

## 온대 낙엽활엽수림과 상록침엽수림의 토양탄소순환에 관한 연구

민윤경 · 이은혜 · 이재석  
건국대학교 이과대학 생명과학과

### A study on the Soil Carbon Cycle in Temperate Deciduous and Evergreen Coniferous Forests

MIN, Youn-Kyung · Eun-Hye LEE · Jae-Seok LEE

Department of Biological Sciences, College of Science, Konkuk University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

We investigated the differences in environment of forest floor and soil characteristics between the evergreen coniferous and the temperate deciduous forests that different in dominant species in Goesan, Chungcheongbuk-Do. The accumulated litter in the deciduous forest was higher than the coniferous forest( $368.3 \pm 19.51 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  and  $405.2 \pm 21.4 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) in 2005. The decomposition rate of leaf litter were measured with litter bags and reduced across all sites 6 month after setup. the decomposition rate of leaf litter in the deciduous forest was higher than the coniferous forest(31.4% and 32.5%). The accumulated carbon of the evergreen coniferous and the temperate deciduous forests in 0~30cm soil depth were measured  $81.13 \text{ t C ha}^{-1}$ ,  $86.45 \text{ t C ha}^{-1}$  respectively. Soil respiration was estimated to be  $187.0 \sim 297.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  in the temperate deciduous forest and  $196.2 \sim 444.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  in the evergreen coniferous forest, respectively. The deciduous forests was measured higher inflow and outflow of carbon (high soil carbon contents, high litterfall, high decomposition rate of litter and high soil respiration rate) than the evergreen coniferous forest.

**Key words** : temperate deciduous forest, evergreen coniferous forest, soil carbon contents, LAI, soil respiration

#### 서 론

지구 온난화의 원인인 온실가스 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는  $\text{CO}_2$  (IPCC, 1990)는 급속한 인구 증가와 경제 활동의 가속화로 급격히 증가하여 왔고, 21세기 후반에는 산업혁명 이전의 2배 이상까지 증가할 것으로 전망하고 있다(Jin *et al.*, 2000). 국제사회는 이러한  $\text{CO}_2$  농도 증가에 기인하는 기후 변화와 그에 의한 이상 기후를 방지하기 위해 기후협약을 체결하였으며, 회의를 거듭하여 교토의정

서의 핵심 내용이 되는 CO<sub>2</sub> 의무 감축을 이끌어 내었다. 교토의정서는 2005년 2월 러시아의 비준으로 정식 발효되었으며, 이와 함께 각국은 자국의 감축 의무 부담을 경감시키기 위해 흡수원 발굴 연구에 더욱 박차를 가하게 되었다.

탄소 흡수원으로서 가장 주목을 받고 있는 산림생태계에서 탄소 축적은 일차적으로 식물의 광합성에 의해 지상부로 고정되고 고정된 탄소는 식물 그 자체와 낙엽, 낙지 등을 통하여 토양에 공급되며 이는 재차 미생물의 호흡을 통해 대기 중으로 환원되나, 많은 양의 탄소는 토양 중에 축적된다. 이러한 결과 육상생태계의 토양권에는 약 1,500 Gt C의 탄소가 축적되어 있으며, 이는 식생(550 Gt C)의 약 3배, 대기(780 Gt C)의 약 2배에 이르는 막대한 양에 해당하여, 육상생태계에서 가장 큰 탄소 저장체로서의 역할을 수행하고 있다(Waring and Running, 1998).

토양에 축적된 탄소는 식물을 기본으로 하는 생물의 사체를 통해 끊임없이 탄소를 공급받지만, 많은 양의 탄소가 토양호흡을 통해 대기로 환원된다. 이러한 토양호흡은 온도와 수분 요인과 같은 물리화학적 요인에 의해 속도가 크게 좌우되며, 결과적으로 물리화학적 요인의 변화는 육상생태계의 토양에 축적된 방대한 양의 탄소 추이를 좌우하는 중요한 열쇠가 된다. 이러한 토양탄소의 미세한 변화에도 대기의 CO<sub>2</sub> 농도는 크게 영향을 받을 수 있기 때문에 토양권 탄소가 다양한 환경요인의 변화에 대해 어떻게 반응하는가의 파악은 지구 온난화의 추이를 예측하는데 있어 대단히 중요한 문제이다.

이러한 이유로 토양호흡, 산림 내 저장되어 있는 탄소의 축적량 및 공급량을 파악하여 산림생태계의 탄소 순환을 모델을 통해 예측하는 탄소 수지 연구에 대한 관심이 증가하고 있다(Raich and Schlesinger, 1992; Nakane, 1995; Vitousek, 1997; Crockford and Richardson, 1998; Wang *et al.*, 2002; Widen, 2002).

