

연륜연대학적 접근을 이용한 Yasso 모델의 산림토양탄소 저장량 추정

이아름¹ · 노남진² · 윤태경² · 이수경² · 서경원² · 이우균^{1,2} · 조용성¹ · 손요환^{1,2*}

¹고려대학교 기후환경학과, ²고려대학교 환경생태공학과

Estimation of Forest Soil Carbon Stocks with Yasso using a Dendrochronological Approach

Ah Reum Lee¹, Nam Jin Noh², Tae Kyung Yoon², Sue Kyoung Lee², Kyung Won Seo²,
Woo-Kyun Lee^{1,2}, Yongsung Cho¹ and Yowhan Son^{1,2*}

¹Department of Climate Environment, Graduate School of Life and Environmental Sciences,
Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

요약: 전 지구적인 기후변화에 따라 산림 및 토양탄소의 역할은 탄소 저장고로서 매우 중요하며, 이들의 동태를 연구하기 위해서는 기존의 현장연구뿐만 아니라 적용 가능한 산림모델 연구가 필요하다. 본 연구에서는 산림토양탄소 모델인 Yasso의 주요 입력자료인 과거의 연간 낙엽량 자료를 연륜연대학적 자료구축과정을 통해 생산하고, 위 모델을 이용하여 광릉지역 천연소나무림(*Pinus densiflora*)의 토양탄소동태를 모의하였다. 연륜연대학적 자료구축과정을 통해 계산된 임분 내 낙엽(침엽, 가지, 줄기, 세근)의 생산량은 1971년부터 2006년까지 지속적으로 증가해왔다. 또한 2006년 낙엽 생산량(침엽, 가지)의 실측값과 추정값을 비교한 결과 유의적인 오차는 없었다. 모의된 30 cm 깊이까지의 토양탄소 저장량의 임분 전체평균은 $46.30 \pm 4.28 \text{ t C ha}^{-1}$ 로 산림의 임목 내 탄소 저장량의 약 53%를 차지했으며, 실측값과 비교하여 유의한 차이 및 오차가 없었다. IPCC A1B 시나리오에 따른 한반도 기후변화추세를 반영한 이 지역의 모의된 토양탄소 추정량은 1971년부터 2041년까지 지속적으로 증가한 후 2100년까지 감소되는 것으로 나타났다. 기후변화를 고려하지 않는 시나리오의 결과와 비교하면 2100년에 이르러 최고 7.58%까지 토양탄소량이 감소될 수 있다. 본 연륜연대학적 자료 구축방법과 Yasso 모델을 이용한 모의과정은 천연소나무림의 토양탄소동태를 추정하는데 유용한 것으로 판단되었다. 향후 더욱 신뢰성 있는 결과를 생산할 수 있도록 연륜연대학적 방법 및 Yasso 모델의 개선과 다양한 환경에서의 적용 및 타당성평가와 같은 후속연구가 필요한 것으로 사료된다.

Abstract: The role of forest and soil carbon under global climate change is getting important as a carbon sink and it is necessary to research on applicable forest models as well as in the field for a study of these dynamics. On this study, historical annual litter dataset as a major input data for the forest soil carbon model, Yasso was established using a dendrochronological reconstruction method, and the soil carbon dynamics of a *Pinus densiflora* forest in Gwangneung, Korea was simulated using Yasso. The amount of litter (needle, branch, stem and fine root) production, which was estimated using the dendrochronological method, has increased continuously from 1971 to 2006. Furthermore, there was no significant error between estimated and measured values of litter production (needle and branch) in 2006. The average of simulated soil carbon stock up to 30 cm depth was $46.30 \pm 4.28 \text{ t C ha}^{-1}$, which accounted for 53% of carbon stock in trees of the forest, and had no significant difference and error with measured soil carbon stock. Under the climate change trend in Korea according to IPCC A1B scenario, it was estimated that the simulated soil carbon stock in the region would increase continuously from 1971 to 2041 and then decreased until 2100. Compared to the result of the scenario that there is no climate change, the soil carbon stock could be decreased up to 7.58% at 2100. It was inferred the dendrochronological reconstruction method and simulation of Yasso model are useful to estimate soil carbon dynamics of the natural *P. densiflora* forest. Follow-up researches, such as improvement of the dendrochronological method and Yasso model and their application and validation in various environment, are needed to produce more reliable results.

Key words : dendrochronological reconstruction, litter decomposition, *Pinus densiflora*, soil carbon model, Yasso

서 론

산림은 전 지구 기후변화에서 이산화탄소의 흡수원으로 중요한 역할을 하기 때문에 국제사회는 최근 산림의 탄소 순환에 관심을 두고 있으며, 특히 산림토양탄소의 중요성 또한 부각되고 있다(Nakane, 1995; Watson *et al.*, 2000). 교토 의정서에 따르면 국가들은 산림의 다섯 가지 탄소저장고의 변화를 보고해야 하는데, 그 중에 토양탄소가 포함된다(UNFCCC, 1997). 그러나 현재 토양탄소의 변화를 모니터링하기 위한 연구가 전 지구차원에서 진행되고 있지 않으며, 특히 토양탄소의 공간적 변이성이 크고 토양 시료 채취 및 분석에 많은 인원과 비용이 소요된다는 점에서 커다란 토양탄소 저장량의 작은 변화를 모니터링하는 것은 어려운 실정이다(Liski, 1995; Liski *et al.*, 1998). 이러한 상황에서 토양탄소모델은 토양탄소동태를 예측하는 유용한 도구가 될 수 있다(Powlson *et al.*, 1996). 토양탄소모델로는 CENTURY(Kelly *et al.*, 1997)와 RothC(Coleman and Jenkinson, 1997)가 전 세계적으로 널리 활용되고 검증되어 왔다. 그러나 우리나라에서는 이들 모형을 구동하기 위해 필요한 자료의 대부분이 구비되지 않아 활용하기 어려운 제약을 받고 있다. 반면에 Yasso(Liski *et al.*, 2005)는 산림토양탄소모델이며 비교적 간단한 모델 구조와 단순한 입력자료 요건의 장점을 갖고 있어 유용한 대안이 될 수 있다. Lee *et al.*(2009)은 현재 우리나라의 자료수준에서 국내 산림에 대한 Yasso 모델의 적용가능성을 살펴본 바 있다. 그러나 Yasso 모델이 상대적으로 적은 입력자료를 요구함에도 불구하고, 여전히 정확하고 신뢰할만한 장기간의 기후 및 낙엽 입력자료가 매우 부족하여 이를 적용하는데 한계가 있었다.

