha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 산정되어 물억새군락의 토양에 가장 높은 탄소가 축적된 것으로 평가되었다. 한편, 토양탄소축적량(리터층+토양층)은 달뿌리풀군락, 물억새군락, 버드나무군락에서 각각 40.6 tCha^{-1} ($1.9+38.7$), 46.9 tCha^{-1} ($43.0+3.9$), 31.2 tCha^{-1} ($28.9+2.3$)으로 물억새군락의 토양에 가장 많은 탄소가 축적된 것으로 조사되었으며 이는 물억새군락의 높은 지상부 생산성에서 기인하는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ90722803)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Davidson EA, LV Verchot, JH Cattani, IL Ackerman and JEM Carvalho. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48:53-69.
- Eswaran H, E Ban den Berg P Reich and J Kimble. 1995. Global soil carbon resources. pp. 27-44. In *Soils and Global Change* (Lal R, JM Kimble, E Levine, BA Stewart, eds.). CRC-Press.
- Gutiñas ME, F Gil-Sotres, MC Leirós and C Trasar-Cepeda. 2013. Sensitivity of soil respiration to moisture and temperature. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 13:445-461.
- Jeong HM, HR Kim, DH Shim, KM Lee, SH Lee, YS Han, RH Jang, SK Lee, TK Kim and YH You. 2013. Litter production and soil organic carbon dynamics of *Pinus densiflora*, *Quercus monogolica* and *Robinia pseudo-acacia* forests in Mt. Nam. *Korean J. Environ. Biol.* 31:87-95.
- Kern JS. 1994. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:439-455.
- Korean Meteorological Administration. 2011. *Climatological Normals of Korea* (11-1360000-000077-14): 1981-2010.
- Lee EH, JH Lim and JS Lee. 2010. A review on soil respiration measurement and its application in Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 12:264-276.
- Lee JH, JS Yi, YM Chun, NY Chae and JS Lee. 2013. Discussion of Soil Respiration for Understanding Ecosystem Carbon Cycle in Korea. *Korean J. Environ. Ecol.* 46:309-317.
- Lee JS. 2004. A study on change of an accumulated carbon according to successional stage on temperate grassland. *Korean J. Environ. Biol.* 22:1-6.
- Lee JY. 2013. The evaluation of stream naturalness and the changes of vegetation biotope in namhan river basin. Doctoral dissertation in Mokpo Univ.
- Lee MS. 2003. Method for assessing forest carbon sinks by ecological processing-based approach - a case study for Takayama station, Japan. *Korean J. Ecol.* 26:289-296.
- Liang N, T Nakadai, T Hirano, L Qu, T Koike, Y Fujinuma and G Inoue. 2004. In situ comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi*) forest. *Agric. For. Meteorol.* 123:97-117.
- Oliver H, AF Lotter and G Lemcke. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* 25:101-110.
- Peter RG, WM Post and K Hennessy. 2006. The potential impact of climate change on Australia's soil organic carbon resources. *Carbon balance manage.* 1:14.
- Saigusa N and T Oikawa. 1994. CO₂ and water exchange bet-

- ween grassland ecosystem and atmosphere. *Bull. Environ. Res. Center* 19:105-106.
- Saigusa N, T Oikawa and S Liu. 1998. Seasonal variations of the exchange of CO₂ and H₂O between a grassland and the atmosphere: An experimental study. *Agric. For. Meteorol.* 89:131-139.
- Santisteban JI, R Mejavilla, E López-Pamo, CJ Dabrio, MB Ruiz Zapata, MJ Gil Garcia, S Castaño and PE Martínez-Alfaro. 2004. Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? *J Paleolimnol.* 32:287-299.
- Suh SU, YK Min and JS Lee. 2005. Seasonal variation of contribution of leaf-litter decomposition rate in soil respiration in temperate deciduous forest. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 7: 57-65.
- Toda M, N Saigusa, T Oikawa and F Kimura. 2000. Seasonal changes of CO₂ and H₂O exchanges over a temperate grassland. *J. Agric. For. Meteorol.* 56:195-207.
- Wang G, J Qian, G Cheng and Y Lai. 2002. Soil organic carbon pool of grassland on the Qinghai-Tibetan plateau and its global implication. *Sci. Total Environ.* 291:207-217.
- Wang W, W Zeng, W Chen, H Zeng and J Fang. 2013. Soil Respiration and Organic Carbon Dynamics with Grassland Conversions to Woodlands in Temperate China. *Plos One* 8:1-10.

Received: 6 December 2014

Revised: 15 December 2014

Revision accepted: 15 December 2014