우리나라의 경우, 전 국토의 60%를 차지할 정도로 많은 산림을 가지고 있기 때문에 기후협약에 대응하기 위한 효과적인 흡수원으로 활용에 매우 유리한 조건을 가지고 있다. 이러한 관점에서 최근 산림생태계의 탄소 수지에 대한 연구가 여러 방면으로 진행되고는 있으나(박, 1997; 박, 1999; 손과 이 2001; 표 등 2003), 축적된 자료는 극히 빈약한 실정으로, 산림을 흡수원으로 개발하기 위해서 필요한 우리나라 산림 유형과 형태에 따른 산림 토양에서의 탄소 유출입과 탄소 저장 및 토양 호흡을 통한 CO<sub>2</sub> 방출량 등의 연구 자료가 절실히 요구된다.

이와 같은 상황에서 본 조사는 우점종의 차이에 의해 서로 다른 생태적 특성을 갖는 충청북도 피산의 상록침엽수림과 온대 낙엽활엽수림에서, 산림생태계의 탄소 순환을 파악하기 위해 산림토양에 축적되어 있는 토양 탄소 축적량을 파악하고, 우점종의 차이에 따른 엽면적 지수의 변화 및 탄소의 주요 공급원인 임상에 공급되는 리터의 양과 분해율, 잠재적 토양 호흡량을 파악하여 산림 토양의 탄소 축적량을 비교해 보고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

본 조사지는 충청북도 피산군 불정면 외령리에 속하며, 지리적으로 북위 36° 56'과 동경 127° 50'에 위치하고 있고 전면적은 약 174ha에 이르며(정, 1987), 조사지의 고도는 상록침엽수림이 해발 355m,

낙엽활엽수림이 340m에 위치한다. 기상청 충주관측소에서 1971~2000년까지 최근 30년간 관측 기상 자료에 따르면 연평균 기온은 11.2℃, 강수량은 1,187.8mm, 습도는 72.4%이다.

이 지역은 산불과 화전 경작 등 인위적 교란이 강했던 지역이었으나, 70년대, 임분의 약 39%에 일본잎갈나무(*Larix leptolepis*(S. et Z.) Gordon)와 리기다소나무(*Pinus rigida* Mill)가 인공 식재되어 유지되고 있고, 1984년 건국대학교에서 연습림으로 인수하여 기타 지역에 1985~1986년間に 걸쳐 잣나무를 조림한 후 자연천이가 진행되어 현재의 참나무류와 소나무가 우점하는 임분으로 형성되었다(정 등, 1987). 건국대학교 연습림은 총 32과 53속 84종의 목본이 생육하고 있으며 (정과 추, 1991), 이 중 조사지의 상록침엽수림은 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z.)가, 낙엽활엽수림은 상수리나무(*Quercus acutissima* Carruth.)와 졸참나무(*Quercus serrata* Thunb.)가 우점하는 혼합림으로 평균 출현종은 29종과 18종이었다(서 등, 2005).

## 2. 토양 탄소 축적량 추정

각 군락의 토양에 축적되어 있는 탄소의 양을 추정하기 위해 2005년 3월과 12월 두 번 각 조사지에서 3지점을 각각 선정하여 0cm에서 30cm 깊이까지 5cm 단위로 토양 샘플관( $\phi = 5\text{cm}$ ,  $h = 5.1\text{cm}$ )을 이용하여 샘플관과 샘플관 주변 토양을 동시에 채취하였다. 채취한 샘플관의 무게를 측정한 후 80℃ 건조기에서 48시간 건조시킨 무게를 측정하여 밀도(soil bulk density)를 구하였다. 유기물 함량은 채취한 토양을 2mm 체로 쳐 2mm 이하의 토양만을 넣은 도가니를 800℃의 전기로에서 4시간 동안 연소시킨 후, 연소 전과 연소 후의 토양 무게 차이를 연소 전 토양 무게로 나눈 값을 백분율로 계산하였다.

샘플관 주위에서 채취한 토양은 건조하여 2mm 체로 쳐 암석과 입자가 2mm 이하인 토양의 비율을 구하였다(Table 1). Wang *et al.* (2002)의 방법으로 토양 내 탄소 축적량( $Pc1$ )을 구하고(식 1), 거기에 2mm 이하 토양비율을 곱하여 암석 등 토양 외의 물질에 의한 과다한 측정 오류를 최소화하여(식 2) 토양 내의 축적된 탄소량( $Pc2$ )을 계산하여 각 군락간의 차이를 비교하였다.