연륜연대학이란 임목의 연륜 생장을 이용하여 기후 및 환경변화와 이에 따른 반응 관계를 연구하는 학문으로 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다(이상태 등, 2005). 연륜 분석은 산림의 과거 생태학적 정보, 특히 장기적인 생장의 변화를 알아보는 임분동태 연구에 유용한 도구로 사용되고 있다(Cherubini *et al.*, 1996). 또한 연륜은 수목의 생장을 대표하므로 임분 내 생체량을 추정하는데 도움이 될 수 있다(Bascietto *et al.*, 2004). 따라서 최근에는 산림생태계 분야에서 임분의 연륜 정보를 활용하여 장기적이고 지속적인 임분 정보와 각종 모델에 필요한 입력정보들을 생산하기 위한 시도가 이루어지고 있다(Garcia, 1992).

본 연구에서는 산림토양탄소모델에서 중요한 입력자료인 시계열 과거 낙엽자료를 생산하기 위한 일련의 연륜연대학적 자료구축과정을 제시하고, 토양탄소모델인 Yasso를 이용하여 광릉지역 천연소나무림(*Pinus densiflora*)의 토양탄소동태를 추정함으로써 연륜연대학적 자료구축방법과 Yasso 모델의 국내 적용가능성을 고찰해 보고자 한다.

재료 및 방법

본 연구는 크게 연륜연대학적 낙엽 자료구축과정, Yasso 모델을 이용한 토양탄소동태 추정과정, 추정된 결과의 토양깊이 보정과정의 세 가지 단계로 진행되었다(Figure 1). 실측을 위한 연구대상지는 경기도 포천군 소흘읍 직동리에 위치한 산림생산기술연구소 시험림 내 12임반(37° 47' 001"N, 127° 10' 037" E, 425 m a.s.l.)으로 하였다. 이 지역의 연평균 기온 및 강수량(평년값 기준)은 각각 11°C, 1,335 mm이다. 연구대상 임분은 8영급 천연소나무림으로, 현재의 지위지수는 14로 추정된다. 임분 내에는 3개의 밀도별로 2개씩의 20 m × 20 m 방형구가 설치되어 있다. 각 조사구의 임분밀도(본 ha⁻¹)와 흉고직경(cm)은 다음과 같다; 저밀도(조사구 1: 425, 33.1, 조사구 2: 400, 31.1), 중밀도(조사구 3: 675, 30.0, 조사구 5: 650, 31.3), 고밀도(조사구 4: 1200, 21.6, 조사구 6: 875, 22.2).

1. 연륜연대학적 낙엽 자료구축과정

1) 목편 채취 및 연륜연대학적 분석

2006년 9월 각 조사구 내 있는 모든 소나무의 흉고직경을 측정하고, 각 조사구별로 3~4본씩의 소나무를 선정하여(Table 1), 1.2 m 높이에서 목편시료를 채취한 다음 연륜분석기(DTRS-2000, 신일사이언스, 한국)로 연륜 생장량을 분석하였다(산림청, 2008). 각 임목의 연륜 생장 증가 자료, 현재 흉고직경, 수피두께 추정식(Van Laar and Aka, 2007)을 이용하여 과거 흉고직경을 추정하였다. 한편 표본목 외 나머지 임목들의 과거 흉고직경은 표본목의 과거와 현재 흉고직경 사이의 관계식들을 이용하여 추정하였다. 이를 바탕으로 6개의 조사구 내 모든 소나무에 대한 흉고직경을 1971년부터 2006년까지 연 단위로 추정하였다.

2) 임목 단위 생체량 추정

우리나라 중부지역의 소나무에 대한 생체량 추정 회귀

Table 1. Characteristics of sample trees in 2006. Standard deviation is in parenthesis.

Variable	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6
DBH (cm)	32.08(5.79)	30.27(6.47)	28.75(6.95)	22.53(6.47)	30.77(5.98)	22.60(9.92)
Age (yr)	71.00(9.63)	79.67(8.39)	70.75(9.14)	72.67(11.02)	72.33(7.37)	69.00(5.29)
Radial growth (cm)	0.76(0.35)	0.80(0.34)	0.75(0.25)	0.43(0.03)	0.96(0.16)	0.72(0.21)
Bark thickness (cm)	0.49(0.10)	0.66(0.07)	0.66(0.33)	0.71(0.32)	0.80(0.12)	0.81(0.60)

Table 2. Biomass turnover rates for estimating litter production by components.

Component	Average turnover rate (a ⁻¹)	References/notes
Branches	0.032	Measured litter/estimated biomass
Needles	0.329	Measured litter/estimated biomass
Fine roots	1.010	Hwang <i>et al.</i> (2007)
Stem	0.004	Peltoniemi <i>et al.</i> (2006)

식, $\log W_t = A + B \log D$ (W_t 는 생체량(kg), D 는 흉고직경(cm); 박인협과 김준선, 1989)을 이용하여 1971년부터 2006년까지의 각 조사구 내 전체 임목들의 생체량을 부위별(침엽, 가지, 줄기)로 추정하였다. 세근 생체량(<2 mm)은 앞에서 추정된 침엽 생체량의 50%로 추정하였다(Peltoniemi *et al.*, 2004; Vanninen and Mkel, 1999).

