

## Litterfall과 토양호흡 측정에 의한 신갈나무 천연림의 지하부 탄소 분배

이명종<sup>1</sup> · 손요환<sup>2</sup> · 진현오<sup>3</sup> · 박인협<sup>4</sup> · 김동엽<sup>5</sup> · 김용석<sup>1</sup> · 신동민<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 산림자원학부, <sup>2</sup>고려대학교 환경생태공학부,

<sup>3</sup>경희대학교 생명과학대학, <sup>4</sup>순천대학교 산림자원학과, <sup>5</sup>성균관대학교 조경학과

(2005년 8월 15일 접수; 2005년 9월 8일 수락)

## Belowground Carbon Allocation of Natural *Quercus mongolica* Forests Estimated from Litterfall and Soil Respiration Measurements

Myong-Jong Yi<sup>1</sup>, Yowhan Son<sup>2</sup>, Hyun-O Jin<sup>3</sup>, In-Hyeop Park<sup>4</sup>,  
Dong-Yeop Kim<sup>5</sup>, Yong-Suk Kim<sup>1</sup> and Dong-Min Shin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Forest Resources, Kangwon National University, Chunchon, Korea

<sup>2</sup>Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

<sup>3</sup>College of Life and Biotechnology, Kyunhee University, Yongin, Korea

<sup>4</sup>Department of Foest Resources, Suncheon National University, Suncheon, Korea

<sup>5</sup>Department of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

(Received August 15, 2005; Accepted September 8, 2005)

### ABSTRACT

From published data of mature forests worldwide, Raich and Nadelhoffer suggested that total belowground carbon allocation (TBCA) could be estimated from the difference between annual rates of soil respiration and aboveground litterfall. Here we analyze new measurements of IRGA-based soil respiration and litterfall of natural mature oak forests dominated by *Quercus mongolica* in Korea. Rates of in situ soil respiration and aboveground litter production are highly and positively correlated. Our results disagree with the Raich and Nadelhoffer model for world forests. A regression analysis of the data from *Q. mongolica* forests produced the following relationship: annual soil respiration = 141 + 2.08 × annual litterfall. The least squares regression line has a more gentle slope (2.08) than the slope (2.92) described by Raich and Nadelhoffer for mature forests worldwide. The regression slope of our study indicates that, on average, soil respiration is about two times the aboveground litterfall-C, which further implies that TBCA is similar with annual aboveground litterfall-C at natural *Q. mongolica* forests in Korea. The non-zero Y-intercept (141) of the regression indicates that TBCA may be greater than litterfall-C where litterfall rate are relatively low. Over a gradient of litterfall-C ranging from 200-370 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>, TBCA increased from 350-530 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>.

**Key words** : Total belowground carbon allocation (TBCA), Litterfall, *Quercus mongolica*, Soil respiration

### I. 서 론

뿌리는 잎이 광합성을 하는데 필요한 무기양분과 물을 토양에서 흡수하는 식물체의 주요기관으로, 뿌리의

성장과 유지에는 많은 양의 탄소(C)가 이용된다. 그러나 수목에 있어서 뿌리에 대한 탄소분배량이나 세근의 생산량에 관한 측정은 그의 중요성에 비하여 적으며, 산림생태계에서 지상부와 지하부 간의 생산량관계에

대한 견해도 생육환경 조건에 따라 다르다.

약한 광환경에서는 식물이 수광면적을 넓히기 위해 광합성 산물을 잎의 성장에 우선 이용하므로 상대적으로 지하부가 적은 체제로 되며(Sims and Pearcy, 1994; Tani *et al.*, 2001), 양분이 부족한 토양환경에서는 무기양분 부족에 의한 광합성 활성의 저하를 막기 위해 잎의 성장보다 뿌리의 성장을 우선으로 한다(Kachi and Rorison, 1989). 건조토양 조건에서는 증산면적(잎면적)에 대한 흡수기관(뿌리)을 증가시킴으로써 잎의 수분부족을 회피한다(Khalil and Grace, 1992). 한편 지하부 : 지상부의 성장은 지하부 : 지상부의 현존량과 같다는 결과(Whittaker and Marks, 1975) 등, 지상부와 지하부간의 고정된 일반적 관계는 없다.