토양 내 탄소량( $Pc1$ ) =  $rHba$  (토양 유기물량) .....(식 1)

( $r$  = 토양밀도,  $H$  = 분석한 토양두께,  $b$  = 유기물비율,  $a$  = 토양 내 탄소비율)

토양 내 탄소축적량( $Pc2$ ) =  $rHba \times$  단위체적 내 2mm이하 토양비율 .....(식 2)

## 3. 엽면적 지수 및 리터의 발생량

2005년 3월부터 9월까지 매달 조사지에서 임관분석기(LAI-2000, Li-Cor)로 엽면적 지수를 측정하였다. 각각의 군락에 전년도 공급된 litter량을 추정하기 위하여 2005년 10월, 상록침엽수와 활엽수의 각 군락에 1m × 1m의 리터트랩을 설치하여 수집된 litter를 11월과 1월에 수거하였으며, 80℃ 건조기에서 48시간 건조하여 무게를 칭량하였다.

## 4. 리터의 분해량

조사지의 우점종을 선정한 후, 2005년 2월 조사지 인근에서 침엽수림은 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z.), 낙엽활엽수림은 상수리나무(*Quercus acutissima* Carruth.)와 졸참나무(*Quercus serrata* Thunb.) 낙

엽을 수집하여 80℃에서 48시간 동안 건조한 후 각각을 눈금 1mm의 나일론 천을 18cm × 25cm 크기로 재단한 리터백에 넣어 제작하고 건조질량을 측정하였다. 2005년 4월 각 조사지에 3곳을 선정하여 각각 임상 낙엽층에 6개월분의 리터백을 알루미늄 핀으로 한 개씩 고정하며 설치하였다. 설치된 리터백은 매월 수집하여 겉의 흙과 곰팡이 균사, 식물체의 잔뿌리 등을 제거한 후 80℃ 드라이오븐에서 48시간 동안 건조 후 칭량하여 분해속도를 계산하였다.

### 5. 토양 호흡량 측정

각 군락의 토양 호흡량을 측정하기 위하여 조사지의 각 사이트에 각각 4곳을 선정하여 아크릴 재질의 원통 칼라(collar,  $\phi = 20\text{cm}$ ,  $h = 15\text{cm}$ )를 교란을 최소화하도록 주의하며 2005년 10월 임상에 고정하여 설치하였다. 설치 시 교란된 토양상태가 안정화 되도록 5개월이 지난 후인 2006년 3월부터 실시하여 3월, 5월, 8월 중순에 채취하였으며, 매번 오전 10시에 측정하였다. 토양호흡 측정 시 습도계(HydroSense, Campbell, Scientific Australia)와 디지털 온도계(Digital Thermometer Model 2455, Yokogawa, Japan)를 이용하여 지하부 12cm까지의 평균 습도와 15cm까지의 평균 지온을 측정하였다. 칼라와 같은 재질로 3-way 코크를 설치하여 내부의 공기를 채취할 수 있게 제작한 뚜껑( $h = 10\text{cm}$ )을 칼라( $h = 10\text{cm}$ )에 덮고 토양 호흡을 측정하기 시작하여 0, 5, 10분 후의 내부 공기를 주사기(10ml)를 이용하여 챔버 내부의 공기를 채취하고(Fig. 1), Gas chromatography(ACME6000GC, Yonglin instrument)를 이용하여  $\text{CO}_2$  농도를 측정하여 (식 3)과 같이 계산하였으며, 이 중  $\text{CO}_2$ 의 밀도인  $\rho$ 는 식4와 같다(Bekku et al., 1995).

$$SR = \Delta C / \Delta t \times \rho \times V / S \dots\dots\dots(\text{식 } 3)$$

( $\Delta C / \Delta t$  = 시간변화에 따른 농도의 변화기울기,  $\rho$  =  $\text{CO}_2$ 의 밀도,  $V/S$  = Chamber 부피/ Chamber 면적)

$$\rho = PM / RT \dots\dots\dots(\text{식 } 4)$$

( $P$  = 대기압,  $M$  =  $\text{CO}_2$ 의 분자량,  $R$  = 기체상수,  $T$  = 절대온도)

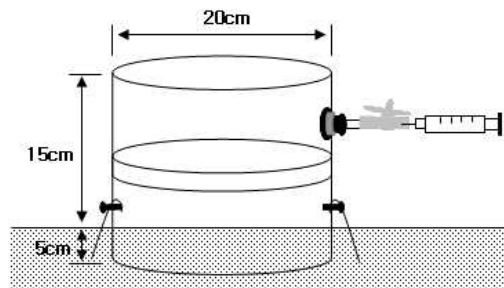


Fig. 1. Soil respiration chamber for the closed chamber method for measuring  $\text{CO}_2$  concentration.

