

## 월악산 소나무림의 유기탄소 분포 및 수지<sup>1a</sup>

이지영<sup>2</sup> · 김덕기<sup>2</sup> · 원호연<sup>2</sup> · 문형태<sup>3\*</sup>

### Organic Carbon Distribution and Budget in the *Pinus densiflora* Forest at Mt. Worak National Park<sup>1a</sup>

Ji-Young Lee<sup>2</sup>, Deok-Ki Kim<sup>2</sup>, Ho-Yeon Won<sup>2</sup>, Hyeong-Tae Mun<sup>3\*</sup>

#### 요약

월악산국립공원 송계계곡에 발달되어 있는 소나무림에서 2011년 5월부터 2012년 4월까지 지상부와 지하부 생물량, 낙엽생산량, 낙엽층의 낙엽량, 그리고 토양의 유기탄소 분포를 조사하였으며, 탄소수지를 파악하기 위해 토양호흡량을 측정하였다. 지상부와 지하부 생물량에 분포되어 있는 유기탄소량은 각각 52.25, 14.52 ton C ha<sup>-1</sup> 이었으며, 낙엽층과 토양의 유기탄소량은 각각 4.71 ton C ha<sup>-1</sup>, 58.56 ton C ha<sup>-1</sup> 50cm-depth<sup>-1</sup> 로 조사되었다. 조사지 소나무림의 전체 유기탄소량은 130.04 ton C ha<sup>-1</sup> 이었으며, 이중 51.4%가 식물체에 분포하는 것으로 나타났다. 본 소나무림에서 연간 광합성을 통하여 식물체에 고정된 유기탄소량은 4.26 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이었고, 층위별로는 교목층, 관목층, 초본층에 각각 4.12, 0.10 및 0.04 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>의 유기탄소가 고정되었다. 조사기간 동안 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 1.62 ton C ha<sup>-1</sup> 이었으며, 토양호흡을 통하여 방출되는 탄소량은 6.25 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>으로 이중 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 탄소량은 각각 3.19, 3.06 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이었다. 유기탄소 순 생산량과 미생물호흡량의 차이로 추정했을 때 본 소나무림에서 연간 대기로부터 순 흡수하는 유기탄소는 1.07 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup> 로 조사되었다.

주요어: 낙엽, 순 생산량, 토양호흡, 소나무림

#### ABSTRACT

Organic carbon distribution and carbon budget of a *Pinus densiflora* forest in the Songgye valley of Mt. Worak National Park were investigated. Carbon in above and below ground standing biomass, litter layer, and soil organic carbon were measured from May 2011 through April 2012. For the estimation of carbon budget, soil respiration was measured. The amount of carbon allocated to above and below ground biomass was 52.25 and 14.52 ton C ha<sup>-1</sup>. Amount of organic carbon in annual litterfall was 4.71 ton C ha<sup>-1</sup>. Amount of organic carbon within 50cm soil depth was 58.56 ton C ha<sup>-1</sup> 50cm-depth<sup>-1</sup>. Total amount of organic carbon in this *Pinus densiflora* forest was estimated to 130.04 ton C ha<sup>-1</sup>. Amount of organic carbon in tree layer, shrub and herb layer was 4.12, 0.10 and 0.04 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup> and total amount of organic carbon was 4.26 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>. Amount of organic carbon returned to the forest via litterfall was 1.62 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>. The amount of carbon evolved through soil respiration was 6.25 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>. The amount of carbon evolved through microbial respiration and root respiration was 3.19 and 3.06 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>. The amount of organic carbon absorbed from the atmosphere of this *Pinus densiflora* forest was 1.07 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup> when it was estimated from the difference between Net Primary Production and microbial respiration.

1 접수 2013년 6월 28일, 수정(1차: 2013년 10월 25일, 2차: 2013년 10월 28일), 게재확정 2013년 10월 29일  
Received 28 June 2013; Revised (1st: 25 October 2013, 2nd: 28 October 2013); Accepted 29 October 2013

2 공주대학교 생명과학과 Dept. of Life Science, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

\* 교신저자 Corresponding author: htmun@kongju.ac.kr

**KEY WORDS: LITTERFALL, NET PRODUCTION, SOIL RESPIRATION, PINE FOREST**

## 서론

최근 온실효과에 따른 기후변화에 전 세계적인 관심이 집중되고 있다. 온실효과를 일으키는 물질은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 6불화황(SF<sub>6</sub>) 등이 있으며(Kyoto Protocol, 1997), 이중 온실효과를 일으키는 기여도는 CO<sub>2</sub>가 가장 높은 것으로 알려져 있다. CO<sub>2</sub>는 자연적, 인위적인 활동을 통해 대기 중으로 방출되는 온실가스 중의 하나이며, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 산업화 이전의 280 ppm에서 2005년에는 379 ppm으로 증가하였고, 연간 CO<sub>2</sub> 증가율이 최근 10년 동안 가장 높아 평균 1.9 ppm yr<sup>-1</sup>의 증가를 보이고 있다(IPCC, 2007). 이에 따라 전 세계적으로 기후변화협약을 통해 탄소배출권, 저탄소녹색성장, 녹색기술, 에너지 절감 등의 방법을 동원하여 온실가스를 줄이는 실질적인 방안을 논의하고 있으며, 2012년 제18차 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서는 2013~2020년까지 선진국의 온실가스 의무 감축을 규정하는 교토의정서 개정안이 채택되었다(Post-2012, 2012).