이와 같이 지상부와 지하부의 관계는 수목의 생육 및 환경과 관련하여 중요함에도 불구하고 뿌리와 근권 등의 프로세스를 양적화 하는 방법 상의 어려움 때문에 지하부 뿌리에 대한 탄소의 분배에 관한 연구는 많이 이뤄지지 않았다. 이와 관련하여 Raich and Nadelhoffer(1989)는 총 지하부 탄소분배량(TBCA, total belowground carbon allocation)을 추정하는 탄소수지법을 제안하였다.

본 연구에서는, 거의 안정상태에 있는 지구적 규모의 산림생태계에 있어서 총 지하부 탄소분배량은 토양호흡과 지상부 유기물의 차이와 같다는 Raich and Nadelhoffer(1989)의 방법을 우리나라의 신갈나무림에 적용하여 연간 토양호흡과 지상부 litterfall의 관계 및 TBCA와 지상부 litterfall의 관계를, Raich and Nadelhoffer(1989)의 결과와 비교하고 신갈나무림의 TBCA를 추정하였다.

## II. 방 법

### 2.1. 적용모델

열대림에서 한대림에 걸쳐 토양호흡과 지상부 litterfall을 측정된 기존의 자료를 사용하여 총 지하부 탄소 분배량(TBCA)을 계산한 다음과 같은 Raich and Nadelhoffer(1989)의 탄소수지법을 적용하였다.

#### 2.1.1. 토양 탄소수지

토양 유기물의 주요한 기원은 지상부에서 유입되는 유기 퇴적물과 지하부에서 유입되는 세균으로 이들 유

입량은 토양 유기물의 분해에 따른 CO<sub>2</sub>에 의해 균형을 이룬다. 이러한 토양 CO<sub>2</sub>의 방출은 산림토양에서 탄소가 소실되는 주요 경로이다. 토양을 중심으로 한 경우, 건성 강하물, 용탈, 표면유출 등에 의한 탄소원 수입과 지출량은 토양 CO<sub>2</sub>의 방출에 비해 적으므로 토양의 총 탄소수지에 미치는 영향이 상대적으로 작다(Edward and Harris, 1977; Schlesinger, 1977; Raich, 1983). 따라서 총 유기탄소 저장량이 거의 안정상태에 있는 토양의 경우 지상부와 지하부에서 유입되는 연간 유기 퇴적물은 토양 내 분해자의 연간 호흡량과 거의 같다.

$$Rh \approx Pa + Pb \quad (1)$$

위 관계에서  $Rh$ 는 종속 영양생물의 호흡(유기물의 분해),  $Pa$ 와  $Pb$ 는 각각 지상부 및 지하부의 유기 퇴적물 생산이며, 모두 탄소(C) 단위로 표현된다.

$Pb$ 는 토양 미생물에 의한 CO<sub>2</sub>와 뿌리에 의한 CO<sub>2</sub>가 혼합되어 있기 때문에 토양자체의  $Rh$ 의 측정은 매우 어렵다. 토양 내 종속영양생물과 독립영양생물(뿌리)의 호흡의 합이 토양호흡이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Rs = Rh + Rr \quad (2)$$

여기서  $Rs$ 는 토양호흡,  $Rr$ 는 뿌리호흡이며 식(1)과 (2)로부터 다음의 관계가 성립된다.

$$Rs - Pa \approx Pb + Rr \quad (3)$$

위 식으로부터 뿌리로 분배되는 연간 총 탄소량(TBCA)을 연간 토양호흡 속도( $Rs$ )와 지상부 유기퇴적물( $Pa$ )을 측정함으로써 추정할 수 있다.

### 2.2. 토양호흡과 litterfall 측정

토양호흡과 litterfall을 측정하기 위해 강원지역(강원도 춘천 강원대학교 연습림), 중부지역(경기도 광주 경희대학교 연습림), 남부지역(전라남도 백운산 서울대학교 연습림) 및 도시지역(서울 남산) 등 4개 지역에서 신갈나무가 우점하는 대표적인 참나무림을 선정하였다. 각 지역에 20 m × 40 m의 조사구를 강원지역과 남부지역에 각각 1개, 중부지방과 도시지역에는 각각 3개를 설정하였다(Fig. 1).

