

서산지역 금강산 신갈나무림과 소나무림의 유기탄소 분포 및 흡수량^{1a}

원호연² · 김덕기³ · 한아름² · 이영상⁴ · 문형태^{4*}

Distribution and absorption of Organic Carbon in *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* Forest at Mt. Gungang in Seosan^{1a}

Ho-Yeon Won², Deok-Ki Kim³, Areum Han², Young-Sang Lee⁴, Hyeong-Tae Mun^{4*}

요약

충남 서산에 위치한 금강산 내 신갈나무림과 소나무림의 유기탄소 흡수량의 비교를 위해 2013년 9월부터 2014년 8월까지 지상부와 지하부 생물량, 낙엽생산량, 낙엽층의 낙엽량, 그리고 토양의 유기탄소 분포량, 토양호흡량을 측정하였다. 지상부와 지하부 생물량에 분포하고 있는 유기탄소의 양은 신갈나무림과 소나무림에서 각각 115.07/34.36, 28.77/8.59 ton C ha⁻¹이었으며, 임상낙엽층에 각각 4.89, 6.02 ton C ha⁻¹, 토양층에 각각 132.78, 59.72 ton C ha⁻¹ 50cm-depth가 분포하여 신갈나무림과 소나무림의 전체 유기탄소량은 281.52, 108.69 ton C ha⁻¹으로 나타났다. 본 조사지소 신갈나무림과 소나무림에서 연간 광합성을 통하여 식물체에 고정된 유기탄소량은 각각 10.64, 3.64 ton C ha⁻¹이었으며, 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 신갈나무림과 소나무림에서 각각 2.83, 2.20 ton C ha⁻¹으로 나타났다. 토양호흡을 통하여 방출되는 유기탄소량은 신갈나무림과 소나무림에서 각각 9.77, 5.54 ton C ha⁻¹이었으며, 유기탄소 순생산량과 미생물호흡량의 차이로 추정했을 때 본 신갈나무림과 소나무림에서 연간 대기로부터 순 흡수하는 유기탄소는 3.90, 0.81 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 나타나 신갈나무림의 유기탄소 흡수량이 소나무림에 비해 현저히 높은 것으로 나타났다.

주요어: 낙엽, 토양호흡, 생태계 순 탄소흡수량, 참나무림, 침엽수림

ABSTRACT

Comparison of Organic carbon in the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* forest at Mt. Gungang were investigated. Carbon in above and below ground standing biomass, litter layer, and soil organic carbon were measured from September 2013 through August 2014. For the estimation of carbon cycling, soil respiration was measured. The amount of carbon allocated to above and below ground biomass in *Q. mongolica* and *P. densiflora* forest was 115.07/34.36, 28.77/8.59 ton C ha⁻¹, respectively. Amount of organic carbon in annual litterfall in *Q. mongolica* and *P. densiflora* forest was 4.89, 6.02 ton C ha⁻¹, respectively. Amount of organic carbon within 50cm soil depth was 132.78, 59.72 ton C ha⁻¹ 50cm-depth⁻¹, respectively. Total amount of organic carbon in *Q. mongolica* and *P. densiflora* forest estimated to 281.52, 108.69 ton C ha⁻¹, respectively. Amount

1 접수 2016년 1월 25일, 수정 (1차: 2016년 2월 25일), 게재확정 2016년 2월 26일

Received 25 January 2016; Revised (1st: 25 February 2016); Accepted 26 February 2016

2 국립생태원 생태기반연구실 Division of basic Ecology, National Institute of Ecology, SeoCheon 33655, Korea

3 국립생태원 생태보전연구실 Division of Ecological Conservation, National Institute of Ecology, SeoCheon 33655, Korea

4 공주대학교 생물학과 Dept. of Biology, Kongju National Univ., Gongju 32588, Korea

a 이 논문은 환경부 국가장기생태연구의 지원에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-41-850-8499, Fax: +82-41-850-0957, E-mail: htmun@kongju.ac.kr

of organic carbon returned to the forest via litterfall in *Q. mongolica* and *P. densiflora* forest was 2.83, 2.20 ton C ha⁻¹, respectively. The amount of organic carbon absorbed from the atmosphere of this *Q. mongolica* and *P. densiflora* forest was 3.90, 0.81 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ respectively. Absorption of organic carbon in *Q. mongolica* forest was remarkably higher than *P. densiflora* forest.

KEY WORDS: LITTERFALL, NET ECOSYSTEM PRODUCTION, SOIL RESPIRATION, OAK FOREST, CONIFEROUS FOREST

서론

최근 온실효과에 따른 기후변화에 전 세계적인 관심이 집중되고 있으며, 온실효과에 대한 기여도는 CO₂가 가장 높은 것으로 알려져 있다. CO₂는 자연적, 인위적인 활동을 통해 대기 중으로 방출되는 온실가스 중의 하나이며, 대기 중 CO₂ 농도는 산업화 이전의 280ppm에서 2005년에는 379ppm으로 증가하였고, 연간 CO₂ 증가율이 최근 10년 동안 가장 높아 평균 1.9ppm yr⁻¹의 증가를 보이고 있다 (IPCC, 2007).

육상생태계 중에서 산림생태계는 지상부 탄소축적량의 약 90%와 지하부 탄소축적량의 40%를 차지하고 있으며 (Waring and Schlesinger, 1985), 지구에서 육지와 대기 사이의 탄소순환이 해양과 대기 간 탄소순환보다 크므로 (Winjum *et al.*, 1992) 산림생태계는 대기 중 CO₂의 농도 증가 억제를 위한 유용한 매개체로서 큰 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

국내 산림생태계의 탄소저장에 관한 연구는 산림생태계의 지상부 및 지하부 탄소고정 능력(Park, 1999; Jo and Han, 1999), 산림생태계의 탄소 수지(Park, 1999; Pyo *et al.*, 2003; Namgung *et al.*, 2008)에 관한 연구 등이 진행된 바 있다. 산림경영에 따른 토양호흡 측정(Hwang and Son, 2002) 및 탄소 축적량 변화에 관한 연구는 Hwang 등 (2008), Lee and Mun(2005), Namgung(2010)이 참나무림에서 토양호흡을 측정하였을 뿐 산림생태계 전체의 탄소수지에 관한 연구는 최근의 경향으로 활발히 이루어지고 있으나, 상대적으로 연구가 많지 않은 실정이다(Han, 2002; Lee and Mun, 2005; Namgung, 2010).

