

충주지역 굴참나무림의 세근에 의한 탄소축적^{1a}

박관수² · 임재구²

Annual Carbon Storage by Fine Root Production in *Quercus variabilis* Forests^{1a}

Gwan-Soo Park², Jae-Goo Lim²

요 약

충청북도 충주지역에서 생육하는 굴참나무림에서 세근에 의한 지하부에서의 연간 탄소축적량을 조사하기 위하여 2001년 4월부터 11월까지 매달 토양샘플러를 사용하여 0-30cm, 30-60cm, 그리고 60-90cm 토양 깊이에서 샘플을 채취하였다. 세근에 의한 탄소생체량(fine root carbon biomass)은 다른 두 개의 조사 토양깊이에서 보다 0-30cm 토양깊이에서 가장 많은 것으로 나타났다. 세근에 의한 순탄소생산량 (kg/ha/yr)은 0-30cm에서 671kg, 30-60cm에서 599kg, 그리고 60-90cm 토양깊이에서 479kg로 나타났으며, 0-90cm 토양깊이에서 세근에 의한 총 순탄소생산량은 1749kg 이었다. 세근고사율은 0-30cm에서 0.43, 30-60cm에서 0.96, 그리고 60-90cm에서 1.03로 나타났다. 세근고사율에 의한 토양으로의 연간 양분투입량은 N의 경우 33.9kg/ha/yr, P의 경우 1.8kg, K의 경우 11.4kg, 그리고 Ca의 경우 20.1kg으로 나타났다.

주요어 : 순생산량, 세근고사율

ABSTRACT

This study was carried out to estimate net fine root carbon production in *Quercus variabilis* natural stands in Chungju area. Soil samples were taken in 0-30cm, 30-60cm, and 60-90cm soil depths from April to November using soil sampler. Fine root carbon biomass was higher in 0-30 cm soil depth than the other soil depths. Net fine root carbon production (kg/ha/yr) were 671kg in 0-30cm soil depth, 599kg in 30-60cm soil depth, and 479kg in 60-90cm soil depth, and 1749kg in 0-90cm soil depth. Fine root turnover rates were 0.43 in 0-30cm soil depth, 0.96 in 30-60cm soil depth, and 1.03 in 60-90cm soil depth. N, P, K, and Mg input into the soil (kg/ha/yr) due to fine root turnover at 0-90cm soil depth in this study were 33.9kg, 1.8kg, 11.4kg and 20.1kg, respectively.

KEY WORDS : NET FINE ROOT PRODUCTION, NET FINE ROOT TURNOVER RATE

1 접수 10월 6일 Received on Oct. 6, 2003

2 충남대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Chungnam National Univ., Daejeon(305-764), Korea

a 이 논문은 2001년도 한국과학재단 지역대학우수과학자 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

서론

대기 중 이산화탄소 함량 증가와 지구온난화는 현재 전 세계의 가장 중요한 환경 문제이며 반드시 해결해야 할 난제임이 분명하다. 1997년 일본 교토에서 열린 기후변화 협약에 의해 2010년에 선진국들은 이산화탄소 배출량을 1990년 수준으로 감축하기로 협약하였다. 그러나, 이산화탄소 방출이 가장 많은 미국의 협약 이행여부가 불투명한 가운데, 우리나라도 OECD 가입으로 인해 2010년에 기후변화 협약에 추가로 참가하게 될 가능성이 매우 높으며, 만약 참여하게 된다면 많은 경제적 손실이 야기될 것으로 환경 경제학자들은 예측하고 있다.

산림생태계는 대기 중 이산화탄소의 함량 억제를 위한 어떠한 시도에서도 유용한 매개체로서 큰 역할을 할 것으로 기대되기 때문에 그 중요성은 더욱 커지고 있다. 현재 선진국들은 산림생태계에서의 탄소축적량 평가 등의 연구를 통해 기후변화협약 이행 시 산림생태계에서 흡수하는 탄소량을 협약에 포함시켜 자국의 이익을 최대한으로 하기 위한 여러 가지 시도를 하고 있다(Tans 등, 1990; Dixon 등, 1994; Vitousek 등, 1991). 우리나라는 총 국토면적의 65% 이상을 산림이 차지하고 있어 국토면적에 비례하여 큰 탄소축적지를 가지고 있기 때문에 그 잠재성은 매우 크다 하겠다.