### 6. 통계분석

실험에서 얻어진 결과를 평균값은 엑셀 함수를 이용하여 통계처리하여 평균  $\pm$  표준오차로 표시하

였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 토양 환경 요인 조사 및 토양 탄소 축적량 추정

토양 탄소 축적량을 추정하기 위해 2005년 3월과 12월에 채취한 토양으로 측정한 토양밀도, 토양 비율, 유기물 함량은 Table 1과 같다. 토양밀도는 1.20~1.51 g cm<sup>-3</sup>으로 전반적으로 낙엽활엽수림토양에서의 밀도가 약간 높게 나타났으나 상록침엽수림과 낙엽활엽수림에서 오차 범위 값을 고려할 때 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 두 조사지 모두 토심이 깊어질수록 토양의 밀도가 커졌으며, 이는 공극의 크기가 작고 토양이 단단해지는 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 입단구조가 발달한 표층토의 경우 1.0~1.3의 범위이며, 토성이 거친 표층토의 경우 1.3~1.8이라고 하며(임, 1996), 본 조사지의 경우 비교적 입단 구조가 발달한 토양임을 알 수 있다. 전체 토양 중 입자크기가 2mm이하인 토양의 비율은 낙엽활엽수림의 경우 토심 20cm에서 급격히 떨어졌다가 토심이 깊어지면 다시 증가하는 경향을 나타냈으며, 상록침엽수림의 경우 토심이 깊어질수록 약간 증가하다가 25cm에서 약간 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 토심 15cm까지는 낙엽활엽수림에서 토양비율이 많이 나타났으나 20cm부터는 침엽수림에서 토양비율이 더 크게 나타났다. 15cm 부근에서의 토양 비율의 큰 변화는 15~25cm가 용탈층으로 공극이 많기 때문이다(전 등, 1998).

**Table 1.** Comparison of soil properties between coniferous forest and deciduous forest

	Coniferous forest			Deciduous forest		
	Density (g cm <sup>-3</sup> )	S.R.(%)	O.M.C (%)	Density (g cm <sup>-3</sup> )	S.R.(%)	O.M.C (%)
0~5	1.21±0.05	67.21±4.18	6.54±0.49	1.20±0.09	76.38±5.80	6.08±1.40
5~10	1.32±0.02	67.46±6.53	5.53±0.18	1.37±0.03	70.00±5.52	5.83±0.36
10~15	1.40±0.07	68.62±5.21	5.40±0.20	1.44±0.11	72.58±5.93	5.76±0.12
15~20	1.42±0.04	72.60±5.41	5.80±0.69	1.45±0.05	61.31±7.86	5.78±0.12
20~25	1.34±0.03	66.61±6.30	6.03±0.47	1.51±0.03	66.64±6.12	5.83±0.22
25~30	1.37±0.04	72.54±5.34	5.75±0.58	1.50±0.05	68.97±6.69	6.18±0.34

\* S.R.: Soil relative rate, O.M.C.: Organic matter content.

Wang *et al.* (2002)의 방법으로 추정한 토양 내 탄소축적량을 Fig. 2와 같이 나타냈다. 토양 내 탄소 축적량을 구하였다. 전반적으로 15~20cm를 제외하고는 활엽수림에 축적된 탄소량이 많게 나타났으며, 0~30cm까지 토양의 탄소 축적량은 침엽수림에서 81.1 t C ha<sup>-1</sup>, 낙엽활엽수림에서는 86.5 t C ha<sup>-1</sup>로 나타났다. 이는 서울의 아차산에서 0~20cm까지의 토양 탄소 축적량이 낙엽활엽수림에서 58.9 t C ha<sup>-1</sup>, 상록침엽수림에서 52.2 t C ha<sup>-1</sup>를 나타낸 것(민 등, 2006)과 비교할 때 거의 유사한 결과로 나타났다. 일반적으로 낙엽활엽수림과 상록침엽수림군락의 토양 탄소 축적 패턴의 차이는 각각의 군락 리터의 C/N비의 차이에 기인하는 것으로 추정된다. 일반적으로 C/N비는 침엽수성 리터가 낙엽활엽

수성 리터보다 높고, 그에 의해 미생물에 의한 분해속도도 느린 것으로 보고되어 있으며(진 등, 1994), 따라서 상록침엽수림의 경우 C/N비가 높기 때문에 유기물의 분해가 잘 이루어지지 않으므로 상대적으로 낙엽활엽수림에 비해 토양 내 탄소축적량이 적게 된다.

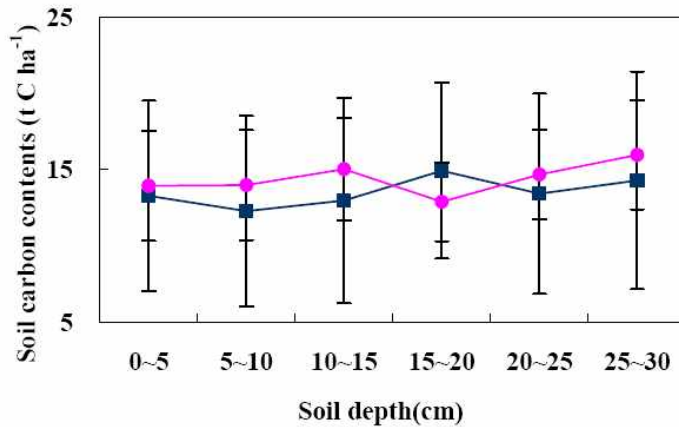


Fig. 2. Variations of soil carbon contents in the coniferous (—■—) and the deciduous forests (—●—).