본 연구는 서산지역 금강산에 형성되어 있는 신갈나무림과 소나무림을 대상으로 수목의 탄소흡수량, 낙엽층의 유기탄소 분포량 및 토양의 유기탄소 저장량을 파악하고 토양호흡을 통해 방출되는 탄소량을 조사, 비교하여 조사지역의 생태계 순 탄소흡수량 및 탄소순환을 파악하고 국내 주소산림 수종인 참나무속과 소나무속의 산림을 통한 대기 중 CO₂저감을 위한 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다.

연구방법

1. 조사지 개황

본 연구의 조사지소는 충청남도 서산시 팔봉면에 위치한 금강산의 해발 약 135m(N 36° 47' 44", E 126° 23' 07")인 북사면에 신갈나무림이, 해발 약 170m(N 36° 47' 43", E 126° 23' 15")인 남사면에 소나무림이 각각 위치하고 있다 (Figure 1). 신갈나무림의 임목밀도는 1,600 ± 83 그루/ha, 평균 흉고직경은 15.52 ± 0.27(15.35~15.79)cm 이었으며, 소나무림의 임목밀도와 평균 흉고직경은 각각 1,650 ± 153 그루/ha, 16.8 ± 4.64(12.16~21.44)cm 이었다. 본 조사지로부터 약 20km 떨어진 곳에 위치한 서산 기상대(N 36° 46' 6", E 126° 29' 39")의 자료에 의하면 조사지역의 2013년 9월부터 2014년 8월까지 연평균기온은 12.4℃로 조사기간 중 1월에 -0.8℃로 가장 낮고, 7월에 24.5℃로 가장 높았으며, 연 강수량은 910.6mm으로 1월에 7.0mm로 가장 적었으며, 8월에 242.3mm로 가장 많았다. 이는 지난 30년간 기상자료에 비해 연평균기온은 0.5℃ 상승하였으며, 연강수량은 375.1mm 정도 감소한 것으로 나타났다.

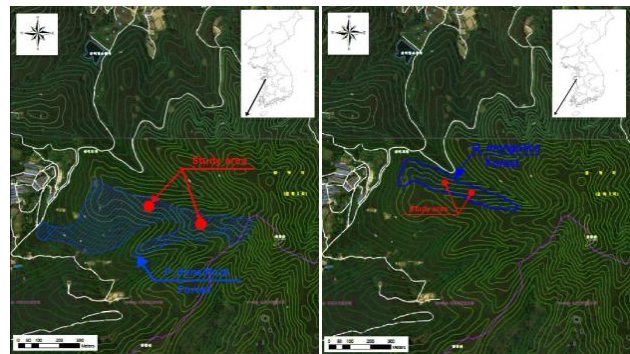


Figure 1. A map showing the study area. The circle (●) indicate the location of the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* forest in the study area

2. 유기탄소 현존량과 연간 유기탄소 순생산량

산림군락의 현존량을 측정하는 방법으로는 흉고직경이 최소부터 최대의 수목이 포함되도록 직경별로 고르게 선정하여 벌목한 후 기관별 건중량을 측정하는 수확법이 가장 좋은 방법으로 알려져 있으나(Kang and Kwak, 1998), 본 조사지소는 벌목이 제한된 관계로 벌목하여 현존량을 측정하는데 현실적으로 문제가 있다. 이차림의 경우 환경조건에 따른 종간 및 종내 경쟁에 의하여 임목밀도가 자연적으로 조절되기 때문에 기존 산림식생에서 보고된 현존량 회귀식을 다른 산림식생에 적용하더라도 적합도가 비교적 높은 것으로 보고된 바 있다(Schmitt and Grigall, 1981; Tritton and Hornbeck, 1982). 수고를 측정하는 과정에서 입지적인 요건에 따라 오차가 발생할 수 있어 흉고직경(D)을 독립변수로 하는 본 연구지소의 연구조건과 유사성이 있는 상대생장식을 이용하여 지상부의 현존량을 추정하였으며 적용한 상대생장식을 Table 1에 정리하였다.

2013년 9월에 조사지소 내에 수목의 평균 수고를 토대로 추정된 10 × 10m의 영구방형구를 각 2개씩 설치하고, 영구방형구 내부의 흉고직경이 2cm 이상 되는 수목의 흉고직경을 측정 후, 다음해의 측정을 위해 측정위치를 수목포인트를 이용하여 표기하였고, 2014년 9월에 동일위치에서 흉고직경을 측정하였다. 측정된 흉고직경을 상대생장식에 대입하여 현존량을 계산하였고, 다음해의 현존량(W₂)에서 당년 현존량(W₁)을 뺀 값을 각각 연간 순생산량(ΔW = W₂ - W₁)으로 하였다. 신갈나무 잎의 경우 당년에 생산되어 당년 가을에 낙엽으로 전부 고사하고, 소나무 잎의 경우 연중 낙엽생산을 통해 매월 일정량 낙하하므로 잎의 연간 순생산량은 조사지소에 설치되어 있는 낙엽수거기에서 수거된 연간 낙엽생산량을 이용하여 단위면적당(ha)으로 계산하였다. 또한 신갈나무림의 지하부 현존량 추정은 Rodin and Bazilevich(1967)에 의하면 뿌리부가 15~35%를 차지하는 것으로 보고한 바 있어, 본 연구에서 지하부의 현존량은

지상부 현존량의 25%를 적용하여 추정하였으며(Johnson and Risser, 1974), 소나무림의 경우 기존에 보고된 상대생장식을 대입하여 추정하였다.

식물체의 유기탄소량은 신갈나무림의 경우 건량의 45%를(Houghton *et al.*, 1983), 소나무림의 경우 건량의 50%를(Satoo and Madgwick, 1982; Song and Lee, 1996) 유기탄소량으로 추정하였다. 연간 유기탄소 순생산량은 다음해의 유기탄소량(C₂)에서 당년 유기탄소량(C₁)을 뺀 값을 각 기관별 연간 유기탄소 순생산량(ΔC = C₂ - C₁)으로 계산하였다.