우리나라의 경우 산림생태계내 탄소축적 및 방출과 관련된 연구는 정진현, 김춘식, 이원규(1998) 그리고 박관수(1999) 등으로 매우 빈약한 실정에 있다. 특히, 지상부와 함께 산림생태계 탄소순환의 많은 부분을 차지하고 있는 세근에 의한 탄소순환에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고 샘플링 등의 어려움 때문에 국내뿐만 아니라 외국에서도 매우 미미한 실정이다.

본 연구는 충청북도 충주지역에서 생육하고 있는 굴참나무 천연림을 대상으로 세근의 생산량 파악을 위해 사용되는 방법 중 가장 일반적인 방법인 월별샘플링방법(monthly increment method) (Fairly and Alexander, 1985)을 사용하여 세근에 의한 지하부에서의 연간 탄소축적량을 파악하여 산림생태계내 탄소순환 동태의 이해를 돕기 위해 실시되었다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구는 충청북도 충주시 산척면 명서리에 위치하고 있는 굴참나무 천연림을 대상으로 2001년 4월부터

터 시작되었다. 본 조사지의 기상조건은 연 평균기온 11.4 °C, 최고평균기온 17.7 °C, 최저 평균기온 6.3 °C이며 연평균강수량은 1261mm로 연중 6-8월에 집중하고 있다. 본 연구의 굴참나무 천연림은 해발고도 300-660m에 분포하며 주로 남동-남서 사면에 분포하고 있다. 평균임령은 40년으로 조사되었고, 흉고직경은 최대 34cm에 이르며, 평균수고는 13.5m, 임목본수는 ha당 835본으로 조사되었다. 본 연구지내 서식하고 있는 주요식생은 신갈나무, 졸참나무, 소나무, 당단풍, 싸리, 산초나무, 산딸나무 등이 분포하고 있었다. 본 연구지의 토양특성을 분석한 결과 0-10cm 토양깊이에서 유기물함량은 8.0%, 질소함량은 0.29%, 치환성 K는 0.32me/100g, 토양 pH는 5.03, 그리고 양이온치환용량은 18.4me/100g으로 나타났다.

2. 표본채취 및 분석방법

2001년 4월 본 연구지의 굴참나무 임분에 총 8개의 10m × 20m 시험구를 설치한 후, 각 시험구에서 매달 (4월-11월: 총 8회) 토양샘플러(직경 7.4cm × 길이 30cm)를 사용하여 0-30cm, 30-60cm, 그리고 60-90cm 토양깊이에서 토양샘플을 채취하였다. 각 시험구에서 샘플지점은 격자방법을 이용하여 random으로 선택되었다.

매달 샘플링 후 토양샘플들은 즉시 비닐에 담아 실험실로 운반한 후 분류 작업 전까지 냉장고에 보관하였다. 샘플링한 토양들은 물과 토양체를 사용하여 흙과 뿌리를 분리한 후, 2mm이하의 세근을 분리하였으며(다양한 해석이 있으나 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 2mm 이하의 뿌리를 세근으로 사용하였음), 뿌리의 질감과 색깔 등을 고려하여 죽은뿌리와 산뿌리를 구분하였다(Burke and Raynal, 1994; Hwang Jae-Hong, 1997; Persson, 1983). 세근 생산에 의한 연간 생산량을 산출하기 위해 분류된 세근은 오븐에서 약 70 °C로 향량에 도달할 때까지 건조하였다. 연간 세근 생산량은 kg/ha로 계산되며, 총 8번의 샘플링을 통해 얻은 데이터는 월별 생체량(fine root carbon biomass) 산출을 위해 사용하고, 순생산량(fine root carbon production)은 Fairly와 Alexander (1985)가 제시한 decision matrix를 이용하여 계산하였다(Table 1).