Litterfall은 각 조사지에 그물눈의 망사를 부착한 직경 1 m의 원형 트랩을 5개 지점에 지상에서 60 cm

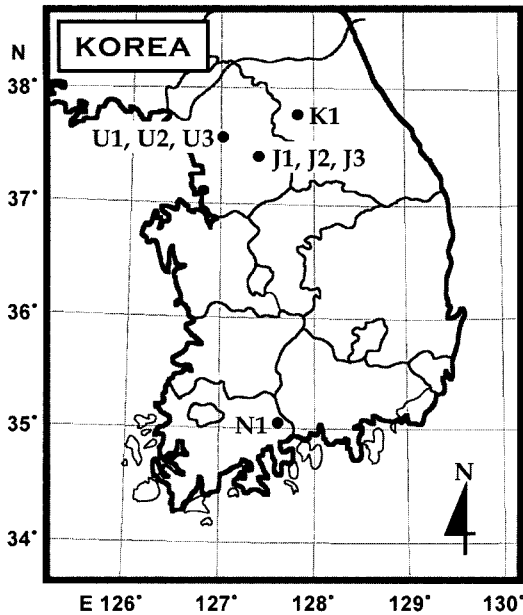


Fig. 1. Location of the study sites. See table 1 for the identification of symbols in the map.

높이로 설치하고 2년간(강원지역 2000. 10 - 2002. 9; 중부지역 2001. 10 - 2003. 9; 남부지역 2002. 4 - 2004. 3; 도시지역 2003. 4 - 2005. 3) 월별로 회수하였다. 회수한 litterfall은 60°C의 건조기에서 일정 무게에 달했을 때 건조중량을 측정하였다.

토양호흡과 깊이 10 cm의 토양온도를 토양호흡 챔버(SRC-1, 내경 100 mm)와 토양온도계를 장착한 적외선가스분석기(EGM-3, PP System, Inc., UK)를 사용하여 각 조사지에서 2년간 litterfall 측정기간과 동일하게 측정하였다. 각 조사구에서 월 1회 측정시 마다 임의의 10개 지점에서 측정하였다. 12월에서 3월까지의 동절기는 토양의 동결로 토양호흡의 측정이 불가능하였으므로 Son and Kim(1996) 및 Yi(2003)가 응용한 초봄이나 늦가을의 CO<sub>2</sub>발생량을 동절기의 방출량으로 취급하는 간접법(Ellert and Gregorich, 1995; Bowden *et al.*, 1993)을 적용하였다.

### 2.3. 연간 토양호흡량의 추정

각 조사구마다 측정한 2년 동안의 토양 CO<sub>2</sub> 발생량과 토양온도의 계절변화는 매우 비슷한 패턴을 보여 하절기에 높고 동절기에 낮은 경향을 나타냈다(Dulohery *et al.*, 1996; Son and Kim, 1996; Moon *et al.*, 2001; Lee and Mun, 2001; Yi, 2003). 토양 CO<sub>2</sub>

발생량과 토양온도와의 관계는 1차선형 회귀식(Fernandez *et al.*, 1993; Son *et al.*, 1994; Nakane, 1995)보다 지수함수를 이용한 회귀식(Son and Kim, 1996; Eric *et al.*, 1998; Lee and Mun, 2001; Moon *et al.*, 2001; Savage and Davidson, 2001; Yi, 2003)을 적용했을 때 설명력이 더욱 컸다. R<sup>2</sup>값의 범위는 0.82-0.90이었으며, Q<sub>10</sub>값은 3.28-6.22의 범위였다. 한편 토양온도와 측정 당시의 대기온도는 R<sup>2</sup>값이 0.86-0.96의 범위로 1차선형 회귀식이 잘 적합하였으므로, 이 관계로부터 연간 일별토양온도를 추정하고, 이 온도를 위의 토양온도와 CO<sub>2</sub>발생량의 회귀식에 적용하여 연간 토양호흡량을 추정하였다.