3. 낙엽생산량

낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량을 정량하기 위해 2013년 9월에 조사지소 내에 입구의 넓이가 0.5 m²의 원형 낙엽수거기(littertrap)를 수종 당 각각 6개를 설치하였다. 2014년 8월까지 매월 낙엽수거기에 들어있는 낙엽과 낙지를 수거하였으며, 수거한 낙엽은 잎, 목질부(가지와 수피), 생식기관, 기타 등으로 분류한 다음 60℃ 건조기에서 48시간 이상 향량이 될 때까지 건조시킨 후 칭량하였다. 칭량이 끝난 샘플은 마쇄한 후 각 샘플 당 3반복으로 Elemental Analyzer(EA1112, Thermo Fisher Scientific Inc.)를 사용하여 유기탄소를 분석하였다. 낙엽수거기에 연간 회수된 낙엽의 건중량을 기초로 단위면적(ha) 당 낙엽생산량을 계산하였으며, 연간 임상으로 유입되는 유기탄소량은 낙엽생산량에 유기탄소함량을 적용하여 계산하였다.

4. 임상낙엽층

임상낙엽층의 낙엽량 및 유기탄소량을 정량하기 위하여 2013년 9월부터 2014년 8월까지 매 분기마다 5개의 25 × 25cm 소형방형구를 임상별로 영구방형구 외부에 임의로 5개씩 설치 후 방형구 내에 있는 임상 낙엽을 L층(litter layer)과 F층(fermentation layer)으로 구분하여 수거하였다.

Table 1. Biomass allometric equations of the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* forest in the study area

Biomass allometric equations of <i>Quercus mongolica</i> Forest		Biomass allometric equations of <i>Pinus densiflora</i> Forest	
Son <i>et al.</i> , 2005a	Son <i>et al.</i> , 2005b	Son <i>et al.</i> , 2011	Noh, 2011
log Wsw = 1.779 + 2.624log(D)	log Wsw = 2.389 + 2.110 log(D)	log Wsw = 2.062 + 2.157 log(D)	log Wsw = 1.5679 + 2.4998 log(D)
log Wsb = 1.365 + 2.375log(D)	log Wsb = 2.122 + 1.718 log(D)	log Wsb = 1.437 + 1.945 log(D)	log Wsb = 1.3574 + 2.0026 log(D)
log Wlb = 0.737 + 2.971log(D)	log Wlb = 0.175 + 3.746 log(D)	log Wlb = 1.200 + 2.392 log(D)	log Wlb = 1.2457 + 2.2682 log(D)
log Wdb = 1.127 + 1.381log(D)	log Wdb = 0.458 + 2.622 log(D)	log Wdb = 1.335 + 1.675 log(D)	log Wl = 1.6482 + 1.5669 log(D)
log Wb = 0.517 + 1.904log(D)	log Wb = 0.343 + 2.331 log(D)	log Wl = 1.305 + 2.008 log(D)	log Wr = 1.3010 + 2.3704 log(D)

sw : stem wood, sb : stem bark, lb : live branch, db : dead branch, b : branch, l : leaf, r : root

수거한 낙엽은 낙엽, 목질부, 생식기관, 기타로 분류하였으며, 구분이 모호한 낙엽층은 기타로 분류한 후, 60°C 건조기에 향량이 될 때까지 건조시킨 후 칭량하여 단위면적(ha)당 임상 낙엽량을 계산하였으며, 마쇄한 샘플은 밀폐시켜 보관한 후 각 샘플 당 3반복으로 Elemental Analyzer(EA1112, Thermo Fisher Scientific Inc.)를 사용하여 유기탄소를 분석하였다.

5. 토양채취 및 유기탄소 분석

2013년 9월부터 2014년 8월까지 매 분기별로 영구방형 구 밖의 임의로 선정된 세 지점에서 지표로부터 50cm 깊이까지 10cm 간격으로 토양을 채취하여 밀봉한 후 실습실로 운반하였다. 채취한 토양은 음건시켜 2mm 체로 친 후 석력함량을 계산한 후에 유기탄소 분석에 사용하였다. 토양 깊이별 5개씩 음건시킨 토양샘플 5g 을 도가니에 넣고 105°C 건조기에서 48시간 이상 건조시킨 후 칭량한 다음 600°C 전기로에서 4시간 정도 작열시켜 건중량에서 회분량을 빼어 토양의 유기물함량을 계산하였다. 유기물함량을 1.724로 나누어 유기탄소 함량을 계산하였으며(Black, 1965), 단위면적당 50cm 깊이까지 분포하는 유기탄소량($\text{ton C ha}^{-1} 50 \text{ cm-depth}^{-1}$)은 토양의 유기탄소 함량에 가비중과 석력함량을 곱하여 추정하였다.

6. 토양호흡

토양호흡을 통해 대기 중으로 방출되는 CO₂ 발생량은 2013년 9월부터 2014년 8월까지 15일 전후로 12개월 동안 정기적으로 매달 1회씩 토양호흡이 가장 원활이 발생하는 시간대인 11:00~13:00 사이에 10개 지점에서 각각 3회씩 토양호흡을 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 값들의 평균값을 사용하였다. 측정방법은 휴대용 적외선 가스 분석기(IGRA; EGM-4 PP system, UK)를 사용하여 dynamic

closed chamber method를 이용하였다. 측정지점 간의 오차를 줄이기 위해서 수관의 폭을 고려하여 수관이 서로 겹치는 임의의 지점에서 토양호흡을 측정하였고, 측정된 토양호흡량에서 신갈나무림의 경우 31%를, 소나무림의 경우 49%를 각각 뿌리호흡량으로 추정하였다(Lee *et al.*, 2010; Nakane, 1983).