본 연구의 세근에 의한 뿌리고사율(%/yr)은 연간 세근생산량과 평균 세근생체량의 비율(the ratio between annual root production and average root biomass) (Frissel, 1981; Burke and Raynal, 1994)로 산출하였다. 세근의 탄소함량은 loss on ignition 방법을 사용하여 분석하였다(Bickelhaupt and White,

Table 1. Equations used for estimating fine root production(Fairley and Alexander, 1985)

Δ Live root biomass	Δ Dead root biomass	Production equation
Increase	Increase	$P = \Delta B_{live} + \Delta B_{dead}$
Decrease	Increase	If $\Delta B_{dead} > \Delta B_{live}$ $P = \Delta B_{live} + \Delta B_{dead}$
		If $\Delta B_{live} > \Delta B_{dead}$ $P = 0$
Increase	Decrease	$P = \Delta B_{live}$
Decrease	Decrease	$P = 0$

1982). 세근내 양분함량은 샘플 후 수집된 양이 분석을 위해 충분치 않기 때문에 각 조사 월에서 샘플들을 합하여 2개의 샘플을 만든 후, 세근내 질소함량은 켈달법으로 그리고 P, K, Ca 함량은 ICP로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. Fine root carbon biomass and production

본 연구지에서 세근에 의한 탄소생체량은 세근이 가장 많이 분포하고 있는 것으로 알려져 있는 0-30cm 토양깊이에서 가장 높게 나타났다(Table 2) (Burke and Raynal, 1994; Ruess *et al.*, 1996). 비록 조사 토양깊이가 다르지만 Hwang Jae-Hong(1997)의 리기다 소나무림의 0-20cm 토양깊이에서의 1322kg/ha 보다는 본 연구지에서 좀 더 높게 나타났다. 또한, Burke와 Raynal(1994)의 0-28cm 토양 깊이의 미국 북동부 활엽수림에서의 1.15ton/ha 보다도 높게 나타났다. Ruess 등(1996)은 알라스카의 white spruce 림에서 본 연구방법과 동일한 soil coring 방법을 사용한 결과 세근에 의한 탄소생체량이 17ton이라고 보고하여, 본 연구와 다른 연구들보다 매우 높은 생체량을

보였다.

본 연구의 세근에 의한 탄소생체량의 경우 0-30cm 토양깊이에서 봄철에(5월) 최고치를 보였으며, 이 결과는 Burke와 Raynal(1994)의 미국 북동부 지역의 활엽수림에서의 결과와 일치한다(Table 2). 또한, McClaugherty 등(1982)도 4월과 5월에 세근의 생체량이 가장 많았다고 보고하고 있다. 세근의 탄소함량은 건중량의 46%로 분석되었다. 세근의 생체량 데이터의 변이는 큰 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 변이가 큰 것으로 나타났으며, 60-90cm의 토양깊이에서는 평균값과 비슷한 표준오차도 나타났다(Table 2).

세근에 의한 순탄소생산량(kg/ha/yr)은 0-30cm에서 671kg, 30-60cm에서 599kg, 그리고 60-90cm에서 479kg으로 0-30cm 토양깊이에서 가장 많은 것으로 나타났다(Table 3). 본 연구의 0-30cm 토양깊이에서의 671kg은 Hwang Jae-Hong(1997)의 리기다소나무림 0-20cm에서의 순탄소생산량 1192kg 보다 훨씬 적게 나타났으며, 또한 Burke와 Raynal(1994)의 미국 북동부 활엽수림의 0-28cm 토양 깊이에서의 순생산량 1100kg/ha 보다 적게 나타났다. Ruess 등(1996)은 알라스카의 white spruce 림에서 742kg, balsam poplar 림에서 2017kg이라고 보고하고 있다. Hwang Jae-Hong(1997)은 낙엽송과 리기다소나무림