## 2. 엽면적 지수 및 리터의 발생량

2005년 3월부터 10월까지 상록침엽수림의 엽면적 지수는 최저 3.09부터 최고 5.40으로 2.31의 차이를 나타냈고, 낙엽활엽수림의 경우 3월에는 거의 잎이 없는 상태로 엽면적지수가 0.66을 나타냈으며 4월 이후 증가하기 시작하여 7월에 최고 4.44를 나타낸 후 감소하기 시작하였으며(Fig. 3), 상록침엽수와 낙엽활엽수 모두 8월 이후 임상에 리터 공급이 활발해지는 것으로 사료된다.

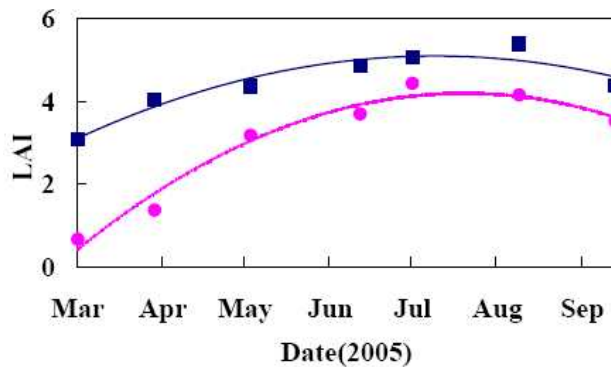


Fig. 3. Comparison of LAI monthly variations between coniferous (■) and deciduous forests (●).

리터 트랩을 이용하여 수집된 리터의 양은 상록침엽수림에서  $368.3 \pm 19.5 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 낙엽활엽수림에서  $405.2 \pm 21.4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 였다. 이는 2004년 서 등(2005)이 같은 장소에서 방형구를 정하여 채집하

여 추정한 리터의 양이 상록침엽수림의 경우  $742.2 \pm 180.7 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 낙엽활엽수림이  $503.8 \pm 71.7 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  이었던 것에 비해 각각 49.6%, 80.5% 정도에 해당하는 적은 양이나, 방형구를 이용한 추정방법은 수집 시 직전년도 리터를 정확히 구분하기 어려우며, 특히 침엽수의 경우 리터의 분해속도가 느려 생산년도의 정확한 구별이 어렵기 때문에 실제 수집한 리터의 양이 적게 나온 것으로 여겨진다. 아시아 온대림의 침엽수림의 리터 발생이  $79 \sim 334 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 활엽수림이  $219 \sim 567 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이며(Liu *et al.*, 2004), 특히 우리나라 참나무림의 리터 발생량은  $248.0 \sim 876.1 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  라고 하였고(이 등, 2005), Crockford and Richardson(1998)이 호주에서 조사한 소나무류의 리터 발생량이 2년 평균  $180.0 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  으로 볼 때 본 조사지의 리터 발생량은 이들 범위 내에 있다.

**Table 2.** Annual litterfall input at each sites( $\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ )

Forests	Mean $\pm$ Std.error
Coniferous forest	$368.3 \pm 19.51$
Deciduous forest	$405.2 \pm 21.4$

#### 4. 리터의 분해량

상록침엽수림과 낙엽활엽수림에서 각각 6개월간의 리터 분해율을 조사한 결과, 리터백 설치 후 초기 1개월은 조사지 두 곳 모두에서 질량의 증가가 나타났다. 이는 미세한 곰팡이나 뿌리, 작은 입자의 토양 등이 초기에 리터 백의 정착과정에서 리터 백 내로 침투한 것으로 보여지며, 2개월 이후부터는 리터의 분해가 일어나 질량은 감소되기 시작하였다. 6개월 간 상록침엽수림과 낙엽활엽수림에서 매월 평균 각각 6.7%, 7.2%의 리터의 질량의 감소가 일어났으며, 특히 6월~8월 사이에 가장 높은 질량감소율을 나타냈다. 전반적으로 낙엽활엽수림에서의 분해율이 높게 나타났으며 6개월 경과 후 상록침엽수림은 31.4%, 낙엽활엽수림은 32.5%의 질량 감소가 일어났다(Fig. 4). 광릉 낙엽활엽수림의 졸참나무가 1년 동안 24.2%의 감소가 일어난 것과 비교할 때 분해율이 높게 나타난 것을 알 수 있다(서 등, 2005). Kurz-Besson *et al.*(2005)은 중부 유럽 3국의 소나무림에서 3년간 리터의 발생과 분해량을 조사한 결과 연간  $0.1 \sim 1.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 의 리터가 발생하며, 3년간 리터 백의 리터는 지역에 따라 61.2~81.4%의 분해율을 나타내어 지역 간에 적지 않은 차이가 있음을 보여주었다.