결과 및 고찰

1. 식물체의 유기탄소 분포량 및 순 생산량

본 조사지역 신갈나무림과 소나무림의 조사기간 동안 평균 유기탄소 분포량은 각각 143.84 ± 4.88 , $42.94 \pm 0.72 \text{ ton C ha}^{-1}$ 으로 신갈나무림의 현존 유기탄소 분포량이 소나무림에 비해 3배 이상 높은 것으로 나타났으며(Table 2), 각 기관별 유기탄소 분포량은 두 수종에서 모두 줄기 > 뿌리 > 가지 > 잎과 생식기관의 순으로 나타났다. 본 신갈나무림의 유기탄소 분포량은 Won *et al.* (2014)이 보고한 월악산 신갈나무림의 유기탄소 분포량 $99.69 \text{ ton C ha}^{-1}$ 보다 다소 높은 것으로 나타났으며, 소나무림의 유기탄소 분포량은 Lee *et al.* (2013)이 보고한 월악산 소나무림의 $68.50 \text{ ton C ha}^{-1}$ 보다 다소 낮은 것으로 나타났다. Kimmins (1987)은 유사한 산림군집의 경우 유령림에서 수령이 증가함에 따라 현존량과 순 생산량이 모두 증가한다고 보고한 바 있어, 조사지소별 유기탄소 분포량의 차이는 수종, 임목밀도, 수령 등의 차이에 따른 것으로 판단된다.

조사기간 동안 신갈나무림과 소나무림의 유기탄소 순 생산량은 각각 10.64 ± 1.23 , $3.64 \pm 0.84 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로, 현존 유기탄소량과 마찬가지로 신갈나무림의 유기탄소 순 생산량이 소나무림에 비해 3배 이상 높은 것으로 나타났다. Won *et al.* (2014)은 월악산 신갈나무림의 2013년 유기탄소 순생산량을 $5.19 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로, Lee *et al.* (2013)은 월악산 소나무림의 2012년 유기탄소 순생산량을 4.26 ton

Table 2. Average of standing carbon(ton C ha^{-1}) and net increase of carbon($\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) of the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* forest in the study area

Component	Standing carbon(Aver. \pm SD)		Net increase(Aver. \pm SD)	
	<i>Q. mongolica</i>	<i>P. densiflora</i>	<i>Q. mongolica</i>	<i>P. densiflora</i>
Leaf+Rep.Organ	1.44 ± 0.61	1.11 ± 0.29	2.88 ± 0.18	2.21 ± 0.36
Branch	24.28 ± 1.05	7.36 ± 0.2	1.49 ± 0.39	0.29 ± 0.14
Stem	89.36 ± 3.46	25.89 ± 0.66	4.89 ± 0.24	0.94 ± 0.08
Root	28.77 ± 0.98	8.59 ± 0.15	1.38 ± 0.10	0.2 ± 0.03
Total	143.85 ± 4.88	42.95 ± 0.73	10.64 ± 1.23	3.64 ± 0.84

Aver. : Average Rep. Organ : Reproductive Organ

C ha⁻¹ yr⁻¹ 로 보고하여 본 조사지소의 유기탄소 순생산량은 신갈나무림의 경우 월악산 지역보다 2배 가량 높았으나, 소나무림의 경우 두 지소간 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 조사지소별 임목밀도, 수령, 토양의 비옥도에 따른 것으로 판단된다(Lee and Mun, 2005; Choi *et al.*, 2006).

2. 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량

본 조사지소의 신갈나무림과 소나무림에서 낙엽생산은 연중 계속되었으며, 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 신갈나무림의 경우 11월에 33.7%(0.95 ton C ha⁻¹), 소나무림의 경우 10월에 23.4%(0.51 ton C ha⁻¹)로 두 군락에서 모두 가을철에 집중되는 것으로 나타났다(Figure 2).

조사기간 동안 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 신갈나무림과 소나무림에서 각각 2.83, 2.18 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 로 군락 간에 큰 차이를 보이지 않았다. Lee (2011)는 서울 남산의 신갈나무림과 소나무림에서 낙엽에 의하여 임상으로 유입되는 유기탄소량을 각각 2.89, 2.78 ton C ha⁻¹ yr⁻¹로 보고하여 본 조사의 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량과 유사하였다. 일반적으로 낙엽생산량은 산림식생을 구성하고 있는 우점 수종, 임목밀도, 수령 및 입지여건의 특성에 따라 변이가 심하며(Sharma and Ambasht, 1987), 기온, 강우량, 해충 등을 포함한 곤충 등의 외부 요인의 차이(Lousier and Parkinson, 1975)에 따라 달라질 수 있다고 보고한 바 있다.

3. 임상낙엽층의 유기탄소량

본 조사지소의 신갈나무림과 소나무림에서 조사기간 동안 임상낙엽층에 분포하는 평균 유기탄소량은 각각 4.89 ± 0.63, 6.02 ± 1.29 ton C ha⁻¹ 으로 소나무림의 임상낙엽층에 분포하는 유기탄소량이 다소 높은 것으로 나타났는데, 이는 조사지소간 임상 낙엽층 내에 분포하는 유기탄소량이

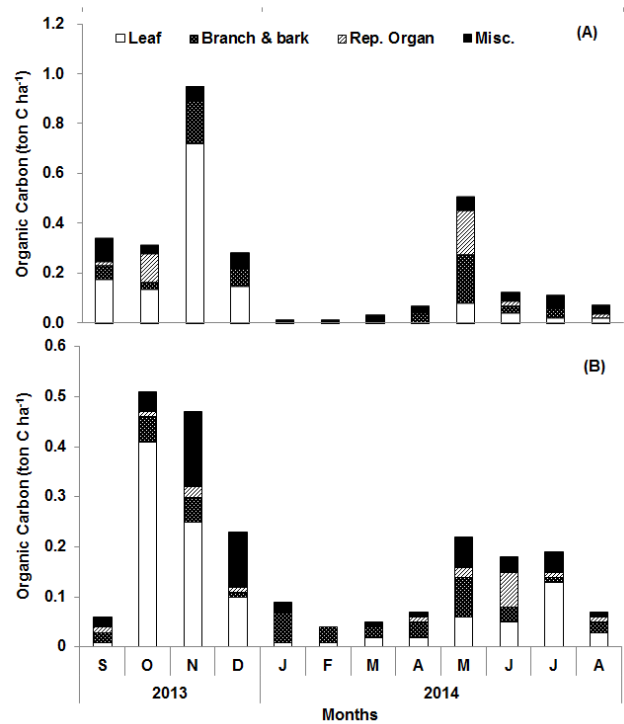


Figure 2. Seasonal organic carbon of litterfall in the *Quercus mongolica*(A) and *Pinus densiflora*(B) forest in the study area(Rep. Organ: Reproductive organ, Misc.: Miscellaneous)