Table 2. Fine root carbon biomass(kg/ha) in *Quercus variabilis* forests in Chungju area at 0-30cm, 30-60cm, and 60-90cm soil depths. The number in parentheses is one standard error of the mean (n=8)

Soil depth	13 Apr.	4 May.	9 Jun.	18 Jul.	20 Aug.	22 Sep.	27 Oct.	24 Nov.	Mean
0-30cm	1552 (215)	1770 (355)	1670 (280)	1460 (177)	1572 (342)	1424 (1552)	1673 (317)	1480 (325)	1576
30-60cm	588 (340)	609 (358)	794 (514)	538 (380)	629 (197)	795 (636)	480 (201)	543 (263)	622
60-90cm	305 (110)	373 (253)	634 (417)	563 (488)	569 (428)	488 (460)	326 (175)	456 (325)	464
0-90cm									2662

의 0-20cm 토양깊이에서 세근의 순생산량은 봄철(4-5월)과 여름(7-8월)과 가을(9-10월)에 많이 나타났다고 보고하여 본 연구에서의 0-30cm 토양깊이에서와 유사한 결과를 보였다(Table 3).

본 연구의 0-90cm에서의 총 탄소생산량은 1749kg으로 나타났(Table 3). 박관수와 이승우(2001)는 공주, 포항, 그리고 양양지역의 굴참나무림에서의 잎의 순탄소량은 1100kg, 1200kg, 그리고 1000kg이라고 보고하였다. 탄소순환에 대한 세근의 중요성은 선행연구에서(Hansen, 1992; Cooper, 1983; Burke와 Raynal, 1994) 강조된 것처럼 본 연구에서도 세근에 의한 순탄소고정량은 지상부 총 순생산량의 많은 부분을 차지하는 외에 의한 순탄소고정량 보다 많게 나타나서 산림생태계에서의 세근에 의한 탄소순환은 매우 중요한 것으로 사료된다.

Table 4는 본 연구의 세근고사율(the ratio between annual root production and average root biomass)을 나타낸다. 일반적으로 세근고사율은 양분조건이 나쁜 입지에서 낮은 것으로 보고된다(Chabot and Hicks, 1982; Mooney and Gulman, 1982). 그러나, 본 연구에서 세근고사율은 양분조건이 나쁜 것으로 사료되는 60-90cm 토양깊이에서 가장 높은 세근고사율을 보였다. 본 연구에서의 세근고사율은 Vogt와 Bloomfield(1991) 그리고 Hwang Jae-Hong(1997)이 보고한 고사율의 범위에 속하고 있으며, 토양의 양분조건 보다는 Shaver와 Billings(1975), Hwang Jae-Hong(1997) 그리고 Ruess 등(1996)의 보고처럼 수종과 입지조건에 따라서 다양한 세근고사율을 보인다는 결과와 일치하는 것으로 사료된다(Table 4).

2. 세근의 N, P, K, 그리고 Ca 함량

Table 5는 세근의 N, P, K, 그리고 Ca 함량을 나타낸다(0-30cm 토양깊이). 4월부터 11월까지의 샘플링 기간동안의 세근내 양분들의 평균값은 N의 경우 0.89%, P의 경우 0.048%, K의 경우 0.3%, 그리고

Table 4. Fine root turnover rate (%/yr) in *Quercus variabilis* forests in Chungju area at 0-30cm, 30-60cm, and 60-90cm soil depths

Soil depth	<i>Quercus variabilis</i>
0-30cm	0.43
30-60cm	0.96
60-90cm	1.03

Ca의 경우 0.53%로 나타났다. 본 결과는 Hwang Jae-Hong(1997)이 보고한 리기다소나무림에서의 N의 평균값 0.81%와 유사하며, P의 경우 본 연구에서 약간 높게 나타났다. 또한, Burke와 Raynal (1994)이 보고한 미국북동부 지역의 활엽수림에서의 세근내 양료들의 값과 유사하게 나타났다. 계절별 경향을 보면 N과 P의 경우 주로 이른 봄철(4월과 5월)에 함량이 높았고, 여름과 초가을(7, 8, 그리고 9월)에는 함량이 낮은 것으로 나타났다. 그러나 K와 Ca의 경우 일정한 경향을 보이지 않았다(Table 5).