3) 낙엽 생산량 추정

임분 내 임목의 전체 생체량에 부위별 특정 생체량 전환율을 곱하여 연간 발생하는 낙엽량을 추정하였다(Table 2). 2006년부터 2008년까지 조사한 침엽과 가지의 낙엽 생산량 자료와 위에서 추정한 생체량을 비교하여 광릉지역 소나무임분의 침엽과 가지의 생체량 전환율을 계산하여 과거의 침엽과 가지부위 낙엽량을 추정하였다. 세근의 경우에는 Hwang *et al.*(2007)의 연구에서 제시한 리기다소나무(*Pinus rigida*) 세근의 평균 전환율을 적용하였고, 줄기의 경우에는 고사목에 대한 임분의 전 윤벌 기동안 평균 전환율을 추정한 국내 연구가 없기 때문에

Yasso 모델 관련 논문에서 적용한 *Pinus sylvestris*의 값(Peltoniemi *et al.*, 2004)을 참조하여 각각의 낙엽량을 추정하였다.

4) 임분 단위 자료로의 확장

과거의 임분 낙엽 생산량은 현재 임분밀도를 가정하여 추정한 과거 임분 내 개체목들의 낙엽 생산량의 합과는 다를 수 있다. 국립산림과학원(2009)에서는 지위지수에 따른 임분수확표가 임분 평가 및 예측단계에서 활용될 수 있음을 보여주었고, Coomes *et al.*(2003)은 천연림에서 수목의 흉고직경과 임분밀도 간의 상관관계가 있음을 밝힌 바 있다. 따라서 본 연구에서는 중부지방 소나무의 지위지수가 14일 때 임분수확표(국립산림과학원, 2009) 상의 흉고직경과 임분밀도로부터 식 (1)을 도출하여 1971년부터 2006년까지의 연간 임분밀도를 추정하였다. 그리고 현재 임분밀도를 기준으로 과거 임분밀도와의 비율을 개체목들의 총 낙엽 생산량에 적용하여 과거 임분 전체 낙엽 생산량을 추정하였다. 최종적으로 임분 낙엽 생산량에 0.5를 곱하여 낙엽의 탄소량을 모델에 활용하였다.

$$N = 3102.1 \times e^{-0.052DBH} \quad (1)$$

(DBH는 흉고직경, N은 임분밀도)

2. Yasso 모델을 이용한 토양탄소동태 추정과정

Yasso 모델은 토양 내 유기탄소 순환을 기술하며, 토양 유기탄소 저장량과 변화량, 타가 토양호흡량을 알 수 있다. Yasso 모델에서 다양한 유형의 유입물 분해는 그 유형

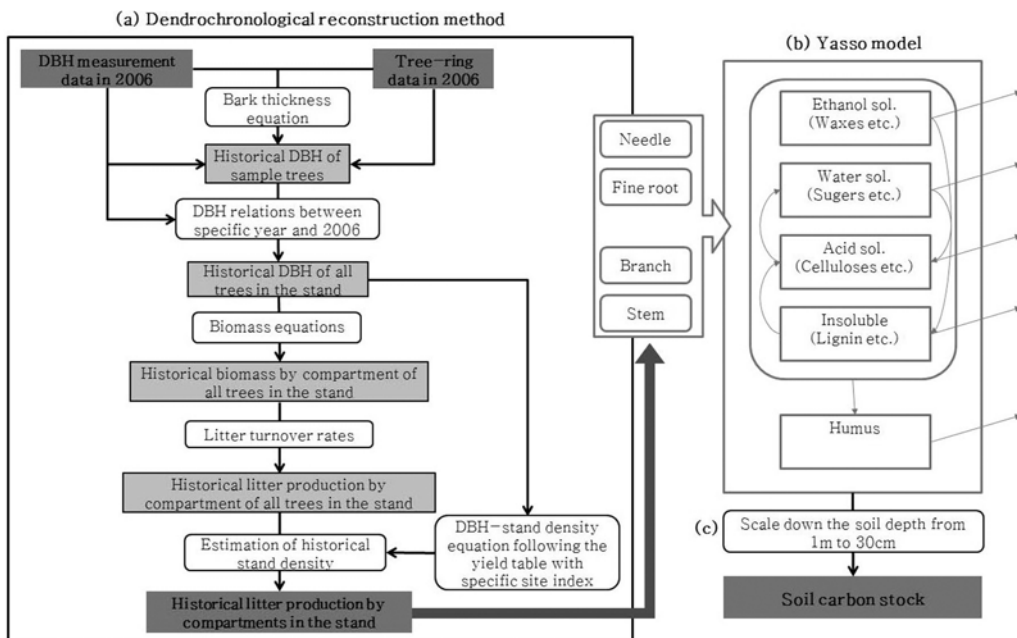


Figure 1. The flow chart of the soil carbon modeling with Yasso07 using the dendrochronological reconstruction method.

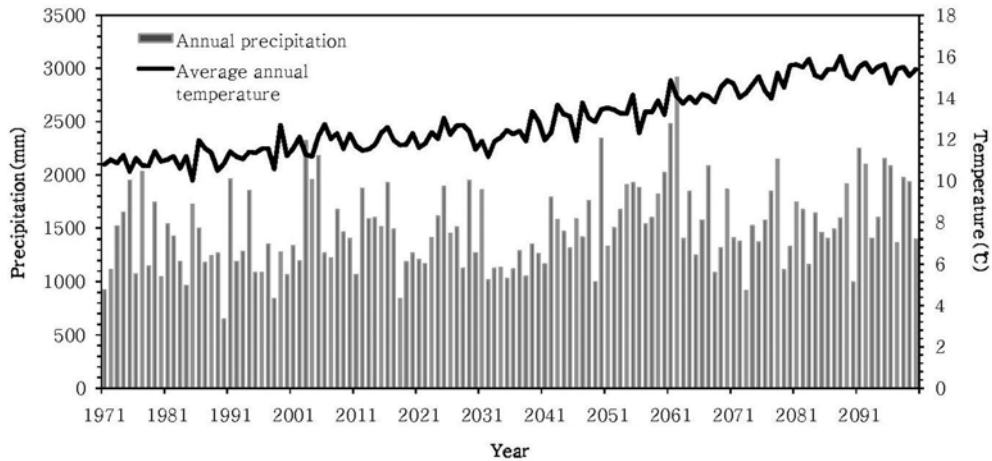


Figure 2. Average annual temperature and precipitation estimates according to the trend of IPCC A1B scenario in Korea.