산림생태계가 육상생태계 내 지상부 탄소축적량의 약 90%와 지하부 탄소축적량의 40%를 차지하고 있으며(Waring and Schlesinger, 1985), 지구에서 육지와 대기사이의 탄소순환이 해양과 대기 간 탄소순환보다 크므로(Winjum et al., 1992) 산림생태계는 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도 증가 억제를 위한 유용한 매개체로서 큰 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 또한, 산림생태계 내에서 일어나는 탄소 순환 기작의 규명은 기후변화와 관련하여 매우 중요한 과제로 인식되고 있으며, 그 중 임목 생장을 통해 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 흡수시키는 방안에 관심이 집중되고 있다(Kimble et al., 2003; Johnson et al., 2004). 산림생태계와 대기권 사이의 탄소 유동량을 파악하기 위해서는 산림생태계의 유기탄소량을 파악해야 한다(Pregitzer, 2003). 주로 유기물 형태로 존재하는 산림생태계 내 유기탄소는 지상부와 지하부 생물량, 고사한 목질부와 낙엽, 임상 낙엽층, 하층식생, 그리고 토양에 분포하고 있다(Dixon et al., 1994; Boyland 2006; Jeon et al., 2007). 산림생태계에서 낙엽생산은 토양으로의 유기물 유입과 관련된 과정으로(Bray and Gorham, 1964; Rodin and Bazilevich, 1967), 산림생태계에서 식물체의 생산 중 일부가 낙엽의 형태로 임상으로 유입되며, 임상으로 유입된 낙엽은 임상 내 낙엽층을 유지시키고, 토양으로 양분을 재순

환시키는 역할을 수행한다(Abugre et al., 2011). 토양 내 유기탄소량은 지구 내 탄소량의 약 50% 이상을 차지하고 있기 때문에(Vitousek, 1991), 산림토양 내 탄소량의 정확한 규명이 산림을 통한 CO<sub>2</sub>의 흡수 및 저장능력을 이해하는데 필수적이다(Morris and Paul, 2003).

토양호흡은 전 지구적 탄소 순환에서 두 번째로 큰 플럭스(75×1,015 g C yr<sup>-1</sup>)로 알려져 있으며(Bond-lamberty et al., 2004), 산림 토양호흡은 미생물호흡과 뿌리호흡의 합으로(Hanson et al., 2000; Zhou et al., 2009), 토양생물과 뿌리의 활동을 나타내는 지표가 된다(Coleman, 1973). 최근에는 토양으로부터 발생하는 CO<sub>2</sub>를 정량화하여 산림생태계의 탄소 순환을 정확히 예측하려는 연구가 진행되고 있으나(Nakane, 1995; Raich and Tufekcioglu, 2000; Lee and Mun, 2001; Lee et al., 2012), 우리나라의 산림식생 유형에 따른 각 구성원별 탄소 저장량 및 이들 사이의 탄소 유동량과 탄소순환에 관한 연구는 많지 않은 실정이다(Han, 2002; Pyo et al., 2003; Lee and Mun, 2005; Namgung et al., 2008).

본 연구는 국가장기생태연구사업의 일환으로 월악산 국립공원에 형성되어 있는 소나무림에서 지상부와 지하부 생물량, 낙엽층, 토양의 유기탄소 저장량을 파악하고 토양호흡을 통해 방출되는 탄소량을 조사하여 조사지역의 순생태계생산량 및 탄소순환을 파악하고 산림을 통한 대기 중 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다.

## 연구방법

### 1. 조사지 개황

본 연구지소인 소나무림(*Pinus densiflora* forest)은 월악산국립공원 송계계곡의 해발고도 380m, 경사도 17°, 남서사면에 위치하고 있다(36°51' 17" N, 128°64' 41" E). 소나무림의 평균 수령은 약 35년, 평균 수고는 11.02±0.25m, 평균 흉고직경은 17.12±0.38cm 그리고 임목밀도는 1,300 그루 ha<sup>-1</sup> 이었다. 관목층은 굴참나무(*Quercus variabilis*), 쇠물푸레(*Fraxinus sieboldiana*), 땅비싸리(*Indigofera kirilowii*) 등이 낮은 피도로 분포하고 있으며, 초본층은 고사리(*Pteridium aquilinum*)와 억새(*Miscanthus sinensis*) 등이 분포하는 것으로 조사되었다. 기후적으로 한반도의 중부 내륙에 위치하여 대륙성 기후의 특색을 띄며, 조사지소로부터 약 20km 떨어진 곳에 위치한 체천 측후소의 기상자료에 따르면 조사

지역의 30년간(1980년~2010년) 평균 기온은 10.2℃, 연평균 강수량은 1,387.8mm 이었으며, 조사기간 동안 연평균 기온은 10.1℃, 연 강수량은 2,066.2mm 이었다(Figure 1).

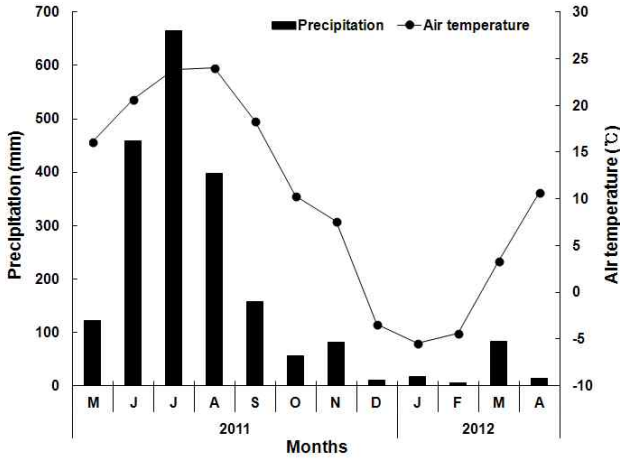


Figure 1. Seasonal precipitation (mm) and temperature (°C) from May 2011 to April 2012 at Jecheon meteorological station about 20km distance from the study area

## 2. 현존량과 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 국립공원 지역인 관계로 수확법을 적용하기가 불가능하였다. 이차림의 경우 환경조건에 따른 종간 및 종내 경쟁에 의하여 임목밀도가 자연적으로 조절되기 때문에 동일수층의 경우 지리적 차이에 따른 현존량 회귀식간에 큰 차이가 없으며, 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 Noh(2011)에 의해 보고된 상대생장식(KFRI, 미 보고)을 이용하여 지상부 및 지하부의 현존량을 추정하였다.