산림식생을 구성하는 우점종에 따른 낙엽생산량 및 낙엽분해율의 차이에 의해 기인한 것으로 판단된다. 또한 층위별 유기탄소량은 신갈나무림에서 L층과 F층이 각각 3.19 ± 0.47, 1.70 ± 0.19 ton C ha⁻¹ 로 L층에서 다소 높았으며, 소나무림에서 L층과 F층이 각각 2.71 ± 0.51, 3.31 ± 0.83 ton C ha⁻¹ 로 F층에서 다소 높게 나타났다(Table 3). 일반적으로 조사지소간 임상층 내 층위별 낙엽량의 차이는 군락을 구성하는 우점종, 수령, 임목밀도 등의 차이에 의한 낙엽생산량 차이와 낙엽분해 속도의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 3. Seasonal changes of organic carbon(ton C ha⁻¹) in litter layer of the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* stand(mean ± SD)

Date	Layer & Forest					
	L		F		Total	
	<i>Q. mongolica</i>	<i>P.densiflora</i>	<i>Q. mongolica</i>	<i>P.densiflora</i>	<i>Q. mongolica</i>	<i>P.densiflora</i>
Sep. 2013	3.79 ± 0.58	2.83 ± 0.43	1.54 ± 0.17	2.86 ± 0.53	5.33 ± 0.66	5.69 ± 0.85
Dec. 2013	5.06 ± 0.80	2.74 ± 0.82	2.46 ± 0.37	2.46 ± .064	7.52 ± 1.17	5.20 ± 1.43
Mar. 2014	0.97 ± 0.06	2.99 ± 0.57	1.98 ± 0.17	4.05 ± 1.13	2.94 ± 0.21	7.04 ± 1.68
Jun. 2014	2.94 ± 0.45	2.28 ± 0.22	0.82 ± 0.03	3.86 ± 1.03	3.77 ± 0.47	6.14 ± 1.21
Mean ± SD	3.19 ± 0.47	2.71 ± 0.51	1.70 ± 0.19	3.31 ± 0.83	4.89 ± 0.63	6.02 ± 1.29

임상낙엽층의 유기탄소량은 L층에서 낙엽생산이 왕성한 가을부터 이듬해 봄에 높고, F층에서 여름철에 높다가 가을철에 낮게 나타났는데, 이는 여름철의 많은 강수량과 높은 온도에 의해 토양미생물의 분해활동이 활발해 분해가 빠르게 진행되기 때문인 것으로 판단된다(Mun, 2004).

4. 토양의 유기탄소 분포량

토양 내 분포하는 유기탄소량은 유기물함량, 토양가비중, 석력함량 등을 이용하여 추정하는 방법이 일반적으로 많이 이용되고 있으며(Arnold, 1995), 토양 내 유기탄소량은 일반적으로 깊이가 깊어질수록 지수적으로 감소하는 것으로 알려져 있다(Eswaran *et al.*, 1995). 이는 일차적으로 임상으로 유입되는 유기물량과 관련이 있다.

본 조사지소 신갈나무림과 소나무림 내 토양 50cm 깊이까지의 평균 유기탄소량은 각각 132.78, 59.73 ton C ha^{-1} 50cm-depth^{-1} 이었으며, 두 수종에서 모두 깊이가 깊어짐에 따라 유기탄소량이 점차 감소하는 것으로 나타났다(Figure

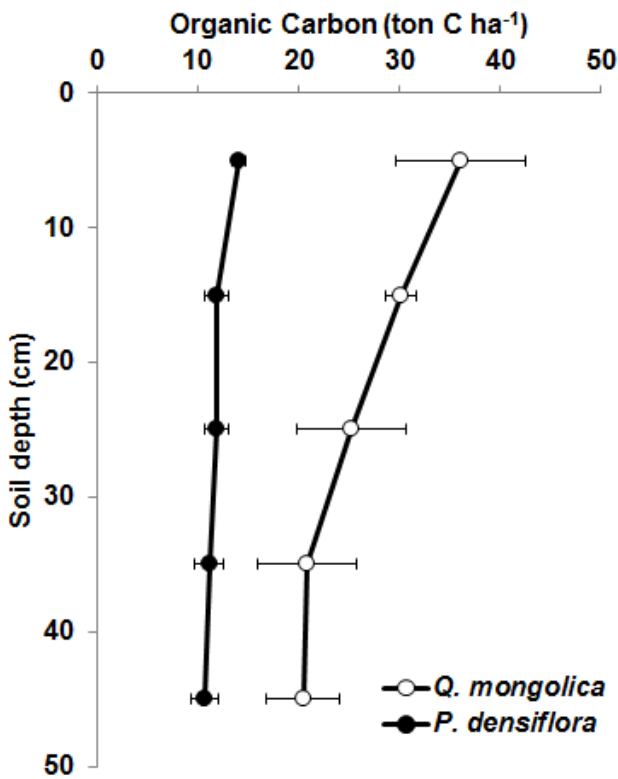


Figure 3. Variation of organic carbon along the soil depth of the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* forest in the study area. Bars indicate SD

3). 유기탄소량의 상층토에서 가장 높게 나타난 것은 지상부로부터 유입된 낙엽, 가지나 줄기 같은 유기물이 분해되어 표토층으로 유입되었기 때문이며(Armson, 1977), 세균 또한 표토층 깊이에 주로 분포하여(Park and Yim, 2004; Ruess *et al.*, 1996) 계절변화에 따른 뿌리조직 고사로 인해 토양 내 유기물량 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 활엽수림(참나무림)이 침엽수림(소나무림)에 비해 토양의 유기탄소 축적량이 높는데, 이것은 낙엽 생산량이 소나무림에 비해 많고(Mun *et al.*, 2007), 침엽수 낙엽에 비해 활엽수의 낙엽 분해율이 빠르기 때문인 것으로 판단된다(Mun and Kim 1992). 토양 내 유기탄소량은 조사지소별 토양 유형, 산림식생을 구성하는 우점종, 유효수분함량, 점토함량 등에 따라 차이가 발생하는 것으로 알려진 바 있다(Grigal and Ohmann, 1992). 또한, 각 조사지소별 토양 내 유기탄소량은 산림식생에 따른 낙엽생산 및 낙엽분해 등의 생물학적 요인과 기온, 강우 및 입지여건에 따른 토양의 성질 등과 같은 환경적 요인의 차이에 의해 기인한 것으로 판단된다.