의 화학적 조성과 기후조건에 따라 달라진다. Yasso 모델의 세부구조는 Figure 1(b)에 기술되어 있다(Liski *et al.*, 2005; Liski *et al.*, 2009).

본 연구에서는 1971년부터 2100년까지의 기후변화에 따른 광릉지역 천연소나무임분의 토양 탄소량 및 변화를 추정하는 모의 과정을 설계하였으며, 이를 위해 몇 가지 가정을 전제로 한다. 첫째, IPCC의 A1B 시나리오에 따른 한반도 미래 기후추세를 기본적인 기후자료로 전제한다. 기후자료는 기상청의 기상자료와 한반도 미래전망시나리오(국립기상연구소 제공)를 바탕으로 보간처리법을 통해 1971년부터 2100년까지의 연 단위 광릉지역 기후자료(연평균 기온 및 강수량)를 추출하였다(이민아 등, 2007; 차유미 등, 2007)(Figure 2). 또한 토양탄소에 대한 기후변화의 영향을 파악하기 위하여 모의기간동안 평년 기후가 지속됨을 가정한 대조 시나리오를 적용하였다. 둘째, 광릉 소나무림은 평형상태임을 전제한다. Yasso 모델을 모의하기 위해서는 평형상태를 가정했을 때의 기후자료와 낙엽 생산량 자료를 입력하여 초기 토양탄소량을 설정하여야 한다. 본 연구에서는 연평균 기온 및 강수량의 평년값(1971년~2000년)과 1971년부터 2006년까지 추정된 낙엽 생산량의 평균값을 평형상태에서의 입력자료로 적용하였다. 셋째, 미래 연간 낙엽 생산량은 최근 10년간(1997년~2006년) 연평균 낙엽 생산량과 동일함을 전제로 한다. 광릉 소나무림은 8영급의 성숙림이며 평형상태에 있음을 가정하므로, 미래에 환경적인 교란(예. 산불, 간벌 등)이 없다면 낙엽 생산량은 현재 수준과 유사할 것이다.

3. 토양탄소 추정량의 토양깊이 보정과정

우리나라에서 가장 많이 나타나는 갈색산림토양군의 토양탄소량은 깊이 50 cm 이내에서 약 80%(정진현 등, 1998)가 분포하므로 대부분의 국내 연구에서 30~50 cm 깊이까지의 토양이 분석되어 왔다. 한편 연구대상지에서의

토양탄소량은 30 cm 깊이까지 측정되었다. 연구결과 분석의 통일성과 국내 적용성을 높이기 위해 Yasso 모델의 토양깊이 결과를 30 cm로 보정하였다. 이를 위하여 국외 논문들 중 소나무류(Law *et al.*, 2001; Liski and Westman, 1995; Peltoniemi *et al.*, 2004), 적갈색산림토양(Morisada *et al.*, 2004), 온대 상록수림(Jobbagy and Jackson, 2000)에서의 1 m까지 깊이별 누적 토양탄소비율을 분석하여 자연로그형 회귀식 (2)를 도출하였다. 식에 따르면 30 cm 깊이의 토양탄소량은 1 m 깊이의 토양탄소량의 약 60% 정도이다. Yasso 모델의 토양탄소 모의결과에 이 비율을 곱하여 30 cm 깊이까지의 토양탄소량을 추정하였다(Figure 1(c)).

$$y = 0.3371 \times \ln(x) - 0.5507, r^2 = 0.94 \quad (2)$$

(x는 토양깊이, y는 누적 토양탄소비율)

결 과

1. 연륜성장분석을 통한 흉고직경 추정

6개 조사구에서 표본목들의 연륜 성장량(Figure 3)을 5년 단위로 묶어 분석한 결과, 1971년부터 2006년까지 중밀도조사구(조사구 3, 5)의 평균 연륜 성장량이 가장 컸으며 저밀도 및 고밀도조사구의 성장량과 비교하여 유의한 차이가 있었다. 연륜 성장량을 토대로 추정한 과거의 평균 흉고직경은 지난 36년 동안 연간 약 1.3~2.0 mm씩 증가하였으며 최근 5년간의 연간 직경 성장률은 1.16 mm였다. 광릉 소나무림은 8영급의 성숙림이기에 둔화된 직경 성장 추세를 보이는 것으로 판단된다(Thorpe *et al.*, 2007).

2. 생체량 및 낙엽 생산량 추정 결과

임분 내 표본목들의 평균 현존량(kg/본)은 248.3이며, 각 부위별로는 침엽이 17.4, 가지가 56.9, 줄기가 165.4, 세근

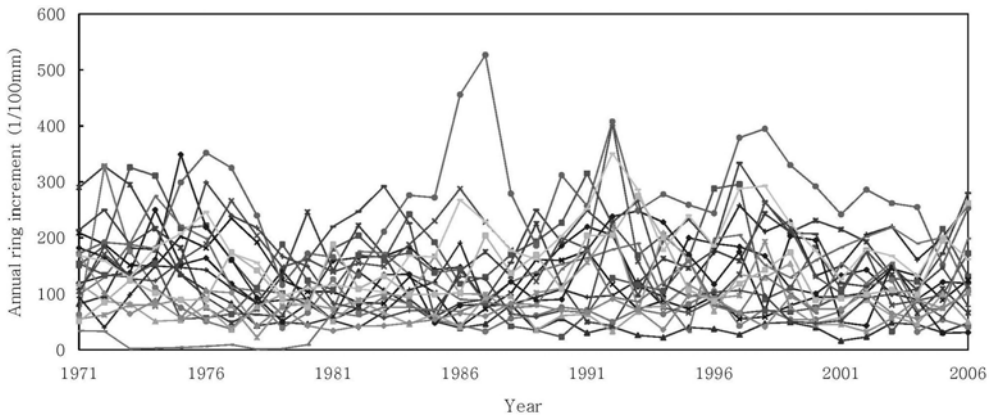


Figure 3. Annual ring increment of sample trees in the study site from 1971 to 2006.