## III. 결 과

### 3.1. 지상부 litterfall과 토양호흡

연간 지상부 litterfall의 생산량(kg ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>)은 3143-5549의 범위로 평균 4285이었다. 우리나라 참나무림의 litterfall 생산량은 극단적으로 높은 상수리나무림의 10770 kg ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>(Chang and Kwon, 1987)을 제외하면 2480-8761 kg ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이며(Son *et al.*, 2004), 한편 온대 낙엽활엽수림은 2300-7100 kg ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>의 범위(Raich and Nadelhoffer, 1989), 본 연구의 신갈나무림의 연간 litterfall 생산량은 이들 범위 내에 있다. Litterfall 생산량은 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>으로 표현하였는데 litterfall량의 48%가 탄소라는 가정(Raich and Nadelhoffer, 1989) 하에 계산하였다(Table 1).

연간 토양호흡량은 23.64-35.68 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>의 범위이며 평균 28.06 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이었다. 본 연구의 연간 토양호흡량은 우리나라의 낙엽송의 23.7 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>(Son and Kim, 1996), 굴참나무림의 32.5-34.9 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>(Yi, 2003) 및 상수리나무림의 68.6 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>(Lee and Mun, 2001)과 비교할 때 이들 범위 내에 있다. 연 토양호흡은 litterfall과 마찬가지로 연간 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>로 표현하였다(Table 1).

이상의 토양호흡량(g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>)과 지상부 litterfall량(g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>)은 Fig. 2와 같이 높은 정(+)의 상관관계를 나타냈으며 1차선형 회귀식은 다음과 같다.

$$R_s = 141 + 2.08 \cdot P_a \quad (R^2=0.73, p<0.01) \quad (4)$$

이 관계는 우리나라 남부지역, 도시지역, 중부지역, 강원지역의 임령 31 - 52년 범위의 신갈나무 우점의

Table 1. Stand descriptions, annual rates of soil respiration and aboveground litterfall in natural oak stands.

Location	Forest type	Latitude	Altitude	Aspect	Stand age	Slope	Ave. height	Ave. DBH	Soil respiration (g C m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	Litterfall (g C m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	Plotting symbol
Kangwon	Kangwon, Chunchon	37° 46' 25"	570 m	NW	50yr	34.5°	26.8 m	26.9 cm	973.3	365.1	K
	Gyeonggi, Gwangju 1	37° 23' 01"	250 m	SW	34yr	18.3°	17.7 m	16.6 cm	676.4	274.3	J1
Jungbu	Gyeonggi, Gwangju 2	37° 28' 52"	180 m	SE	31yr	39.4°	18.7 m	12.1 cm	705.0	294.2	J2
	Gyeonggi, Gwangju 3	37° 28' 52"	180 m	SE	33yr	40.1°	18.3 m	13.7 cm	713.3	293.7	J3
Nambu	Jeonnam, Gwangyang	35° 04' 59"	600 m	SE	36yr	17.2°	12.7 m	9.0 cm	644.9	206.8	N
	Seoul, Namsan 1	37° 32' 53"	212 m	NE	46yr	19.3°	14.0 m	16.2 cm	804.4	298.0	U1
Urban	Seoul, Namsan 2	37° 32' 56"	172 m	NE	52yr	28.8°	14.3 m	13.4 cm	684.0	286.9	U2

임분에 대한 결과로 지구적 규모에서 뿐만 아니라 (Raich and Nadelhoffer, 1989; Davidson *et al.*, 2002; Nadelhoffer *et al.*, 1998) 지역적 규모에서도 토양 호흡이 지상부 litterfall량의 증가와 함께 높아지는 경향을 보였다. 토양에서의 CO<sub>2</sub> 발생은 litter의 분해와 뿌리에서 기원하는 유기물(Pa+Pb)의 분해 및 뿌리 호흡(Rr) (식1과 식2)에 의한 것이다. 지상부 200-370 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup> 범위의 litterfall-C의 가을기에서 토양 호흡-C는 약 600에서 900 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>으로 증가하였다.