5. 토양호흡량

산림생태계에서 탄소순환 과정 중 토양에서 대기로 이산화탄소가 방출되는 과정을 토양호흡이라 하며, 토양호흡은 크게 미생물호흡과 뿌리호흡의 합으로 나타내어진다(Hanson *et al.*, 2000). 본 조사지소의 신갈나무림과 소나무림에서 조사기간 동안 평균 토양호흡량은 각각 0.46, 0.40 $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 이었다. 계절에 따른 토양호흡량은 신갈나무림과 소나무림에서 여름철인 8월에 각각 1.08, 0.98 $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$

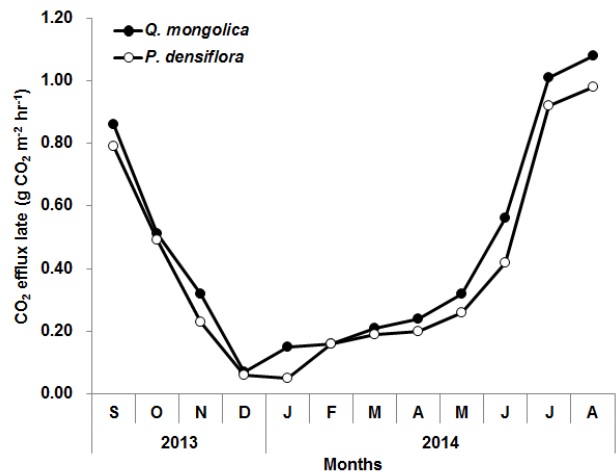


Figure 4. Seasonal soil respiration of the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* forest in the study area

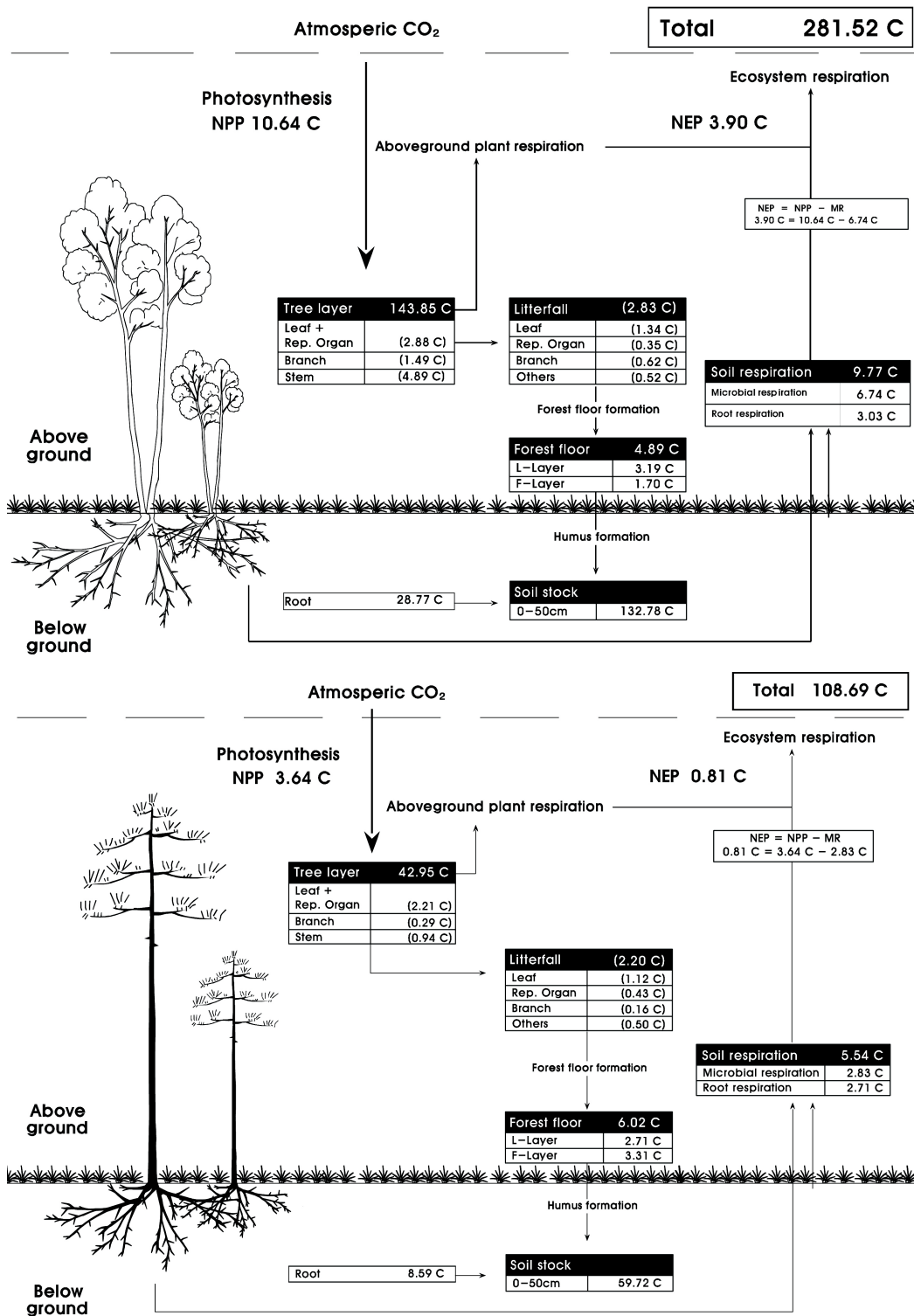


Figure 5. Compartment model showing the distribution and flow organic carbon of the *Quercus mongolica*(top) and *Pinus densiflora*(bottom) forest in the study area Box: standing carbon(ton C ha⁻¹), arrow: flux(ton C ha⁻¹yr⁻¹). Parenthesis indicate NPP(ton C ha⁻¹ yr⁻¹)

hr⁻¹ 로 가장 높았고, 겨울철인 12월(신갈나무)과 1월(소나무)에 각각 0.07, 0.05 g CO₂ m⁻² hr⁻¹ 로 가장 낮은 것으로 나타나, 동절기에서 하절기로 갈수록 토양호흡량이 증가하는 경향을 보였다(Figure 4). 이는 토양온도와 토양수분의 증가에 따른 미생물 활동이 활발하게 이루어져 미생물호흡을 통해 방출되는 이산화탄소의 증가 및 식물생장에 따른 뿌리호흡을 통해 방출되는 이산화탄소의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