2011년 4월에 조사지소 내에 10m×20m의 영구방형구를 설치하고 직경이 2cm 이상 되는 수목의 흉고직경을 측정하고, 2012년 4월에 1년간 성장한 흉고직경을 다시 측정하였다. 매년 측정된 흉고직경을 기 보고된 상대생장식에 대입하여 2011년의 현존량(W<sub>1</sub>), 2012년의 현존량(W<sub>2</sub>)을 계산

하였으며, 증가량(ΔW=W<sub>2</sub>-W<sub>1</sub>)을 연순생산량으로 추정하였다. 잎의 현존량은 기 보고된 상대생장식을 이용하여 추정하였으며, 연순생산량 추정 시는 낙엽생산을 통해 입상으로 유입되는 잎과 생식기관의 양을 토대로 추정하였다.

조사지소 내 관목층과 초본층의 현존량 측정은 수확법을 이용하여 2011년 8월에 영구방형구 밖에서 임의의 방형구(1m×2m) 3개를 설치한 후 방형구내 분포하는 관목과 초본 식물을 모두 수확하였다. 수확한 샘플은 실험실로 운반하여 기관별로 구분하였으며, 60℃ 건조기에서 항량이 될 때까지 건조시켜 칭량한 후 단위면적당(ha) 현존량을 계산한 후에 연순생산량을 추정하였다. 현존량과 연순생산량에 대한 식물체 유기탄소량은 전체 건중량의 50%를 유기탄소의 양으로 추정하였다(Satoo and Madgwick, 1982; Song and Lee, 1996).

## 3. 낙엽 생산량

낙엽생산을 통해 입상으로 유입되는 유기탄소량을 정량하기 위해 2011년 4월말에 조사지소 내에 입구의 넓이가 0.5m<sup>2</sup>의 원형 낙엽수거기(littertrap) 5개를 설치하였다. 2012년 4월까지 매일 낙엽수거기에 들어있는 낙엽을 수거하였으며, 수거한 낙엽은 잎, 목질부(가지와 수피), 생식기관, 기타 등으로 분류한 다음 60℃ 건조기에서 48시간 이상 항량이 될 때까지 건조시킨 후 칭량하였다. 칭량이 끝난 샘플은 마쇄하여 유기탄소 분석에 사용하였다. 낙엽수거기에 연간 회수된 낙엽의 건중량을 기초로 단위면적(ha) 당 낙엽 생산량을 계산하였으며, 연간 입상으로 유입되는 유기탄소량은 낙엽생산량에 유기탄소함량을 적용하여 계산하였다.

## 4. 임상 낙엽층

임상 낙엽층은 낙엽의 분해정도에 따라 O<sub>i</sub> 층(Organic fibric horizon), O<sub>e</sub> 층(Organic hemic horizon), O<sub>a</sub> 층(Organic sapric horizon)으로 세분할 수 있다(Brady and Weil, 2004). 조사지소 내 임상 낙엽층의 낙엽량, 유기탄소량을 추정하기 위해 2011년 5월부터 2012년 4월까지 매 분기별로 5개의 25cm×25cm 소형 방형구를 설치 후 방형구 내에 있는 낙엽층을 O<sub>i</sub> 층, O<sub>e</sub>+O<sub>a</sub> 층으로 구분하여 수거하였다. 수거한 낙엽은 잎, 목질부(가지와 수피), 생식기관, 기타로 분류하였으며, 60℃ 건조기에서 항량이 될 때까지 건조시킨 후 칭량하여 단위면적(ha) 당 임상 낙엽량을 계산하였다. 건조시킨 샘플은 마쇄하여 유기탄소 분석에 사용하였다.

## 5. 낙엽과 임상 낙엽층 유기탄소 분석

마쇄한 샘플을 밀폐시켜 보관한 후 유기탄소 분석에 사용하였다. 건조된 낙엽시료 일정량을 도가니에 넣고 105°C 건조기에서 48시간 이상 건조시킨 후 평량한 다음 600°C 전기로에서 3~4시간 정도 작열시킨 후 건중량에서 회분량을 빼어 낙엽의 유기물함량을 계산하였다. 유기물함량을 1.724로 나누어 유기탄소량을 계산하였다(Black, 1965).

## 6. 토양채취 및 유기탄소 분석

본 조사지소에서 유기탄소량을 정량하기 위해 2011년 5월부터 2012년 4월까지 매 분기별(6월, 9월, 12월, 3월)로 영구방형구 밖의 임의로 선정된 3지점에서 지표로부터 50cm 깊이까지 10cm 간격으로 토양을 채취하여 밀봉한 후 실험실로 운반하였다. 채취한 토양은 음건시켜 2mm 체로 친 후 석력함량을 계산한 후에 유기탄소 분석에 사용하였다. 음건 시킨 토양샘플 5g을 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.

## 7. 토양호흡

토양호흡을 통해 대기 중으로 방출되는 CO<sub>2</sub> 발생량은 2011년 5월부터 2012년 4월까지 12개월 동안 정기적으로 매달 1회씩 11:00~13:00 사이에 10개 지점에서 각각 3회씩 측정하여 평균값을 사용하였다. 측정방법은 휴대용 적외선 가스 분석기(IRGA; EGM-4 PP system, UK)를 사용하여 dynamic closed chamber method를 이용하였다. 측정지점 간의 오차를 줄이기 위해서 수관폭을 고려하여 수관이 서로 겹치는 임의의 지점에서 토양호흡을 측정하였고, 측정된 토양호흡량에서 49%를 뿌리호흡량으로 추정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 식물체의 유기탄소 분포량 및 순생산량

본 소나무림에서 식물체의 유기탄소 분포량은 상대생장식을 이용하여 추정한 현존량의 50%를 유기탄소량으로 추정하였다(Satoo and Madgwick, 1982; Song and Lee, 1996). 소나무림의 유기탄소 분포량은 2011년과 2012년에 각각 66.77  $\text{ton C ha}^{-1}$ , 70.23  $\text{ton C ha}^{-1}$  로, 조사기간 중

평균 68.50  $\text{ton C ha}^{-1}$  이었다(Table 1). 층위별 평균 유기탄소 분포량은 교목층 67.25  $\text{ton C ha}^{-1}$ , 관목층 1.21  $\text{ton C ha}^{-1}$ , 초본층 0.04  $\text{ton C ha}^{-1}$  으로, 교목층이 98.18%로 대부분을 차지하였으며, 교목층의 각 기관별 유기탄소 분포량은 줄기 > 뿌리 > 가지 > 잎과 생식기관의 순으로 나타났다.