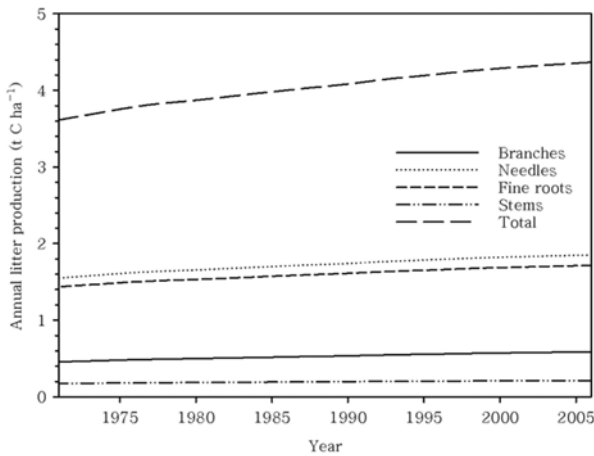


Figure 4. Annual litter production by compartments from 1971 to 2006.

이 8.7 등의 분포를 보였다. 또한 1971년부터 2006년까지 조사구 내 전체 임목에 대한 각 부위별 연간 생체량을 추정하였다. 이 값을 토대로 추정된 광릉 임분 내 각 부위별 낙엽 생산량은 1971년 이후 지속적으로 증가해 왔으나, 점차 그 증가폭은 둔화되고 있다(Figure 4). 2006년 각 조사구 내로 유입된 침엽과 가지 낙엽의 추정값과 실측값을 비교한 결과, 추정값의 상대적인 RMSE(95% 신뢰수준)가 침엽은 14.01%, 가지는 18.73%로 둘 다 유의한 오차가 없었다.

세근과 줄기의 낙엽 생산량은 각각 2.83, 0.21 t C ha⁻¹로 추정되었다. 부위별 낙엽 생산량 중 세근의 비율이 가장 컸으며 이는 침엽의 약 1.5배에 달하였다. 세근과 침엽 생체량의 비를 1:2로 추정된 결과와 비교하면 임분 내에서 세근이 낙엽으로 전환되는 비율이 침엽보다 매우 빠른 것으로 보인다. 줄기의 경우 임분의 운벌기 동안 평균적인 유입량에 대한 정보가 없기 때문에 국외 문헌자료인 Peltoniemi *et al.*(2006)을 이용하였으나, 줄기가 전체 낙엽 생산량에서 차지하는 비율이 적고(4%) 변동성이 크지 않기 때문에 임분 내 토양탄소동태에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

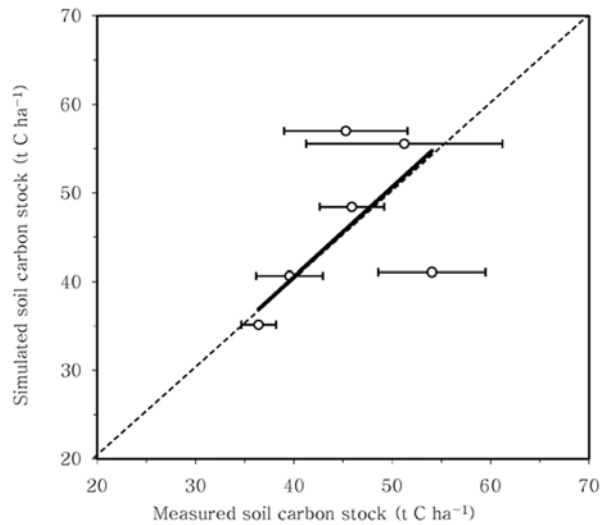


Figure 5. Comparison of simulated and measured soil carbon stocks.

3. 토양탄소 저장량 추정

현재 연구대상 임분 전체의 토양탄소량 실측값의 평균(±SD)은 45.40±3.87 t C ha⁻¹으로 조사구 간 임분밀도에 따른 유의한 차이는 없었다. 한편 모의한 토양탄소량의 임분 전체 평균은 46.30±4.28 t C ha⁻¹로 측정된 토양탄소 저장량과 유사하였고(Figure 5), Yasso 모델에 대한 상대적인 RMSE(95% 신뢰수준)는 16.41%로 모의값과 실측값 사이의 유의한 오차가 없었다. 또한 모의한 토양탄소량은 중밀도조사구의 값이 다른 밀도조사구의 값보다 더 큰 것으로 나타났다(Figure 6). 국내 소나무림 토양탄소 저장량을 문헌(Jeon *et al.*, 2007; Kim and Cho, 2004; 박관수, 1999; Park *et al.*, 2009)을 근거로 하여 30 cm 깊이로 보정한 결과 평균 46.28(±30.72) t C ha⁻¹로 광릉 지역의 토양탄소량과 유사하였지만, 같은 수종이라도 미세기후 및 공간적 특성(임분밀도, 임령, 토양특성 등)에 따라 토양탄소값의 변동이 커 표준편차가 매우 높게 나타났다.