산림생태계의 생태계 순 탄소흡수량은 순일차생산량과 미생물호흡에 의해 결정되므로 생태계 순 탄소흡수량을 측정하기 위해서는 미생물호흡과 뿌리호흡의 정확한 추정이 필요한 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2003). 그러나 본 조사지소의 입지여건상 실험방법상의 문제로 미생물호흡 측정에 어려움이 있어 동일수종을 대상으로 보고된 뿌리호흡량의 평균값을 이용하여 총 토양호흡량에서 뿌리호흡량을 제외하여 미생물호흡량을 추정하고 각 군락의 탄소수지를 계산하는데 사용하였다. 국내에서 Lee *et al.* (2010)은 참나무속 우점림의 뿌리호흡을 토양호흡량의 31%라고 보고하였고, Nakane *et al.* (1983)은 일본의 유사기후대에 분포하는 80년생 소나무림에서 토양호흡 중 뿌리호흡이 차지하는 비율이 47~51%의 범위에 있다고 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서 토양호흡을 통해 방출되는 이산화탄소의 비율을 신갈나무림의 경우 31%, 소나무림의 경우 49%로 감안하였을 때 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 유기탄소량은 신갈나무림에서 각각 6.74, 3.03 ton C ha⁻¹ yr⁻¹, 소나무림에서 각각 2.83, 2.71 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 으로 추정되었다.

6. 유기탄소 분포와 수지

본 조사지소 신갈나무림과 소나무림의 각 탄소저장고 별 유기탄소 분포와 순환을 Figure 5에 종합하였다. 조사기간 동안 각 구성원별 유기탄소 분포량은 신갈나무림에서 지상부 생물량에 115.08 ton C ha⁻¹(41.2%), 지하부 생물량에 28.77 ton C ha⁻¹(10.2%)로 식물체 전체에 143.85 ton C ha⁻¹(51.3%)가 축적되어 있었다. 신갈나무림의 임상낙엽층에는 4.89 ton C ha⁻¹(1.8%), 토양에는 132.78ton C ha⁻¹(46.9%)가 분포하여 식물체에 가장 많은 탄소가 분포하고 있었다. 소나무림의 각 구성원별 유기탄소 분포량은 지상부 생물량에 34.36 ton C ha⁻¹(32.3%), 지하부 생물량에 8.59 ton C ha⁻¹(7.8%)로 식물체 전체에 42.95 ton C ha⁻¹(40.1%)가 축적되어 있었다. 소나무림의 임상낙엽층에는 6.02 ton C ha⁻¹(5.5%), 토양에는 59.72ton C ha⁻¹(54.4%)가 분포하여 토양에 가장 많은 탄소가 분포하고 있었다. 신갈나무림과 소나무림에서 순 광합성을 통하여 식물체에 고정된 평균

유기탄소량은 각각 10.64, 3.64 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 이었으며, 토양호흡을 통하여 방출되는 유기탄소량은 신갈나무림과 소나무림에서 각각 9.77, 5.54 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 로 나타났다. 신갈나무림의 토양호흡량중 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 유기탄소량은 각각 6.74, 3.03 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 이었고, 소나무림의 경우 각각 2.83, 2.71 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 이었다. 본 조사지소 신갈나무림과 소나무림의 유기탄소 연순생량과 미생물호흡량의 차이로 추정된 생태계 순 탄소흡수량은 각각 3.90, 0.81 ton C ha⁻¹ yr⁻¹ 으로, 신갈나무림의 유기탄소 흡수능력이 소나무림에 비해 현저히 높은 것으로 나타났고, 두 군락에서 모두 대기 중의 CO₂를 순흡수하여 대기환경 개선에 Positive(+)요인으로 작용하였으며(Figure 4), 유기탄소 흡수원(Sink)으로서의 역할을 수행하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “국가장기생태연구사업”의 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Armson, K.A.(1977) Forest Soils: Properties and processes. University of Toronto Press, Toronto, 390pp.
- Arnold, R.W.(1995) Role of soil survey in obtaining a global carbon budget. In: Lal, R., J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart(ed.) Soils and Global Change, pp. 257-263.
- Black, C.A.(1965) Methods of soil analysis, Part 2. American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, pp. 1562-1565.
- Choi, H.J., I.Y. Jeon, C.H. Shin and H.T. Mun(2006) Soil properties of *Quercus variabilis* forest on Youngha valley in Mt. Worak National Park. J Ecol Field Biology 29: 439-443.
- Eswaran, H., E. Van den Berg, P. Reich and J. Kimble(1995) Global soil carbon resources. In: Lal, R., J.M. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart(ed.) Soils and Global Change, CRC-Press, pp. 27-44.
- Grigal, D., F. Ohmann, L., F(1992) Carbon storage in upland forests of the Lake States. Soil Sci. Am. J. 56: 935-945.
- Han, Y.(2002) Carbon cycle modelling by litter decomposition rate and estimation of carbon dioxide budget in *Quercus mongolica* Forest at Mt. Songni National Park. Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, 207pp
- Hanson, P.J., N.T. Edwards, C.T. Garten and J.A. Andrews(2000) Separation root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observation. Biogeochemistry 48: 115-146.