본 소나무림의 평균 유기탄소 분포량은 Kim(2006)이 보고한 함양군 42년생 소나무림의 지상부 유기탄소 분포량 32.50  $\text{ton C ha}^{-1}$  보다 높게 나타났으며, Lee(2004)가 보고한 공주지역 30년생 소나무림의 유기탄소 분포량 81.80  $\text{ton C ha}^{-1}$  보다는 낮게 나타났다. Kimmins(1987)은 유사한 산림군집의 경우 유령림에서 수령이 증가함에 따라 현존량과 순생산량이 모두 증가한다고 보고한 바 있어, 조사지소별 유기탄소 분포량의 차이는 임목밀도, 수령 등의 차이에 따른 것으로 판단된다.

조사기간 동안 소나무림의 유기탄소 순생산량은 4.26  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이었다. 교목층에서 4.12  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  로 전체 유기탄소 순생산량 중 96.71%를 차지하는 것으로 나타났다.

Satoo(1966)는 일본 소나무 조림지에서의 유기탄소 순생산량을 6.10~7.50  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 천연림에서는 7.43~7.89  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 보고한 바 있다. 국내에서 Park and Lee(1990)가 한국산 4개 지역형 30~40년생 소나무 천연림의 물질생산에 관한 연구에서 임분 전체의 유기탄소 순생산량을 안강형 소나무 1.86  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 중남부 평지형 소나무 5.40  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 중남부 고지형 소나무 6.55  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 금강형 소나무 8.25  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  로 보고한 바 있으며, Lee(1985)는 강원도산 33~42년생 소나무 천연림의 지상부의 유기탄소 순생산량을 7.93  $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 보고한 바 있다. 본 소나무림의 유기탄소 순생산량은 기 보

Table 1. Standing carbon ( $\text{ton C ha}^{-1}$ ) in 2011 and 2012, and net increase of carbon ( $\text{ton C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) of the *Pinus densiflora* forest in the study area

Component	Standing carbon		Net increase	
	2011	2012		
Tree layer	Stem	41.14	43.14	2.00
	Branch	8.52	8.92	0.40
	Leaf+Rep.Organ	2.70	3.02	1.08
	Root	13.21	13.85	0.64
	Sub-total	65.57	68.93	4.12
Shrub layer	Leaf	0.18	0.26	0.08
	Stem+Branch	0.67	0.68	0.01
	Root	0.31	0.32	0.01
	Sub-total	1.16	1.26	0.10
Herb layer	0.04	0.04	0.04	
Total	66.77	70.23	4.26	

고된 연구결과에 비해 낮게 나타났는데, 이는 조사지소별 임목밀도, 수령, 토양의 비옥도에 따른 것으로 판단된다 (Lee and Mun, 2005; Choi *et al.*, 2006).

2. 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량

본 소나무림에서 낙엽생산은 연중 계속되었으며, 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 10월과 11월에 각각 전체 낙엽생산량의 21.3%(0.34 ton C ha<sup>-1</sup>), 29.3% (0.47 ton C ha<sup>-1</sup>)로 가을철에 집중되는 것으로 나타났다 (Figure 2).

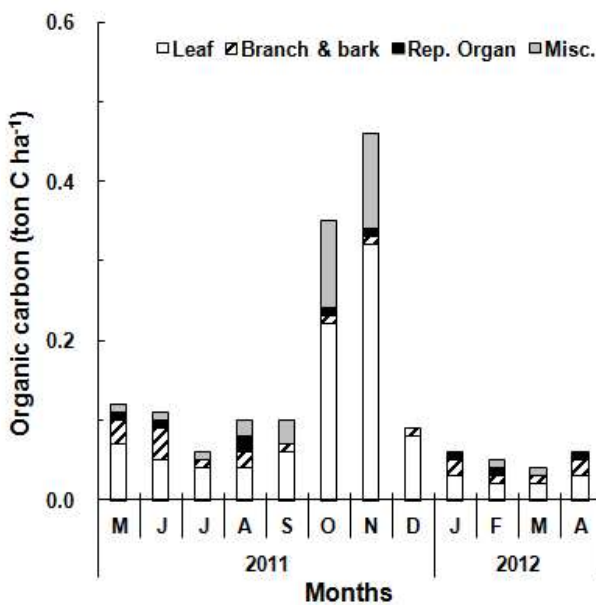


Figure 2. Seasonal organic carbon of litterfall in the *Pinus densiflora* forest in the study area (Rep. organ: Reproduction organ, Misc.: Miscellaneous)

조사기간 동안 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 1.62 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이었다. 각 기관별 유기탄소량은 잎이 60.5%(0.98 ton C ha<sup>-1</sup>)로 대부분을 차지하는 것으로 나타났으며, 기타 20.4%(0.33 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>) > 목질부 13.0%(0.21 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>) > 생식기관 6.2%(0.10 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>)의 순으로 나타났다.

본 소나무림에서 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 Jeon *et al.*(2007)이 보고한 월악산 소나무림의 1.38 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup> 보다 높았고, Kim(2006)에 의해 보고된 함양군 소나무림의 2.36 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>, Lee(2011)에 의해 보고된 남산 소나무림의 2.78 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup> 보다 낮게 나타

났다. 이는 본 조사지소 소나무 임분의 임목밀도와 평균 흉고직경이 각각 1,300 그루 ha<sup>-1</sup>, 17.12±0.38 cm 로 타 연구 대상지 임분과 비교하여 임분밀도와 평균 흉고직경이 낮은 데서 기인하며, 수령에 따른 낙엽생산량과 환경적 요인의 차이에 의한 것으로 판단된다.