#### IV. 고 찰

우리나라 천연 신갈나무림의 토양 호흡과 지상부 litter 생산량 사이에는 Fig. 2와 같이 높은 정(+)의 상관관계가 인정되었다. Fig. 2의 회귀식의 기울기 (2.08)은 지구적 규모에서의 기울기 2.92(Raich and Nadelhoffer, 1989)보다 완만하였다. 뿌리 고사량과 뿌리 호흡의 합(Pb+Rr)을 지하부 뿌리에 대한 총 탄소 분배량(TBCA)으로 볼 수 있으며(식3), litterfall-C과

TBCA의 관계를 보면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 회귀관계로 설명하지 못하는 측정자료들 간의 변이가 있는데, 이점에 대해 Raich and Nadelhoffer(1989)는 litterfall과 토양 호흡의 측정방법의 차이, litterfall과 토양 호흡의 연간 변이 및 지역간 변이 등을 원인으로 들고 있다. 본 연구에서는 동일한 토양 호흡 측정기와 동일한 규격의 littertrap을 사용하여 토양 호흡과 litterfall을 측정하였으므로 위의 원인 중 후자의 2가지 원인에 의한 것으로 생각된다.

그럼에도 불구하고 회귀의 신뢰한계 내에서는 총 지하부 탄소 분배량은 litterfall생산량의 증가에 따라 높아지는 경향을 보이고 있다. 토양 호흡과 litterfall 간의 차이로 추정된 총 지하부 탄소 분배량은 지상부 litterfall-C가 200에서 370 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>으로 증가함에 따라 350-530 g C m<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>로 증가하였다(Fig. 3).

본 연구에서 사용한 littertrap의 높이가 60 cm이므로 키가 낮은 하층 초본과 임상의 고사목(CWD, coarse woody debris)에 의한 지상부 유기물은 고려되지 않았다. 따라서 본 연구의 토양 호흡에 대한 뿌리의 기여량 추정은 과대 평가되었을 가능성이 있다 (Raich and Nadelhoffer, 1989; Gower *et al.*, 1996; Davidson *et al.*, 2002). 또한 수관 통과우나 수간류와 같은 임내우, 용탈, 표층토 유출 및 침식 등에 의한 탄소의 이동도 고려되지 않았다.

본 연구의 신갈나무림은 수관이 거의 울폐된 임분으로 하층식생의 종류와 양이 매우 낮았다. 또한 온대 참나무림에서 지상부 총 litterfall에 대한 초본류의 비율은 0.5-3.0%인 조사 예(Rochow, 1974; Gosz *et al.*, 1972; Whittaker and Woodwell, 1969)를 고려할 때, 초본에 의한 총 지하부 탄소 분배량의 과대 평가는 크지 않을 것으로 생각된다. 또한 임내우나 용탈, 침식 등에 의한 탄소의 이동은 본 연구의 신갈나무림과 같이 울폐된 산림에서는 크지 않을 것으로 생각된다(Edwards and Harris, 1977; Schlesinger, 1977; Raich, 1983; Jin *et al.*, 2005).

한편, 고사목은 온대 참나무림의 litter 생산량 중에서 5-20% 정도를 차지하지만(Nakane, 1975; Rochow, 1974; Gosz, 1972; Harris *et al.*, 1975), 50% 이상을 차지하는 경우도 있다(Harmon *et al.*, 1986; Vogt *et al.*, 1986). 본 연구의 고사목 litter는 전체 litterfall 생산량의 3% 이하로 그 양이 매우 낮을 뿐만 아니라, 고사목의 탄소는 분해과정에서 대부분이 CO<sub>2</sub>로 방출

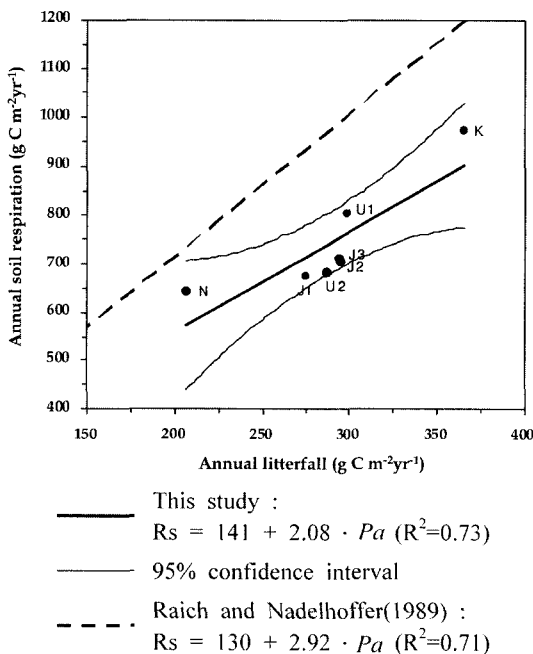


Fig. 2. Regression of annual soil respiration and annual aboveground litterfall-C for seven sites shown in Table 1. See Table 1 for identification of plotting symbols. The Raich and Nadelhoffer (1989) regression equation is also shown for comparison. Rs: soil respiration, Pa: aboveground litterfall