- Houghton, R.A., J.E. Hobbie, J.M. Melillo, B. Moore, B.J. Peterson, G.R. Shaver, G.M. Woodwell(1983) Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecol. Monogr.* 53: 235-262.
- Hwang, J.H and Y.H. Son(2002) Effects of thinning, liming and litter layer treatments on Soil CO₂ efflux and litter decay in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantations. *Kor. For. Soc.* 91(4): 471-479.(in Korean with English abstract)
- Hwang J.H., S.W. Bae, K.J. Lee, K.S. Lee, H.S. Kim(2008) Short-term effect of thinning on aboveground carbon storage in Korean pine(*Pinus koraiensis*) plantation. *Kor. For. Soc.* 97(6): 605-610.(in Korean with English abstract)
- IPCC(2007) Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of working group I, II and III to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva, Switzerland, 104pp.
- Jo H.K and G.S Han(1999). Case of Chunchon = Comparison of soil characteristics and carbon storage between urban and natural lands. *J. of Forest Science.* 15: 71-76.(in Korean with English abstract)
- Johnson, F.L., P.G. Risser(1974) Biomass, annual net primary production and dynamics of six mineral elements in a post oak-blackjack oak forest. *Ecology* 55: 1246-1258
- Kang, S.J. and A.K. Kwak(1998) Comparisons of phytomass and productivity of watershed forest by allometry in South Han River. *J. Kor. For. En.* 17(1): 8-22.
- Kimmins, J.P.(1987) *Forest Ecology.* MacMillan Publishing Company, New York, 531pp.
- Lee, K.J. and H.T. Mun(2005) Organic carbon distribution in an oak forest. *Kor. J. Ecol.* 28(5): 265-270.(in Korean with English abstract)
- Lee, M.S., K. Nakane, T. Nakatsubo and H. Koizumi(2003) Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil* 255: 311-318.
- Lee, N.Y., J.W. Koo, N.J. Noh, J. Kim, Y. Son(2010) Autotrophic and heterotrophic respiration in needle fir and *Quercus*-dominated stands in a cool-temperate forest, central Korea. *J. Plant Res.* 123: 485-495
- Lee, J.Y., D.K. Kim, H.Y. Won, H.T. Mun(2013) Organic carbon distribution and budget in the *Pinus densiflora* forest at Mt. Worak National Park. *Kor. J. of Env. Ecol.* 27(5): 561-570.(in Korean with English abstract)
- Lee, S.K.(2011) Production and decomposition and organic carbon distribution in *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica* and *Robinia pseudoacacia* Forest at Mt. Nam. M.S. Thesis, Kongju National University, pp. 22-26.
- Lousier, J.D. and D. Parkinson(1975) Litter decomposition in a cool temperate deciduous forest. *Journal of Botany* 54: 419-436.
- Mun, H.T. and J.H. Kim(1992) Litterfall, decomposition, and nutrients dynamics of litter in red pine (*Pinus densiflora*) and Chinese thuja (*Thuja orientalis*) stands in the limestone area. *Korean J Ecology* 15: 147-155.
- Mun, H.T., S.J. Kim, and C.H. Shin(2007) Litter production and nutrient contents of litterfall in oak and pine forests at Mt. Worak National Park. *J Ecol Field Biol* 30: 63-68.
- Mun, H.T(2004) Decay rate and nutrients dynamics during decomposition of Oak branches. *J. of Ecol. Env.* 27(2): 97-98.(in Korean with English abstract)
- Nakane, K., M. Yamamoto and H. Tsubota(1983) Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Japanese J. Ecol.* 33: 397-408.
- Namgung, J.(2010) Carbon budget and nutrient cycling in the *Quercus variabilis* forest at Mt. Worak National Park. Ph.D. Thesis, Kongju National University, pp. 152-156.
- Namgung, J., H.J. Choi, A.R. Han and H.T. Mun(2008) Organic carbon distribution and budget in the *Quercus variabilis* forest in the Youngha valley of Worak National Park. *Kor. J. Env. Ecol.* 26(3): 170-176.(in Korean with English abstract)
- Noh, N.J.(2011) Carbon and Nitrogen Dynamics in Natural *Pinus densiflora* Forest with Different Stand Densities. Ph.D. Thesis, Korea University, pp. 22-23.
- Park K.S.(1999) Aboveground and soil carbon storages in *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis* natural forest ecosystems in Chungju. *Kor. For. Soc.* 88(1): 93-100.(in Korean with English abstract)
- Park, G.S. and J.G. Lim(2004) Annual carbon storage by fine root production in *Quercus variabilis* forests. *Kor. J. Env. Eco.* 17(4) : 360-365.(in Korean with English abstract)
- Pyo, J.H., S.U. Kim and H.T. Mun(2003) A study on the carbon budget in *Pinus koreansis* plantation. *Kor. J. Ecol.* 26(3): 129-134.(in Korean with English abstract)
- Rodin, L.E. and N.I. Bazilevich(1967) Production and mineral cycling in terrestrial vegetation. Oliver and Boyd, London, England, 288pp.
- 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. *Car J For Res* 26: 1326-1336.
- Satoo, T. and H.A.I. Madgwick(1982) *Forest Biomass.* Martinus Nijhoff. Dr. W. Junk Publishers, 152pp.
- Schmitt, M.D.C. and D.F. Grigal(1981) Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh. *Can J For Res* 11(4): 837-840.
- Sharma, E. and R.S. Ambasht(1987) Litterfall, decomposition and nutrient release in an age sequence of *Alnus nepalensis* planta-

- tion stands in the eastern Himalaya. *Ecology* 75: 997-1010.
- Son, Y.M., K.H. Lee, L.H. Kim, J.K. Pyo, I.H. Park, Y.H. Son, Y.J. Lee, C.S. Kim(2011) Development of carbon emission factors and biomass allometric equations by major species in Korea. *Kor. For. Soc.* 2011(2011): 1088-1090(in Korean)
- Son, Y.H., M.J. Lee, D.Y. Kim, H.O. Jin, I.H. Park(2005) Effects of the changes in local environments on the nutrient cycling of the mature Oak stands in Korea. Korea Science and Engineering Foundation. Rep. Korea. 28pp.
- Song, C.Y. and S.U. Lee(1996) Biomass and Net Primary Productivity in Natural Forests of *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis*. *J. Kor. For. Soc.* 85(3): 443-452.
- Tritton, L.M. and J.W. Hornbeck(1982) Biomass equations for major tree species of the Northeast. United States Department of Agriculture Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, General Technical Report, NE-69, 46pp.
- Waring, R.H. and W.H. Schlesinger(1985) *Forest Ecosystems; Concept and Management*. Academic Press, New York, 340pp.
- Winjum, J.K., R.K. Dixon and P.E. Schroeder(1992) Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water, Air and Soil Pollut* 64: 213-227.
- Won, H.Y., C.H. Shin, H.T. Mun(2014) Valuation of ecosystem services through organic carbon distribution and cycling in the *Quercus mongolica* forest at Mt. Worak National Park. *J. of Wetl. Res.* 16(3): 315-325.(in Korean with English abstract)