일반적으로 낙엽생산량은 산림식생을 구성하고 있는 우점 수종, 임목밀도, 수령 및 입지 여건의 특성에 따라 변이가 심하며(Sharma and Ambasht, 1987), 기온, 강수량, 해충 등을 포함한 곤충 등의 외부 요인의 차이(Louisier and Parkinson, 1975)에 따라 달라질 수 있다고 보고된 바 있다.

3. 임상 낙엽층의 유기탄소량

본 소나무림에서 조사기간 동안 임상 낙엽층에 분포하는 평균 유기탄소량은 4.71±1.02 ton C ha<sup>-1</sup> 이었다. 층위별 평균 유기탄소량은 O<sub>i</sub> 층이 2.10±0.31 ton C ha<sup>-1</sup>, O<sub>e</sub>+O<sub>a</sub> 층이 2.61±0.73 ton C ha<sup>-1</sup> 로 나타나 O<sub>e</sub>+O<sub>a</sub> 층이 O<sub>i</sub> 층보다 다소 높게 나타났다(Table 2). 임상 낙엽층(O<sub>i</sub> 층, O<sub>e</sub>+O<sub>a</sub> 층)에 분포하는 유기탄소량은 하절기에서 동절기로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 이는 계절에 따른 낙엽생산량 차이와 기온, 강우 차이에 의한 환경적 요인의 변화로 인해 분해자의 분해활성에 따른 것으로 판단된다.

Table 2. Seasonal changes of organic carbon (ton C·ha<sup>-1</sup>) in litter layer of the *pinus densiflora* stand (mean ± SD)

Date	Horizon		
	O <sub>i</sub>	O <sub>e</sub> + O <sub>a</sub>	Total
Jun. 2011	2.26 ± 0.37	2.32 ± 0.64	4.58 ± 1.00
Sep. 2011	1.22 ± 0.13	1.65 ± 0.73	2.87 ± 0.82
Dec. 2011	2.16 ± 0.32	2.62 ± 0.66	4.78 ± 0.98
Mar. 2012	2.76 ± 0.40	3.86 ± 0.89	6.62 ± 1.28
Mean	2.10 ± 0.31	2.61 ± 0.73	4.71 ± 1.02

본 소나무림의 임상 낙엽층 내 분포하는 유기탄소량은 Park and Lee(1981)가 보고한 지리산 소나무림과 한라산 소나무림의 7.62, 7.88 ton C ha<sup>-1</sup>, Lee(2004)가 보고한 공주 지역 소나무림의 8.22 ton C ha<sup>-1</sup> 보다 낮게 나타났다.

4. 토양의 유기탄소 분포량

토양 내 분포하는 유기탄소량은 유기물함량, 토양 가비중, 석력함량 등을 이용하여 추정하는 방법이 일반적으로 많이 이용되고 있으며(Arnold, 1995), 토양 내 유기탄소량은 일반적으로 깊이가 깊어질수록 지수적으로 감소하는 것

으로 알려져 있다(Eswaran *et al.*, 1995). 이는 일차적으로  
임상으로 유입되는 유기물량과 관련이 있다.

본 소나무림 내 토양 50cm 깊이까지의 평균 유기탄소량  
은 58.55 ton C ha<sup>-1</sup> 50cm-depth<sup>-1</sup> 이었으며, 상층토(0~  
10cm)와 50cm 깊이에서 각각 15.42, 11.28 ton C ha<sup>-1</sup> 로  
상층토에 분포하는 유기탄소량이 다소 높게 나타났다  
(Figure 3). 유기탄소량이 상층토에서 가장 높게 나타난 것  
은 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 판  
단된다.

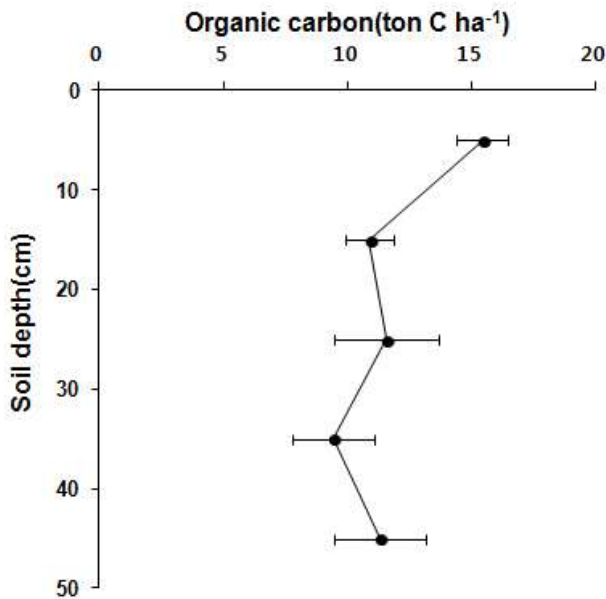


Figure 3. Variation of organic carbon along the soil depth of the *Pinus densiflora* forest in the study area. Bars indicate SD. (n = 3)

본 소나무림의 토양 50cm 깊이까지의 평균 유기탄소 분  
포량은 Park(1999)이 충주지역 소나무림에서 보고한 54.70  
ton C ha<sup>-1</sup>50cm-depth<sup>-1</sup> 과 유사하였으나, Jeon *et al.*(2007)  
이 보고한 월악산 소나무림의 84.55 ton C ha<sup>-1</sup>50cm-depth<sup>-1</sup>,  
Kim(2006)이 보고한 함양군 소나무림의 102.60 ton C  
ha<sup>-1</sup>30cm-depth<sup>-1</sup>, Lee(2011)가 보고한 남산 소나무림의  
168.42 ton C ha<sup>-1</sup>50cm-depth<sup>-1</sup> 보다 적게 나타났다. 본 소  
나무림 토양의 유기탄소 분포량이 타 지소에 비해 적은 것  
은 본 조사지소 토양의 모재가 변성암이며, 유효 토심은 20  
~50 cm로 비교적 얇고, 토양 가비중이 0.89~1.04 g cm<sup>-3</sup>