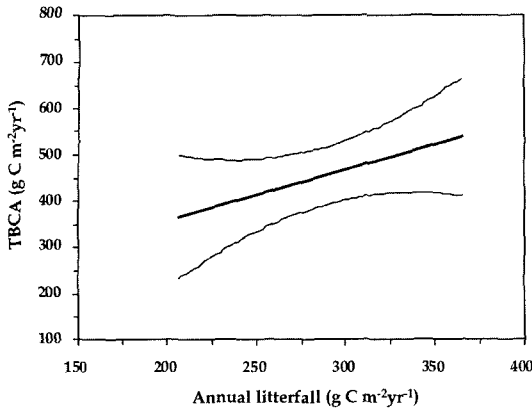


Fig. 3. Predicted rates of total belowground carbon allocation for seven sites, as related to aboveground litterfall. Belowground carbon allocation is calculated as the difference between soil respiration and litterfall, based on equation 3. The least-squares regression (solid line) is:  $TBCA = 141 + 1.08 \cdot Pa$  ( $R^2=0.43$ ). The thin solid lines (-) show the 95% confidence limits of the relationship.

되고 매우 적은 비율만이 토양에 유입된다(Raich and Nadelhoffer, 1989).

본 연구에서 litterfall중의 고사목은 적기 때문에 거의 fine litterfall로 간주할 수 있으며 토양호흡 측정 시 고사목에서 발생하는  $CO_2$ 는 포함되지 않았다. 따라서 litterfall 측정과 토양호흡의 측정은 거의 유사한 편의를 갖고 있다. 이러한 점에서 토양 탄소 이동에 미치는 크기는 Fig. 3와 같은 일반적인 경향에 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

그러나 본 연구의 신갈나무림의 총 지하부 탄소 분배량은 밝혀지 못한 탄소량에 의해 높게 평가되고 있다. 초본이나 소형 관목의 유기물과 수관 통과우, 수간류, 용탈, 침식 등에 의한 탄소의 흡이 어느 정도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

위와 같은 한계에도 불구하고 litterfall이 증가함에 따라 총 지하부 탄소 분배량도 증가하는 경향을 보였으며(Fig. 3), 회귀식은  $TBCA=141+1.08 \cdot Pa$ 로 Raich and Nadelhoffer(1989)의  $TBCA=130+1.92 \cdot Pa$ 보다 기울기가 완만했으며 y절편 값은 비슷하였다.

Raich and Nadelhoffer(1989)는 이와 같은 결과가 위도의 증가에 따라 토양호흡과 litterfall 생산량이 증가하는 Schlesinger(1977)의 연구 예와 일치한다는 견해 하에 산림생태계의 지상부 litterfall 생산과 지하부 탄소 분배는 밀접한 관계가 있다고 하였다. Litterfall 생산량과 총 지하부 탄소 분배량이 함께 증가하더라도

지하부 탄소 분배에 대한 지상부의 비율이 litterfall의 기울기를 따라 변하는지는 불확실하다. 따라서 litterfall의 증가에 따라 지하부 분배량 : litterfall 생산량의 비가 변하지 않는다는 일반적인 가정에 대한 검토가 필요하다(Raich and Nadelhoffer, 1989).

## V. 결 론

Raich and Nadelhoffer(1989)가 제안한 탄소수지법, 즉 토양 유기물, 뿌리와 litter의 자원이 거의 안정 상태(steady state)로 가정한 상태계에서 토양호흡과 litterfall-C 간의 차이로 TBCA를 추정하는 방법을 우리나라 신갈나무림에 적용하여 검토하였다.