특히, 본 조사지의 상록침엽수림과 낙엽활엽수림에서 발생한 리터는 6개월이 경과한 후 각각  $115.7 \text{ g m}^{-2}$ ,  $131.7 \text{ g m}^{-2}$ 이 분해되는 것으로 예측할 수 있다.

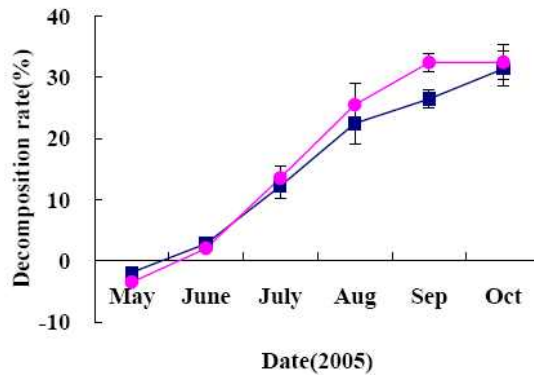


Fig. 4. Decomposition rate of litter between coniferous (■) and deciduous forests(●).

### 5. 토양 호흡량 측정

밀폐 챔버법(CC법 ; Closed chamber method)을 이용하여 2006년 3월, 5월, 8월 조사한 각 조사지의 토양 호흡은 다음과 같다. 토양 호흡은 3월에서 8월로 갈수록 증가하는 추세를 보였으며, 전반적으로 상록침엽수림에 비하여 낙엽활엽수림의 토양 호흡이 더 크게 나타났다. 토양 호흡은 일반적으로 온도와 밀접한 관계에 있으며 3월 이후 증가하기 시작하여 6~8월 사이의 여름에 가장 높은 값을 나타내며, 11월 이후 가장 낮은 값을 나타내게 된다(Widen, 2002; Vincent *et al.*, 2006). 상록침엽수의 경우 3월에  $187.0 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 5월에  $269.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 8월에  $297.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 호흡량을, 낙엽활엽수림은 3월에  $196.2 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 5월에  $277.7 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 8월에  $444.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 호흡량을 나타내어(Fig. 5), 상록침엽수림에 비해 낙엽활엽수림에서 토양 호흡량이 측정 기간 모두 높게 측정되었다. Widen(2002)은 혼합침엽수림에서 북사면의 경우 연간  $352 \sim 363 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 호흡량이 발생했다고 보고하였고, Tang *et al.*(2005)은 미국의 폰데로사 소나무(*Pinus ponderosa*)림의 토양 호흡량이 연간  $495.6 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 이라고 하였으며, Mo(2005)는 냉온대 낙엽활엽수림에서 연간  $725.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 토양 호흡이 발생한다고 하였다. 이는 본 조사에서 침엽수림에 비해 낙엽활엽수림에서의 토양호흡량이 더 크게 나온 것과 일치한다고 할 수 있다. 또한 토양 호흡은 온도 변화와의 영향으로 오전에 증가하다가 오후에 감소하는 경향을 나타내므로(Euskirchen *et al.*, 2003), 오전 10시에 측정한 데이터는 측정시기의 평균 호흡량에 비해 적게 측정되었을 것으로 사료된다. 냉온대 낙엽 활엽 수림에서 통기법(OF법 : Open flow method)법을 사용하여 측정한 토양 호흡값이 4월말에  $245.2 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 5월 중순에  $455.0 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Mo *et al.*, 2005)을 나타내는 것에 비하여 적게 나타났으나, CC법이 OF법에 비해 일반적으로 10 ~ 30% 정도 저평가되는 경향이 있다고 보고되고 있다(Rayment, 2000).



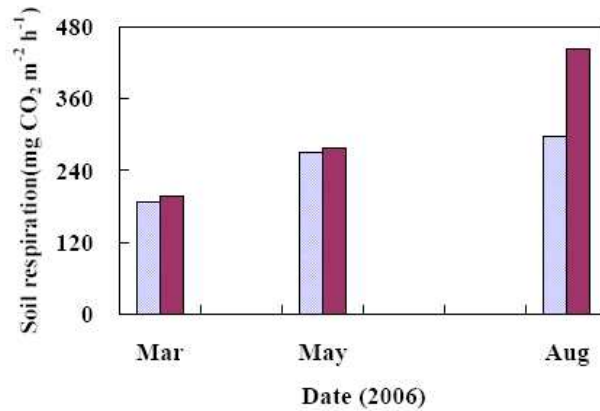


Fig. 5. Seasonal change in soil respiration rates between coniferous (□) and deciduous forests(■).