로 높게 나타난 것과 관련이 있다고 판단되며, 일반적으로  
토양 내 유기탄소량은 조사지소별 토양 유형, 산림식생을  
구성하는 우점종, 유효수분함량, 점토함량 등에 따라 차이  
가 발생하는 것으로 알려진 바 있다(Grigal and Ohmann,  
1992). 또한, 각 조사지소별 토양 내 유기탄소량은 산림식생  
에 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

토양호흡은 크게 미생물호흡과 뿌리호흡의 합으로 나타  
내어진다(Hanson *et al.*, 2000). 본 소나무림에서 조사기간  
동안 평균 토양호흡량은 0.47 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>이었다. 계절에  
따른 토양호흡량은 8월에 0.82 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup> 로 가장 높았  
으며, 1월에 평균 0.02 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup> 로 가장 낮게 나타나,  
동절기에서 하절기로 갈수록 토양호흡량이 증가하는 경향  
을 보였다(Figure 4). 이는 토양온도와 토양수분의 증가에  
따른 미생물 활동이 활발하게 이루어져 미생물호흡을 통해  
방출되는 CO<sub>2</sub>의 증가 및 식물생장에 따른 뿌리호흡을 통해  
방출되는 CO<sub>2</sub>의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 이와  
같이 계절변화로 인한 토양온도와 토양호흡간의 정의 상관  
관계를 갖는 현상은 많은 연구에서 보고된 바 있다(Son and  
Kim, 1996; Lee and Mun, 2001; Han, 2002; Lee and Mun,  
2005; Dulohery *et al.*, 1996; Moon *et al.*, 2001; Kim *et*

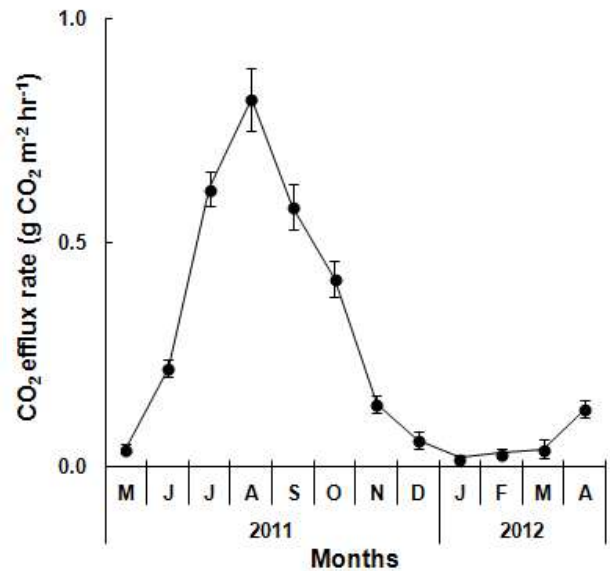


Figure 4. Seasonal soil respiration of the *Pinus densiflora* forest in the study area. Bars indicate SD. (n=10)

al., 2009).

본 소나무림의 평균 토양호흡량은 Singh and Gupta (1977)가 온대지방의 여러 산림생태계에서 측정한 결과를 종합하여 보고한 토양호흡량(0.01~1.00 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>) 범위에 포함되는 것으로 나타났다. Ryan and Law(2005)는 산림의 토양호흡은 토양이 비옥하거나 유기물량이 높을수록 증가한다고 보고한 바 있어, 조사지소별 토양호흡량의 차이는 산림식생을 구성하는 우점종, 낙엽생산과 분해의 차이에 의한 토양 유기물량 등과 같은 생물학적 요인과 토양 온도와 토양수분 등의 환경적 요인의 차이에 따른 것으로 판단된다.

산림생태계의 순생태계생산량은 순일차생산량과 미생물 호흡에 의해 결정되므로 순생태계생산량을 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 미생물호흡량을 추정하여 소나무림의 탄소수지를 계산하는데 사용하였다. Nakane(1983)는 일본의 유사 기후대에 분포하는 80년생 소나무림에서 토양호흡 중 뿌리호흡이 차지하는 비율이 47~51%의 범위에 있다고 보고한 바 있다. 본 소나무림에서 토양호흡을 통해 대기 중으로 방출되는 CO<sub>2</sub> 중 약 49%를 뿌리호흡량으로 감안하였을 때, 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 유기탄소량은 각각 3.19, 3.06 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>으로 추정되었다.