고찰 및 결론

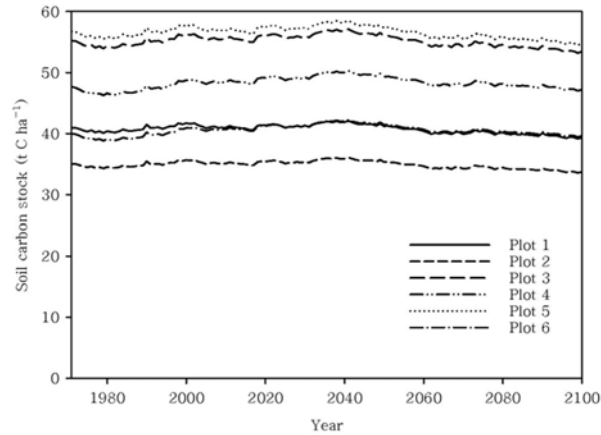


Figure 6. Changes of soil carbon stocks in 6 plots from 1971 to 2100.

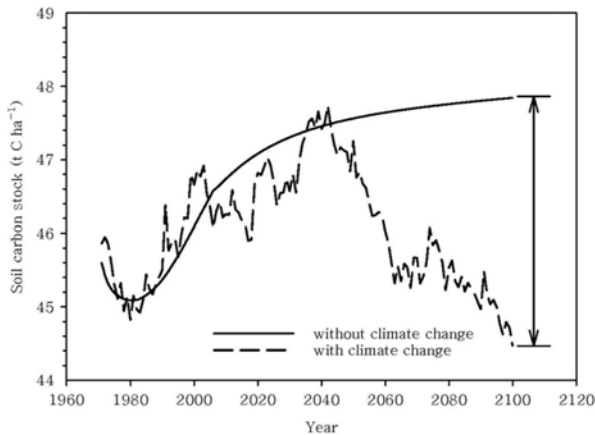


Figure 7. Comparison of soil carbon stocks with and without climate change.

4. 토양탄소량 동태

광릉지역의 토양탄소 저장량은 1971년부터 2006년 현재까지 최대 약 4.68%까지 증가하였다. 2100년까지 IPCC의 A1B 시나리오에 따라 기후가 변화하고, 최근 10년간의 평균 낙엽 유입량이 계속 지속된다는 가정 하에 토양탄소량은 현재 이후 2041년에 최대 평균 3.09% 증가하고 이후 2100년에 44.70 t C ha⁻¹로 최대값 대비 약 6.35%까지 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과에는 온도와 낙엽 생산량 변화가 주로 영향을 미치는 것으로 사료된다. 즉 가까운 미래에는 평형상태보다 더 많은 낙엽이 생산되어 토양탄소량이 증가되며, 그 후에는 기온 상승폭이 더욱 증가하여 토양 내 유기물의 분해속도가 빨라져 낙엽 생산량에 의한 증가량 이상의 토양탄소가 감소될 것으로 판단된다. 이것은 기후변화를 고려하지 않는 시나리오의 결과와 비교하여 2100년까지 토양탄소 저장량이 최대 3.37 t C ha⁻¹(7.58%)가 감소하는 것을 나타낸다(Figure 7).

1. 연륵연대학적 접근

Metsaranta and Liefvers(2009)는 연륵연대학을 임분 발달을 모의하기 위한 연간 자료를 얻는데 이용할 수 있음을 보인 바 있다. 본 논문에서는 토양탄소모델에 필수적으로 요구되는 연간 낙엽 생산량을 연륵을 이용하여 구축하였다. 이 방법을 통해 산림조사 자료가 부족한 현실에서 필요한 입력자료를 단기간에 구축할 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 모델에서 연륵연대학적 방법을 폭넓게 활용하기 위해서는 보완이 필요하다. 먼저, 연륵 자료의 정확성을 높이기 위해 기후, 건조 등의 환경인자에 따른 위연륵 등의 영향을 최소화 하면서 연간 성장량을 측정할 수 있어야 한다. 연륵 분석을 통해 임목의 과거 성장 자료를 얻을 수 있지만 임분자체의 밀도와 같은 정보는 얻을 수 없다. 본 연구에서는 수확표 상 지위지수에 맞는 흉고직경-임분밀도 관계식을 통해 과거의 임분밀도를 추정하여 임목의 자료를 보정하였다. 그러나 이 방법은 수종별 임분의 지위지수를 사전에 알아야 하며 수확표 상 흉고직경 범위를 벗어난 경우에는 관계식을 이용할 수 없다는 한계가 있다. 이러한 점에서 고사목을 포함한 연륵 분석을 통해 임분 내 고사율을 추정하는 것이 대안이 될 수 있다(Bigler and Bugmann, 2004; Metsaranta *et al.*, 2008). 나아가 현재 연륵연대학적 방법은 과거 자료를 구축하는 데 초점을 맞추고 있지만 연륵을 이용한 성장모델을 만들어 토양탄소모델과 결합한다면 미래 토양탄소동태에 대한 예측력을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

이와 같은 방법으로 추정된 낙엽 생산량의 신뢰도는 잠재적인 오차 분석을 통해 간접 평가될 수 있다. 본 방법상의 가능한 오차원인은 크게 두 가지이다: 1) 측정 상의 오류; 비대칭형 성장으로 인한 목편 상 연륵의 불확실성, 건조 후 목편의 직경 수축으로 인한 성장속도 과소평가 등. 2) 상대성장식의 부적합한 선택에 의한 오류; 흉고직경-임분밀도 관계식, 세근 생체량 추정식, 낙엽 전환율의 선정 과정에서 검증되지 않은 경험식을 적용함에 따른 불확실성 등. 따라서 이와 같은 주요 오차의 원인을 개선해 나가므로써 향후 연륵연대학적 방법을 활용한 낙엽 생산량 추정의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 또한 연륵을 이용한 방법과 현장에서의 장기적인 측정방법을 병행함으로써 보다 정확하고 지속적인 자료를 생산할 수 있을 것이다(Metsaranta and Liefvers, 2009).