Table 6은 세근의 고사(fine root turnover)에 의한 토양으로의 양분들의 연간 투입 양을 나타낸다. Hwang Jae-Hong(1997)은 세근에 의한 연간 질소와 인산의 토양으로의 유입량을 리기다소나무림의 경우 20.9kg과 0.93kg, 그리고 낙엽송림의 경우 48.6kg과 2.76kg으로 본 연구에서 보다 높게 나타났다고 보고하고 있다. 토양으로의 유입량이 세근에서의 양분 함량과 세근에 의한 순생산량에 의해 결정되기 때문에 수종 간 그리고 지역 간 등의 차이에 의한 양분함량의 차이와 특히 순생산력(NPP)의 차이에 따라 유입량이 크게 결정되어 조사 대상 수종과 지역차이 같은 인자에 따라 그 유입량은 큰 차이를 보일 것으로 사료된다. Joslin과 Henderson(1987)은 White Oak 임분에서 세근에 의한 토양으로의 양분 유입량을 측정했는데, N의 경우 14.6kg, P의 경우 0.7kg, K의 경우 4.1kg, 그리고 Ca의 경우 10.3kg으로 본 연구의 0-30cm 토양깊이에서의 결과와 매우 유사하게 나타났다(Table 6).

Table 3. Fine root carbon production(kg/ha/yr) in *Quercus variabilis* forests in Chungju area at 0-30cm, 30-60cm, and 60-90cm soil depths

Soil depth	13Apr. ~4May.	4May. ~9Jun.	9Jun. ~18Jul.	18Jul. ~20Aug.	20Aug. ~22Sep.	22Sep. ~27Oct.	27Oct. ~24Nov.	Total
0-30cm	236	0	17	170	0	248	0	671
30-60cm	28	185	0	91	201	0	94	599
60-90cm	68	261	0	0	0	0	150	479
0-90cm								1749

Table 5. Nutrient concentrations of fine root in *Quercus variabilis* forests in Chungju area at 0-30cm soil depths. Values are expressed as percent by weight (mean \pm standard error of the mean, expressed as per cent by weight: n=2)

Nutrients	13Apr.	4May.	9Jun.	18Jul.	20Aug.	22Sep.	27Oct.	24Nov.	Mean
N	0.18 (0.05)	1.05 (0.08)	0.86 (0.07)	0.08 (0.01)	0.80 (0.06)	0.74 (0.05)	0.93 (0.01)	0.88 (0.05)	0.89
P	0.06 (0.004)	0.05 (0.002)	0.05 (0.001)	0.046 (0.001)	0.044 (0.001)	0.039 (0.001)	0.049 (0.001)	0.046 (0.003)	0.048
K	0.33 (0.007)	0.28 (0.014)	0.29 (0.007)	0.29 (0.014)	0.29 (0.007)	0.28 (0.014)	0.33 (0.014)	0.315 (0.007)	0.30
Ca	0.530 (0.014)	0.480 (0.021)	0.535 (0.021)	0.585 (0.021)	0.580 (0.001)	0.545 (0.035)	0.555 (0.021)	0.465 (0.021)	0.53

Table 6. N, P, K and Ca input into the soil (kg/ha/ yr) due to fine root turnover in *Quercus variabilis* forests in Chungju area at 0-30cm, 30-60cm, and 60-90cm soil depths

Soil depth	N	P	K	Ca
0 ~ 30cm	13.0	0.7	4.4	7.7
30 ~ 60cm	11.6	0.6	3.9	6.9
60 ~ 90cm	9.3	0.5	3.1	5.5
0 ~ 90cm	33.9	1.8	11.4	20.1