### 6. 소나무림의 유기탄소 분포와 수치

본 소나무림의 각 탄소저장고 별 유기탄소 분포와 수치를 Figure 5에 종합하였다. 조사기간 동안 각 구성원별 유기탄

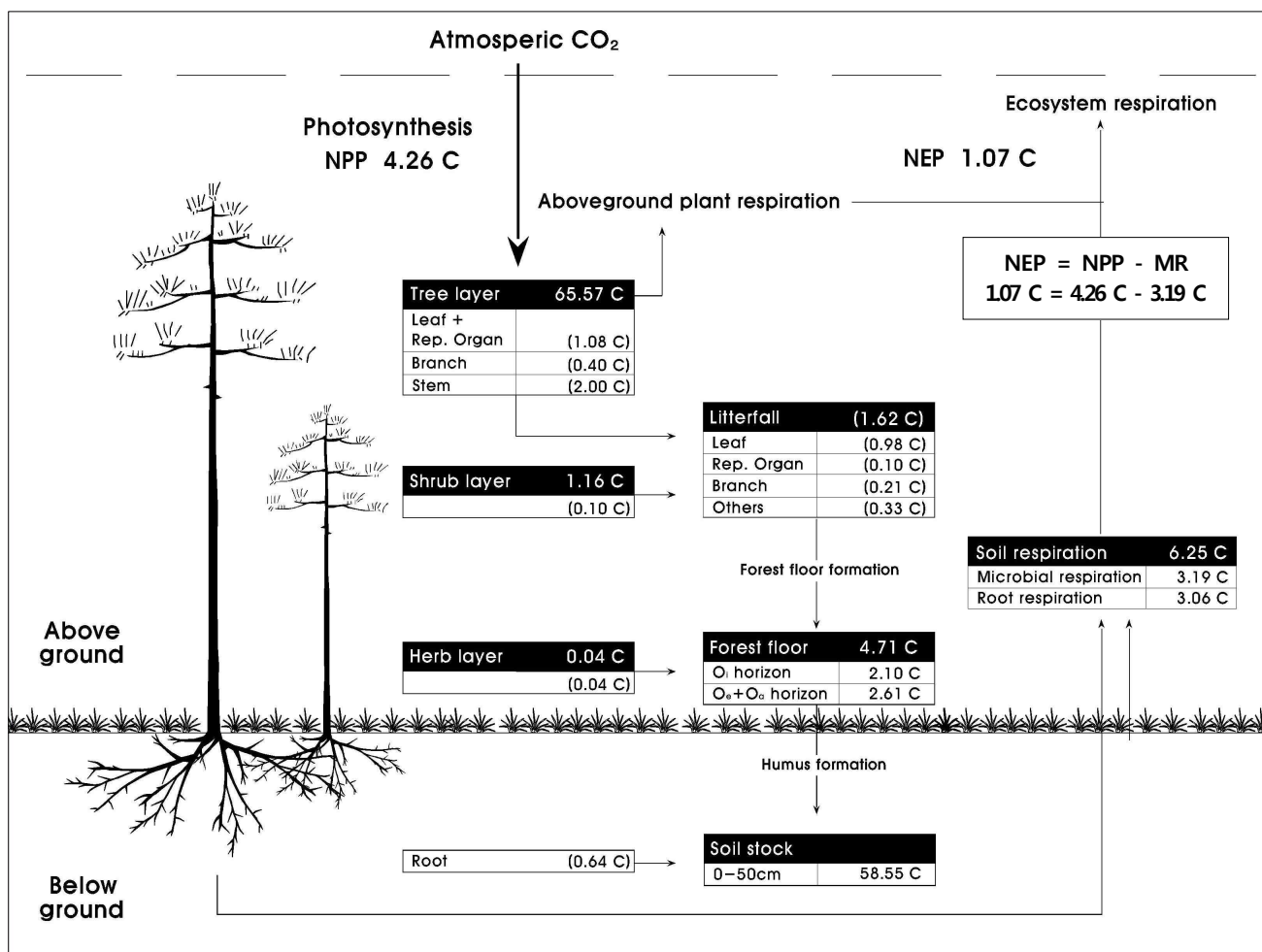


Figure 5. Compartment model showing the distribution and flow organic carbon of the *Pinus densiflora* forest in the study area Box: standing carbon (ton C ha<sup>-1</sup>), arrow: flux (ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>). Parenthesis indicate NPP (ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>)

소 분포량은 지상부 생물량에 52.25 ton C ha<sup>-1</sup>(40.2%), 지하부 생물량에 14.52 ton C ha<sup>-1</sup>(11.2%)로 식물체 전체에 66.77 ton C ha<sup>-1</sup>가 축적되어 있었다. 그리고 임상 낙엽층에 4.71 ton C ha<sup>-1</sup>(3.6%), 토양에 58.56 ton C ha<sup>-1</sup>(45.0%)로 식물체에 가장 많은 탄소가 분포하고 있었다. 순광합성을 통하여 식물체에 고정된 유기탄소량은 4.26 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이었고, 층위별 유기탄소량은 교목층, 관목층, 초본층에 각각 4.12, 0.10 및 0.04 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이 분포되어 있었다. 조사기간 동안 낙엽생산을 통해 임상으로 유입되는 유기탄소량은 1.62 ton C ha<sup>-1</sup>이였으며, 잎이 0.98 ton C ha<sup>-1</sup>(60.3%)으로 가장 높게 나타났고, 기타 0.33 ton C ha<sup>-1</sup>(20.4%), 목질부 0.21 ton C ha<sup>-1</sup>(13.0%), 생식기관 0.10 ton C ha<sup>-1</sup>(6.2%)의 순으로 나타났다. 임상 낙엽층의 연평균 유기탄소량은 4.71 ton C ha<sup>-1</sup>로 O<sub>i</sub>층과 O<sub>e</sub>+O<sub>a</sub>층이 각각 2.10 및 2.61 ton C ha<sup>-1</sup>으로 O<sub>e</sub>+O<sub>a</sub>층이 높게 나타났다. 토양호흡을 통하여 방출되는 탄소량은 평균 6.25 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>으로 이중 미생물호흡과 뿌리호흡을 통해 방출되는 탄소량은 각각 3.19, 3.06 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이었다. 유기탄소 연순생산량(NPP) 4.26 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>과 미생물호흡량(MR) 3.19 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>의 차이로 추정하였을 때 본 소나무림의 순생태계생산량(NEP)은 1.07 ton C ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>이었다. 따라서, 본 소나무림이 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 순흡수하여 대기환경 개선에 Positive(+) 요인으로 작용하였으며, 유기탄소 흡수원(sink)으로서의 역할을 수행하는 것으로 나타났다. 토양 호흡 중 미생물호흡량을 감안한 순생태계생산량을 Namgung (2010)은 월악산 굴참나무림에서 1.03 ton C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, Shin(2012)은 월악산 신갈나무림에서 1.50 ton C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>로 보고하여 본 소나무림과 유사하였고, Lee(2013)가 보고한 공주 상수리나무림 6.64 ton C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>보다 낮게 나타났다.