2. Yasso 모델의 토양탄소 저장량 추정

본 연구에서 연륵연대학적 방법을 활용하여 시계열적 낙엽 생산량 자료를 구축하여 적용한 결과, Yasso 모델이

광릉지역 천연소나무림의 토양탄소 저장량을 실측값과 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 한편 선행연구인 Lee *et al.* (2009) 연구에서는 입력자료의 부족으로 낙엽 생산량을 상당부분 생략하였을 뿐 아니라 모델에서 중요한 매개 변수들이 현지 상황을 반영하지 못하여 토양탄소 저장량의 실측값과 모의값 사이의 차이가 컸다. 그러므로 본 연구에서 제시한 연륜연대학적 방법과 Yasso 모델이 모델에 필요한 입력자료를 구축하고 토양탄소동태를 추정하는 데 유용한 것으로 판단된다.

Yasso 모델에서 나타난 임분밀도에 따른 조사구별 토양탄소량의 차이가 실제 임분의 측정값에서는 나타나지 않았다. 모의과정에서 생체량과 임분밀도를 토대로 낙엽 생산량이 추정되고, 낙엽 생산량은 토양탄소량과 강한 양의 상관관계($r=0.99$, $p<0.001$)에 있기 때문에 모의된 토양탄소량은 임분밀도에 영향을 받게 된다. 그러나 실제 광릉 임분에서는 임분밀도 차이 외에도 미세기후, 토양특성, 지형 등의 환경인자가 임분의 생장 및 낙엽 생산량에 영향을 주기 때문에 (Starr *et al.*, 2005; Kim, 2004) 한정된 영향인자만을 포함하는 모의과정과는 차이가 있었다.

광릉지역 소나무림 내 탄소($t C ha^{-1}$)는 총 139로 추정되었는데 소나무 임목에 84.46, 낙엽에 5.47, 토양에 46.30가 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 토양 내 탄소 저장량은 임목 내 저장량의 약 53%로 추정되었다. 산림 내 총탄소 저장에 대한 토양의 기여도는 한 임분 내에서도 시간에 따라 다양하며 (Liski *et al.*, 2002), 산림 관리에 따라 서로 달라질 수 있다 (Karjalainen, 1996). 모델을 통한 분석 결과, 토양탄소 저장량의 화학적 특성에 따른 토양탄소비율 중 리그닌과 같이 분해되기 힘든 불용성 물질들과 장기간 안정적으로 토양에 축적되며 온도 변화에 민감하지 않은 부식의 비율이 전체 87.3%를 차지하였다. 이는 온도와 같은 환경조건의 변화에 민감하게 반응하지 않는 토양 특성의 근거가 될 수 있다. 광릉지역 토양의 경우 이러한 특성에도 불구하고 향후 기후변화에 따라 낙엽의 분해속도가 증가하여 토양탄소는 감소될 것으로 추정된다 (Figure 7). 그러나 적절한 산림 관리를 통해 생체량 및 낙엽량을 증가시켜 임분 내 토양탄소 저장량을 증가시킬 수 있는 가능성도 있다. 따라서 기후변화에 따른 토양탄소동태와 산림 관리의 효과를 예측하기 위해서는 산림 모델의 활용이 요구된다.

3. 향후 연구를 위한 제안

산림토양탄소동태에 관한 정확한 결과를 예측할 뿐 아니라 국내 산림토양탄소모델을 개발하기 위해서는 낙엽의 생산량 및 분해속도, 토양탄소 측정, 낙엽의 화학적 성분 분석, 고사목 동태 및 기본적인 산림조사 등 장기간의 현장 측정과 실험을 통한 양질의 자료 축적이 요구된다.

그러나 현실적으로 이를 충족시키기까지는 시간적 지연과 기술적 격차가 크다. 본 논문에서 제시한 연륜연대학적 방법을 이용한 토양탄소동태 모의는 국내 토양탄소모델 개발 및 적용과정에서 새로운 접근 방법의 하나로써 1) 연륜연대학적 기법을 이용한 낙엽 생산량 추정 모델 개발, 2) 모델 주요 파라미터들의 국내화, 3) Yasso 모델의 시간적, 공간적 범위 및 수종 구성의 확대, 4) 다양한 토양탄소 모델들의 적용 및 비교를 통한 타당성평가와 같은 후속 연구들이 필요한 것으로 사료된다.

인용문헌

1. 국립산림과학원. 2009. 재적·중량표 및 임분수확표. 산림청. 대전. pp. 273.
2. 박관수. 1999. 충주지방의 신갈나무와 굴참나무 천연림 생태계의 지상부 및 토양 중 탄소고정에 관한 연구. 한국임학회지 88(1): 93-100.
3. 박인협, 김준선. 1989. 한국산 4개 지역형 소나무천연림의 물질 현존량 추정식에 관한 연구. 한국임학회지 78(3): 323-330.
4. 산림청. 2008. 생장목편 DB 구축. 산림청. pp. 88.
5. 이민아, 이우균, 송철철, 이준학, 최현아, 김태민. 2007. 기온 및 강수량의 시공간 변화에측 및 변이성. 한국GIS학회지 15(3): 1-12.
6. 이상태, 윤석락, 박은희, 김종갑, 정영관. 2005. 경북 지역 소나무의 연륜생태학적 특성에 관한 연구. 한국농림기상학회지 7(4): 289-295.
7. 정진현, 김춘식, 이우균. 1998. 지역별, 임분별 산림토양 내 탄소량 추정. 산림과학논문집 57: 178-183.
8. 차유미, 이효신, 문자연, 권원태, 부경운. 2007. ECHO-G/S를 활용한 미래 동아시아 기후 전망. Atmosphere 17(1): 55-68.
9. Bascietto, M., Cherubini, P. and Scarascia-Mugnozza, G. 2004. Tree rings from a European beech forest chronosequence are useful for detecting growth trends and carbon sequestration. Canadian Journal of Forest Research 34: 481-492.
10. Bigler, C. and Bugmann, H. 2004. Predicting the time of tree death using dendrochronological data. Ecological Applications 14(3): 902-914.
11. Cherubini, P., Piussi, P. and Schweingruber, F.H. 1996. Spatiotemporal growth dynamics and disturbances in a subalpine spruce forest in the Alps: a dendroecological reconstruction. Canadian Journal of Forest Research 26: 991-1001.
12. Coleman, K. and Jenkinson, D.S. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. Geoderma 81: 29-44.
13. Coomes, D.A., Duncan, R.P., Allen, R.B. and Truscott, J. 2003. Disturbances prevent stem size-density distributions in natural forests from following scaling relationships. Ecol-