신갈나무림의 토양호흡과 지상부 litterfall 사이에는 높은 정(+)의 상관관계가 인정되었으며, 회귀관계는 연간 토양호흡량 =  $2.08 \cdot$  연간 litterfall 생산량 + 141로 지구적 규모의 Raich and Nadelhoffer의 모델에서의 회귀식과는 차이가 있었다. 신갈나무림의 회귀식의 기울기(2.08)는 Raich and Nadelhoffer 모델에서의 기울기 2.92보다 완만하였다. 이 식의 기울기로부터 토양호흡의 증가량은 지상부 litterfall-C의 2배임을 알 수 있었으며 총 지하부 탄소 분배량은 지상부 litterfall-C와 거의 같은 정도로 증가하는 것으로 추정되었다. y절편 값(141)은 litterfall이 매우 적은 임분에서는 TBCA가 litterfall-C보다 많을 수 있음을 나타냈다. 지상부 litterfall 생산량이  $200-370 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 증가함에 따라 토양호흡량은  $580-900 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 증가하였다. 한편 토양호흡과 litterfall 간의 차이로 추정된 TBCA는 지상부 litterfall 생산량이  $200-370 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 증가함에 따라  $350-530 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 증가하는 경향을 나타냈다.

본 연구의 조사지는 임관이 울폐된 임분으로서 하층 식생(특히 초본이나 소관목)이나 고사목의 전체 litterfall에 차지하는 비율이 낮아서 이들을 기원으로 하는 탄소의 기여도 또한 크지 않았을 것으로 생각되지만 연구 대상인 신갈나무림의 총 지하부 탄소 분배량은 밝혀지 못한 탄소량에 의해 과대 평가되어 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다. Litterfall의 증가에 따라 총 지하부 탄소 분배량도 증가하였는데 이때 litterfall의 증가에 따른 지하부 분배량 : litterfall 생산량 비의 변화 여부도 검토할 필요가 있다. 한편 본 연구에서 적용한 Raich and Nadelhoffer(1989)의 모

델은 거의 안정 상태의 산림생태계를 가정하고 있으므로 이에 대한 검토와 더불어 기존의 연구 결과들을 추가하여 TBCA를 검토함으로써 지역적 규모에서의 유용성 여부를 보다 면밀하게 검토할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 “특정기초연구(과제번호: R01-2000-000-00206-0)”의 지원에 의해 수행되었다.