## LITERATURE CITED

- Abugre, S., C. Oti-Boateng and M.F. Yeboah(2011) Litterfall and decomposition trend of *Jatropha curcas* L. leaves mulches under two environmental conditions. *Agric Biol J N Am.* 2(3): 462-470.
- 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.
- Bond-Lamberty, B., C. Wang and S.T. Gower(2004) Contribution of root respiration to soil surface CO<sub>2</sub> flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree physiology* 24: 1387-1395.
- Boyland, M.(2006) The economics of using forests to increase carbon storage. *Can. J. For. Res.* 36: 2223-2234.
- Brady, N.C. and R.R. Weil(2004) *Element of the Nature and Properties of Soil.* 2th ed. Pearson, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 53-56.
- Bray, J.R. and E. Gorham(1964) Litter production in forests of the world. *Advance in Ecological Reserch* 2: 101-157.
- 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.
- Coleman, D.(1973) Compartment analysis of total soil respiration: an exploratory study. *oikos* 24: 465-468.
- Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler and L. Wisniewski(1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Dulohery, C.J., L.A. Morris and R. Lowrance(1996) Assessing forest soil disturbance through biogenic gas fluxes. *Soil Science Society of America Journal* 60(1): 291-298.
- 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. and L.F. Ohmann(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 Nationaal 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.
- 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.
- Jeon, I.Y., C.H. Shin, G.H. Kim and H.T. Mun(2007) Organic carbon distribution of the *Pinus densiflora* forest on Songgye valley at Mt. Worak National Park. *J Korean For Soc* 30(1): 17-21.
- Johnson, D., D. Geisinger, R. Walker, J. Newman and J. Vose(1994) Soil pCO<sub>2</sub>, soil respiration, and root activity in CO<sub>2</sub>-fumigated and nitronen-fertilized ponderosa pine. *Plant and Soil* 165: 129-138.
- 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.
- Kimble, J.M., L.S. Heath, R.A. Birdsey and R. Lal(2003) The potential of U.S. Forest soils to sequester carbon and mitigate the green house effect. CRC Press, New York, 429pp.
- Kim, C.S. and H.S. Cho(2004) Quantitative comparisons of soil carbon and nutrient storage in *Larix leptolepis*, *Pinus densiflora* and *Pinus rigitaeda* plantations. Korean J Ecology 27: 67-71.
- Kim, C.S.(2006) Soil carbon cycling and soil CO<sub>2</sub> efflux in a red pine (*Pinus densiflora*) stand. J Ecol Field Biol 29: 23-27.
- Kimmins, J.P.(1987) Forest Ecology. MacMillan Publishing Company, New York, 531pp.
- Kim, S.B., N.C. Jung and K.H. Lee(2009) Soil CO<sub>2</sub> efflux and leaf-litter decomposition of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands in the southern region of Korean Peninsular. Jour Korean For Soc 98(2): 183-188.
- Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention of Climate Change(1997)
- Lee, D.H.(2004) Estimating Above- and Below-ground Biomass from Diameter of Breast Height and Height for the *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.J. Kor. For. Soc. 93(3) : 242-250. (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, 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, K.J., H.Y. Won and H.T. Mun(2012) Contribution of root respiration to soil respiration for *Quercus acutissima* forest. Kor. J. Env. Ecol. 26(5) : 780-786. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.J.(2013) Carbon Budget and Nutrient Cycling in the *Quercus acutissima* Forest. Ph.D. Thesis, Kongju National University, 133-134pp.
- Lee, S.U.(1981) Studies on forest soils in Korea (II). Journal of Korean forestry society 54: 25-35.
- Lee, S.K.(2011) Production and decomposition and organic carbon distribution in *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica* and *Robinia pseudoacacia* Forest at Mt. Nam. Ph.D. Thesis, Kongju National University, pp. 22-26.
- Lee, Y.Y. and H.T. Mun(2001) A study on the soil respiration in a *Quercus acutissima* forest. Kor. J. Ecol. 24(3): 141-147. (in Korean with English abstract)
- Lousier, J.D. and D. Parkinson(1975) Litter decomposition in a cool temperate deciduous forest. Journal of Botany 54: 419-436.
- Moon, H.S., S.Y. Jung and S.C. Hong(2001) Rate of soil respiration at black locust (*Robinia pseudo-acacia*) stands in Jinju area. Kor. J. Ecology 24(6): 371-376.
- Morris, S.J. and E.A. Paul(2003) Forest soil ecology and soil organic carbon. In: Kimble, J.M., L.S. Heath, R.A. Birdsey and R. Lal(ed.) The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. CRC Press, New York, pp. 109-125.
- 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)
- 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.
- Nakane, K., M. Yamamoto and H. Tsubota(1983) Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. Japanese J. Ecol. 33: 397-408.
- Nakane, K.(1995) Soil carbon cycling in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation. Forest Ecology and Management 72: 185-197.
- 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, I.H. and S.M. Lee(1990) Biomass and net production of *Pinus densiflora* natural forest of four local forms in Korea. Journal of Korean Forest Society 79: 196-204
- 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)
- Park, B.G. and I.S. Lee(1981) A Model for Litter Decomposition of the Forest Eco System in Seoul Korea. Kor. J. Ecol. 4(1): 38-51.
- 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)
- Pregitzer, K.S.(2003) Carbon cycling in forest ecosystems with an emphasis on belowground processes. In: Kimble, J.M., L.S. Heath, R.A. Birdsey and R. Lal(ed.) The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. CRC Press, New York, pp. 93-107.
- Raich, J.W. and A. Tufekcioglu(2000) Vegetation and soil respiration: correlations and controls. Biogeochemistry 48: 71-90.
- 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.
- Ryan, M.G. and B.E. Law(2005) Interpreting, measuring, and mod-

- eling soil respiration. *Biogeochemistry* 73: 3-27.
- Satoo, T.(1966) Production and distribution of dry matter in forest ecosystems. *Misc. Inform. Tokyo Univ. For.* 16: 1-15
- 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* plantation stands in the eastern Himalaya. *Ecology* 75: 997-1010.
- Shin, C.H.(2012) Carbon budget and Nutrient cycling in the *Quercus mongolica* forest at Mt. Worak National Park. Ph.D. Thesis, Kongju national University, pp. 152-156.
- Singh, J.S. and S.R. Gupta(1977) Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Bot Rev* 43: 449-528.
- Son, Y. and H.W. Kim(1996) Soil respiration in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantations. *J. Kor. For. Soc.* 85(3): 496-505. (in Korean with English abstract)
- 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.
- Vitousek, P.M.(1991) Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon dioxide? *Journal of Environmental Quality* 20: 348-354.
- 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.
- Zhou, T., P. Shi, D. Hui and Y. Luo(2009) Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration ( $Q_{10}$ ) and its implications for carbon-climate feedback. *Journal of geophysical research* 114: 1-9.