- ogy Letters 6: 980-989.
14. Garcia, O. 1992. Sampling for tree-ring analysis. Paper presented at the IUFRO Conference 'Integrating Forest Information over Space and Time'. 13-7 January 1992, Canberra.
 15. Hwang, J., Son, Y., Kim, C., Yi, M.J., Kim, Z.S., Lee, W.K. and Hong, S.K. 2007. Fine root dynamics in thinned and limed pitch pine and Japanese larch plantations. *Journal of Plant Nutrition* 30: 1821-1829.
 16. Jeon, I.Y., Shin, C.H., Kim, G.H. and Mun, H.T. 2007. Organic carbon distribution of the *Pinus densiflora* forest on Songgye valley at Mt. Worak national park. *Journal of Ecology and Field Biology* 30(1): 17-21.
 17. Jobbagy, E.G. and Jackson, R.B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate to vegetation. *Ecological Applications* 10: 423-436.
 18. Karjalainen, T. 1996. Model computations on sequestration of carbon in managed forests and wood products under changing climatic conditions in Finland. *Journal of Environmental Management* 47: 311-328.
 19. Kelly, R.H., Parton, W.J., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klir, J., Körschens, M., Poulton, P.R. and Richter, D.D. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the century model. *Geoderma* 81: 75-90.
 20. Kim, C. 2004. Effects of stand density on carbon dynamics in a larch (*Larix leptolepis*) plantation. *Journal of Korean Forestry Society* 93(6): 355-362.
 21. Kim, C.S. and Cho, H.S. 2004. Quantitative comparisons of soil carbon and nutrient storage in *Larix leptolepis*, *Pinus densiflora* and *Pinus rigitaeda* plantations. *Korean Journal of Ecology* 27(2): 67-71.
 22. Law, B.E., Thornton, P.E., Irvine, J., Anthoni, P.M. and Tuyl, S.V. 2001. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. *Global Change Biology* 7: 755-777.
 23. Lee, A.R., Noh, N.J., Cho, Y.S., Lee, W.K. and Son, Y. 2009. Estimating the soil carbon stocks for a *Pinus densiflora* forest using the soil carbon model, Yasso. *Journal of Ecology and Field Biology* 32(1): 47-53.
 24. Liski, J. 1995. Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within boreal forest stand-effect of trees and implications for sampling. *Silva Fennica* 29(4): 255-266.
 25. Liski, J., Ilvesniemi, H., Mkel, A. and Starr, M. 1998. Model analysis of the effects of soil age, fires and harvesting on the carbon storage of boreal forest soils. *European Journal of Soil Science* 49(3): 407-416.
 26. Liski, J., Perruchoud, D. and Karjalainen, T. 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 169: 159-175.
 27. Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M. and Sievanen, R. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* 189: 168-182.
 28. Liski, J. and Westman, C.J. 1995. Density of organic carbon in soil at coniferous forest sites in southern Finland. *Biogeochemistry* 29: 183-197.
 29. Liski, J., Tuomi, M. and Rasinmäki, J. 2009. Yasso07 user-interface manual. www.environment.fi/syke/yasso
 30. Metsaranta, J.M. and Lieffers, V.J. 2009. Using dendrochronology to obtain annual data for modeling stand development: a supplement to permanent sample plots. *Forestry* 82(2): 163-173.
 31. Metsaranta, J.M., Lieffers, V.J. and Wein, R.W. 2008. Dendrochronological reconstruction of jack pine snag and downed log dynamics in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Forest Ecology and Management* 255: 1262-1270.
 32. Morisada, K., Ono, K. and Kanomata, H. 2004. Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma* 119: 21-32.
 33. Nakane, K. 1995. Soil carbon cycling in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation. *Forest Ecology and Management* 72: 185-197.
 34. Park, G.S., Choi, J.Y., Lee, K.H., Son, Y.M., Kim, R.H., Lee, H.G. and Lee, S.J. 2009. Carbon storage in above-ground, root, and soil of *Pinus densiflora* stand in six different sites. *Korean Journal of Korean Environmental Restoration Technology* 12(2): 1-9.
 35. Peltoniemi, M., Mkip, R., Liski, J. and Tamminen, P. 2004. Changes in soil carbon with stand age - an evaluation of a modeling method with empirical data. *Global Change Biology* 10: 2078-2091.
 36. Peltoniemi, M., Palosuo, T., Monni, S. and Mkip, R. 2006. Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soils and vegetation. *Forest Ecology and Management* 232: 75-85.
 37. Starr, M., Saarsalma, A., Hokkanen, T., Merila, P. and Helmisaari, H. 2005. Models of litterfall production for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Finland using stand, site and climate factors. *Forest Ecology and Management* 205: 215-225.
 38. Thorpe, H.C., Thomas, S.C. and Caspersen, J.P. 2007. Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* 37(9): 1563-1571.
 39. UNFCCC. 1997. Kyoto Protocol. <http://www.unfccc.de/resource> (2009. 8. 4)
 40. Van Laar, Anthonie and Aka, Alparlan. 2007. *Forest Mensuration : Managng Forest Ecosystems*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. <http://www.springerlink.com/content/t6326m> (2009. 9. 24)
 41. Vanninen, P. and Mkel, A. 1999. Fine root biomass of Scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. *Tree Physiology* 19: 823-830.
 42. Watson, R.T., Noble, I., Bolin, B., Ravindranath, N., Verardo, D. and Dokken, D. 2000. *Land use, Land-use Change, and Forestry*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K. pp. 377.