## 인용문헌

- Bowden, K. D., K. J. Nadelhoffer, R. D. Boone, J. M. Melillo, and J. B. Garrison, 1993: Contributions of aboveground litter, belowground litter and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research* **23**, 1402-1407.
- Chang, N. K. and H. C. Kwon, 1987: A study on the production and decomposition of litters related to altitude. *Korean Journal of Ecology* **10**, 109-118.
- Davidson, E. A., K. Savage, P. Bolstad, D. A. Clark, P. S. Curtis, D. S. Ellsworth, P. J. Hanson, B. E. Law, Y. Luo, K. S. Pregitzer, J. C. Randolph, and D. Zak, 2002: Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**, 39-51.
- Dulohery, C. J., L. A. Morris and R. Lawrance, 1996: Assessing forest soil disturbance through biogenic gas fluxes. *Soil Science Society of American Journal* **60**, 291-298.
- Edwards, N. T. and W. F. Harris, 1977: Carbon cycling in a mixed deciduous forest floor. *Ecology* **58**, 431-437.
- Ellert, B. H. and E. G. Gregorich, 1995: Carbon forms and functions in forest soil. *Soil Science Society of America*. 119-138pp.
- Eric, A. D., E. Belk and R. D. Boone, 1998: Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology* **4**(2), 217-227.
- Fernandez, I. J., Y. Son, C. R. Kraske, L. E. Rustad and M. B. David, 1993: Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Science Society of American Journal* **57**, 1115-1121.
- Gosz, J. R., G. E. Likens and F. H. Bormann, 1972: Nutrient content of litter fall on the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Ecology* **53**, 769-784.
- Gower, S.T., S. Pongracic, and J. J. Landsberg, 1996: A global trend in belowground carbon allocation: Can we use the relationship at smaller scales?. *Ecology* **77**(6), 1750-1755.
- Harmon, M. E., J. F. Franklin, F. J. Swanson, P. Sollins, S. V. Gregory, J. D. Lattin, N. H. Anderson, S. P. Cline, N. G. Aumen, J. R. Sedell, G. W. Lienkaemper, K. Cromack, Jr., and K. W. Cummins, 1986: Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* **15**, 133-302.
- Harris, W. F., P. Sollins, N. T. Edwards, B. E. Dinger, and H. H. Shugart, 1975: *Productivity of World Ecosystems* (2nd ed). National Academy of Science. Washington, D.C., USA., 116-122pp.
- Jin, H. O., Y. Son, M. J. Yi, I. H. Park, and D. Y. Kim, 2005: Nutrient dynamics through water transports natural deciduous forests in Gyeonggi Province. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(2), 164-170.
- Kachi, N. and I. H. Rorison, 1989: Optimal partitioning between root and shoot in plants with contrasted growth rates in response to nitrogen availability and temperature. *Functional Ecology* **3**, 549-559.
- Khalil, A. A. M. and J. Grace, 1992: Acclimation to drought in *Acer pseudoplatanus* L. (sycamore) seedling. *Journal of Experimental Botany* **3**, 1591-1602.
- Lee, Y. Y. and H. T. Mun, 2001: A study on the soil respiration in a *Quercus acutissima* forest. *Korean Journal of Ecology* **24**(3), 141-147.
- Moon, H. S., S. Y. Jung and S. C. Hong, 2001: Rate of soil respiration at black locust (*Robinia pseudoacacia*) stands in Jinju area. *Korean Journal of Ecology* **24**(6), 371-376.
- Nakane, K., 1975: Dynamics of soil organic matter in different parts on a slope under evergreen oak forest. *Japanese Journal of Ecology* **25**, 206-216.
- Nakane, K., 1995: Soil carbon cycling in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*)plantation. *Forest Ecology and Management* **72**, 185-197.
- Nadelhoffer, K. J., J. W. Raich and J. D. Aber, 1998: A global trend in belowground carbon allocation: comment. *Ecology* **79**, 1822-1825.
- Raich, J. W. and K. J. Nadelhoffer, 1989: Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology* **70**(5), 1346-1354.
- Raich, J. W., 1983: Effects of forest conversion on the carbon budget of a tropical soil. *Biotropica* **15**, 177-184.
- Rochow, J. J., 1974: Estimates of above-ground biomass and primary productivity in a Missouri forest. *Ecology* **62**, 567-577.
- Savage, K. E. and E. A. Davidson, 2001: Interannual variation of soil respiration in two New England forest. *Global Biogeochemical Cycles* **15**(2), 337-350.
- Schlesinger, W. H., 1977: Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics* **8**, 51-81.
- Sims, D. A. and R. W. Pearcy, 1994: Scaling sun and shade photosynthetic acclimation of *Alocasia macrorrhiza* to whole-plant performance-I. Carbon balance and allocation at

- different daily photon flux densities. *Plant, Cell and Environment* **17**, 881-887.
- Son, Y., H. and W. Kim, 1996: Soil respiration in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantation. *Journal of Korean Forest Society* **85**(3), 496-450.
- Son, Y., G. Lee and J. Y. Hong, 1994: Soil carbon dioxide evolution in three deciduous tree plantation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **27**(4), 290-295.
- Son, Y., I. H. Park, H. O. Jin, M. J. Yi, D. Y. Kim, R. H. Kim, and J. O. Hwang, 2004: *Biomass and nutrient cycling of natural oak forest in Korea*. Ecological Issues in a Changing World-Status, Responses and Strategy-, S. K. Hong et al. (Eds), Kluwer Academic Publishers, 217-232pp.
- Tani T., H. Kudoh, and N. Kachi, 2001: Responses of photosynthesis and biomass allocation of an understorey herb, *Pteridophyllum racemosum*, to gradual increase in irradiance. *Annals of Botany* **88**, 393-402.
- Vogt, K. A., C. C. Grier, and D. J. Vogt, 1986: Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research* **15**, 303-377.
- Whittaker, R. H., and G. M. Woodwell, 1969: Structure, production and diversity of the oak-pine forest at Brookhaven, New York. *Journal of Ecology* **57**, 155-174.
- Whittaker, R. H., and P. L. Marks, 1975: *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, New York, USA., 55-118pp.
- Yi, M. J., 2003: Soil CO<sub>2</sub> evolution in *Quercus variabilis* and *Q. mongolica* forests in Chunchon, Kangwon Province. *Journal of Korean Forest Society* **92**(3), 263-269.