Cole과 Rapp (1981)은 온대지방 활엽수림(14 sites)에서 litterfall에 의한 양분들의 토양으로의 평균 투입량(kg/ha/yr)은 N의 경우 61.4, P의 경우 4.0, K의 경우 41.6, 그리고 Ca의 경우 67.7로 보고하고 있다. 본 연구지의 세근에 의한 양분 투입량은 위의 선행연구 보다 약 1/2 - 1/3정도의 양이지만, 토양으로의 양분유입이 지상부에서는 주로 낙엽에 의해 이루어지고, 지하부에서는 세근과 풍화(weathering)에 의해 이루어지기 때문에 양료순환에 대한 세근의 기여도는 큰 것으로 사료된다.

인용문헌

- 박관수(1999) 충주지역의 신갈나무와 굴참나무 천연림 생태계의 탄소고정에 관한 연구. 한국임학회지 88(1): 93-100.
- 박관수, 이승우(2001) 공주, 포항, 그리고 양양 지역 굴참나무 천연림 생태계의 물질생산에 관한 연구. 한국임학회지 90(6): 692-698.

- 정진현, 김춘식, 이원규(1998) 지역별, 임분별 산림토양 내 탄소량 추정. 산림과학논문집 57: 178-183.
- Bickelhaupt, D.H. and E.H. White(1982) Laboratory manual for soil and plant tissue analysis. SUNY Coll. Envi. Sci. and For., Syracuse, N.Y. 67pp.
- Burke, M.K. and D.J. Raynal(1994) Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. Plant and Soil. 162: 135-146.
- Cole, D.W. and M. Rapp(1981) Elemental cycling in forest ecosystems. p 341-409. In D. E. Reichle (ed.) Dynamic properties of forest ecosystems. Cambridge Univ. Press, England.
- Cooper, Charles F.(1983) Carbon storage in managed forests. Can. J. For. Res. 13: 155-166.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler and J. Wisniewski(1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science. 263: 185-190.
- Fairly, R.I. and I.J. Alexander(1985) Methods of calculating fine root production in forests. In: Ecological interactions in the soil. special publication no.4 of the British Ecol. Soc. pp. 37-41. London.
- Frissel, M. J.(1981) The definition of residence time in ecological models. In Clark, F. E. and T. Roswell (eds.) Terrestrial nitrogen cycles. Ecol. Bull. 33: 117-122. Stockholm.
- Hansen, E. A(1992) Soil carbon sequestration beneath hybrid poplar plantations. Nor. Cen. For. Expe. Sta. USDA For. Serv. For. Sci. Lab. Grand Rapids, MN., 55744: 13p.

- Hwang, Jae-Hong(1997) Effects of fertilization on fine root dynamics in pitch pine and Japanese Larch Plantations. Master Thesis, Korea University.
- Joslin, J.D. and G.S. Henderson(1987) Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand. *For. Sci.* 33: 330-346.
- McLaugherty, C.A., J.D. Aberand J.M. Melillo(1982) Decomposition dynamics of fine roots in forested ecosystems. *Oikos*. 42: 378-386.
- Persson, Hans A(1983) The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and soil*. 71: 87-101.
- Ruess, R.W., K. Van Cleve, J. Yarie, and L.A. Viereck(1996) Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. *Can. J. For. Res.* 26: 1326-1336.
- Shaver, G.R. and W.D. Billings(1975) Root production and root turnover in a wet tundra ecosystem, Barrow, Alaska. *Ecology* 56: 401-409.
- Tans, P.P., I.Y. Fung and T. Takahashi(1990). Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*. 247: 1431-1438.
- Vitousek, P.M.(1991) Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon dioxide? *J. Environ. Qual.* 20: 348-354.
- Vogt, K.A. and J. Bloomfield(1991) tree root turnover and senescence. In *plant roots, the hidden half* edited by Waisel, Y.A. Eschel and U. Kafkafi. pp. 287-306. marcel Dekker Inc, New York.