## 결 론

본 연구는 우점종이 서로 다른 상록침엽수림과 낙엽활엽수림에서 산림토양에 축적되어 있는 탄소의 축적량을 알아보고 리터의 공급과 분해, 토양 호흡 등을 통해 산림 토양 내 탄소의 발생과 이동을 알기 위해 충청남도 괴산에서 실시되었다.

조사지의 토심 30cm까지의 탄소 축적량은 우점종이 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z.)인 상록침엽수림과 우점종이 상수리나무(*Quercus acutissima* Carruth)와 졸참나무(*Quercus serrata* Thunb)인 낙엽활엽수림에서 각각  $81.1 \text{ t C ha}^{-1}$ ,  $86.4 \text{ t C ha}^{-1}$ 으로 탄소의 축적량은 전 깊이에 걸쳐 비슷하게 나타났다. 2005년 조사한 엽면적 지수는 3월 에 증가하기 시작하여 7월에 가장 높은 값을 기록하였고 상록침엽수림의 경우 3.09~5.40로 낙엽활엽수림의 0.66~4.44에 비해 엽면적지수의 변화가 그다지 크지 않으며, 리터의 발생은 8월 이후에 일어나는 것을 알 수 있다. 2005년 임상에 공급된 리터는 상록침엽수림에서  $368.3 \pm 19.5 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 낙엽활엽수림에서  $405.2 \pm 21.4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 였고, 리터백을 이용하여 조사한 6개월간의 분해율은 각각 31.4%, 32.5%로 낙엽활엽수림에서 리터의 공급량과 분해율이 모두 높게 나타났다. CC법을 이용하여 2006년 3월~8월초까지 2~3개월마다 측정일 오전 10시에 조사한 토양 호흡은 상록침엽수림에서 평균  $187.0 \sim 297.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 낙엽활엽수림에서  $196.2 \sim 444.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다.

임관이 일년내내 형성되어 있는 상록침엽수림은 토양에 축적되어 있는 탄소의 양이 적게 나타나며, 리터의 공급과 분해 및 토양호흡량이 모두 낙엽활엽수림에 비해 적게 조사되었다.

## 사 사

본 연구는 2005년도 한국자연보전협회의 지원을 받아 수행하였다.

## 인용문헌

- 박관수. 1997. 버드나무(*Salix* spp.) 조림지내 시비와 클론이 지상부 및 토양중 탄소축적에 미치는 영향. 한국임학회지 86(2): 177-185.
- 박관수. 1999. 충주지역의 신갈나무와 굴참나무 천연림 생태계의 지상부 및 토양 중 탄소고정에 관한 연구. 한국임학회지 88(1): 93-100.
- 민윤경, 이재만, 이은혜, 전호수, 이재석. 2006. 아차산 낙엽활엽수림과 침엽수림 임상의 미기후 특성과 토양탄소 축적량 및 토양호흡 특성. 한국자연보존연구지.
- 서상욱, 민윤경, 이재석. 2005. 토양호흡이 계절적 변이에 기여하는 리터의 분해속도. 한국농림기상학회지 7(1): 57-65.
- 서상욱, 민윤경, 이재석. 2005. 온대 낙엽활엽수림과 상록침엽수림내의 미기후 및 토양 환경 특성. 한국자연보존연구지 3(3): 247-259.
- 손요환, 이숙희. 2001. 토지 이용 형태의 변화와 토양 내 탄소와 질소의 관계. 한국임학회지 90(3): 242-248
- 이명종, 손요환, 진현오, 박인협, 김동엽, 김용석, 신동민. 2005. Litterfall과 토양호흡 측정에 의한 신갈나무 천연림의 지하부 탄소 분배. 한국농림기상학회지 7(3): 227-234.
- 임선욱. 1996. 토양학통론. 문운당. pp151-184.
- 전효택, 문희수, 김규한, 정명채. 1998. 환경지질학. 서울대학교 출판부 pp86-94.
- 정윤수. 1987. 건국대학교 괴산 연습림의 입지환경에 관한 연구. 건국대학교 동화와번역연구소(구 건국대학교 중원인문연구소) 논문집 6권: 407-421.
- 정윤수, 윤광배, 박현. 1987. 건국대학교 괴산 연습림의 삼림자원개발에 관한 연구. 건국대학교 동화와번역연구소(구 건국대학교 중원인문연구소) 논문집 6권 : 405-406.
- 정윤수, 추갑철. 1991. 건국대학교 괴산연습림 (槐山演習林)의 목본식물상. 건국대학교 자연과학연구소 논문집 2: 23-35.
- 진현오, 이명종, 신영오, 김정제, 전상근. 1994. 삼림토양학. 향문사.
- Bekku, Y., K. Hiroshi, N. Toshie and I. Hideo. 1995. Measurement of soil respiration using closed chamber method: An IRGA technique. Ecological Research 10(3): 369-373.
- Crockford, R. H. and D. P. Richardson. 1998. litter and associated chemistry in a dry sclerophyll eucalypt forest and a pine plantation in south-eastern Australia: 1. Litterfall and litter. Hydrological processes 12(3): 365-384.
- Euskirchen, E. S., J. Chen, E. J. Gustafson and S. Ma. 2003. Soil respiration at dominant patch types within a managed Northern Wisconsin Landscape. Ecosystems 6(6): 595-607.
- IPCC. 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge. Cambridge University Press.
- Jin, F., H. Yang and Q. Zhao. 2000. Progress in the research of organic carbon storage. Soil 32(1): 11-17.
- Kurz-Besson, C., M. M. Couteaux, J. M. Thiery, B. Berg and J. Remacle. 2005. A comparison of litterbag and direct observation methods of Scots pine needle decomposition measurement. Soil Biology &

- Biochemistry 37(12): 2315-2318.
- Liu, C., C. J. Westman, B. Berg, W. Kutsch, G. Z. Wang, R. Man and H. Ilvesniemi. 2004. Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia. *Global Ecology and Biogeography* 13(2): 105-114.
- Mo, W., M. S. Lee, M. Uchida, M. Inatomi, N. Saigusa, S. Mariko and H. Koizumi. 2005. Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology* 134: 81-94.
- Nakane, K. 1995. Soil carbon cycling in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation. *Forest Ecology and Management* 72(2/3): 185-197.
- Rayment, M. B. 2000. Closed chamber systems underestimate soil CO<sub>2</sub> efflux. *European Journal of Soil Science* 51(1): 107-110.
- Raich, J. W. and W. H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44B: 81-99.
- Tang, J., L. Misson, A. Gershenson, W. Cheng, and A. H. Goldstein. 2005. Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology* 132(3/4): 212-227.
- Vincent, G., A. R. Shahriari, E. Lucot, P. M. Badot and D. Epron. 2006. Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. *Soil Biology & Biochemistry* 38(9): 2527-2535.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco and J. M. Melillo. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *American Association for the Advancement of Science* 277(5325): 494-499.
- 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.
- Waring, R. H. and S. W. Running. 1998. *Forest ecosystem. Analysis at multiple scale.* Academic press 67.
- Widen, B. 2002. Seasonal variation in forest-floor CO<sub>2</sub> exchange in a Swedish coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 111(4): 283-297.

## 요 약

임상의 환경은 임관을 구성하는 우점종에 따라 크게 영향을 받으며, 그로 인해 임상에 공급되는 리터와 토양에 축적되어 있는 탄소의 양, 리터의 분해율, 토양 호흡량 등의 차이를 가져오게 된다. 본 연구는 임관 구성 우점종이 서로 다른 낙엽활엽수림과 상록침엽수림에 대해 토양의 탄소 순환의 특성에 대해 연구하였다. 조사지의 토심 30cm까지의 탄소 축적량은 우점종이 잣나무인 상록침엽수림과 우점종이 졸참나무와 상수리나무인 낙엽활엽수림에서 각각 81.13 t C ha<sup>-1</sup>, 86.45 t C ha<sup>-1</sup>로 탄소의 축적량은 전 깊이에 걸쳐 비슷하게 나타났다. 2005년 조사한 엽면적지수는 3월에 증가하기 시작하여 7월에 가장 높은 값을 기록하였고 상록침엽수림의 경우 3.09~5.40로 낙엽활엽수림의 0.66~4.44에 비

해 엽면적지수의 변화가 그다지 크지 않으며, 리터의 발생은 8월 이후에 일어나는 것을 알 수 있다. 2005년 임상에 공급된 리터는 상록침엽수림에서  $368.3 \pm 19.51 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 낙엽활엽수림에서  $405.2 \pm 21.4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 였고, 리터백을 이용하여 조사한 6개월간의 분해율은 각각 31.4%, 32.5%로 낙엽활엽수림에서 리터의 공급량과 분해율이 모두 높게 나타났다. CC법을 이용하여 2006년 3월~8월초까지 2개월마다 10시간동안 조사한 토양 호흡은 평균  $187.0 \sim 297.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 낙엽활엽수림에서  $196.2 \sim 444.5 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  로 낙엽활엽수림의 호흡량이 높게 나타났다. 따라서 상록침엽수림에 비해 낙엽활엽수림은 임상에 축적되어 있는 탄소의 축적량이 많을 뿐 아니라 리터의 발생량과 분해율, 토양 호흡률이 모두 높게 측정되어 탄소의 유입과 유출이 모두 큰 것으로 조사되었다.

검색어 : 낙엽활엽수림, 상록침엽수림, 토양탄소축적, 엽면적지수, 토양호흡