

리기다소나무와 落葉松 人工造林地內 土壤發生
二酸化炭素에 관한 研究^{1*}
孫堯丸² · 金顯祐²

Soil Respiration in *Pinus rigida* and *Larix
leptolepis* Plantations^{1*}

Yowhan Son² and Hyun-Woo Kim²

요 약

경기도 양평지역의 유사한 입지에 인공조림된 40년생 리기다소나무와 낙엽송림에서 1995년 5월부터 11월까지 2주 간격으로 soda lime법으로 토양발생 이산화탄소량을 측정하였다. 뿌리호흡을 추정하기 위하여 처리구는 깊이 50-60cm로 주위에 도랑을 파서 뿌리를 끊고 주위의 뿌리가 침입하는 것을 방지하였다. 측정기간동안에 발생한 이산화탄소량은 연구대상 두 수종 간에서 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.01$). 이산화탄소량은 리기다소나무 대조구에서 가장 높은 $0.38\text{g/m}^2/\text{hr}$ 를 보였고, 낙엽송 처리구에서 가장 낮은 $0.31\text{g/m}^2/\text{hr}$ 를 보였다. 이산화탄소 발생량이 리기다소나무 입지에서 낙엽송 입지에서보다 높은 것은 리기다소나무림에서 매년 공급되는 지상부 낙엽량이 많은 것과 직접적인 관련이 있는 것으로 보인다. 연간 이산화탄소 발생량은 $23\text{-}27\text{t/ha/yr}$ 로 추정되었다. 대기 및 토양온도와 이산화탄소 발생량 간에는 정의 상관관계가 있었으나 토양습도와 이산화탄소 발생량 간에는 유의한 상관관계가 발견되지 않았다. 대조구와 처리구 간의 이산화탄소 발생량 차이로 추정된 뿌리의 호흡은 전체 토양 발생 이산화탄소량 가운데 약 3%를 차지하고 있었다. 처리구의 도랑 깊이가 암석 등의 장애물로 인해 50-60cm로 한정되었고, 단근 후 곧바로 이산화탄소 발생량을 측정한 것 등이 뿌리 호흡을 과소 측정하게 하는 원인이 되었을 가능성이 있다. 세근을 포함한 지하부 유기물의 공급량 및 유기물의 성질 등 토양 발생 이산화탄소량에 영향을 주는 제반 인자들에 대한 보다 면밀한 장기간의 연구가 산림생태계 내 탄소의 순환을 이해하는데 필요한 것으로 사료된다.

ABSTRACT

Soil respiration was measured every two weeks from May through November 1995 using the soda lime method in 40-year-old *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantations on a similar soil in Yangpyeong, Kyonggi Province. Treatments included control and no-roots (plots trenched and root regrowth into plots prevented). Root respiration was evaluated by comparing no-roots sub-plots to control plots. Mean soil respiration showed highly significant species effects ($p < 0.01$) and was highest at the *Pinus rigida* control plot ($0.38\text{g/m}^2/\text{hr}$) and lowest at the *Larix leptolepis* no-roots plot ($0.31\text{g/m}^2/\text{hr}$). High soil respiration in *Pinus rigida* may be related to aboveground litter production. The annual CO_2 fluxes ranged from 23 to 27t/ha/yr . We found significant correlations between temperatures (air : $R^2 = 0.53$, soil : $R^2 = 0.55$) and soil respiration ($p < 0.01$), but no significant correlations between soil moisture and soil respiration ($p > 0.1$). Root respiration was 3% of total soil respiration. We might underestimate root respiration because of shallow trenches and CO_2 measurements right after trenching. Factors controlling

¹ 接受 1996年 4月 30日 Received April 30, 1996.

² 고려대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Korea University.

* 본 연구는 1995년도 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호 951-0608-041-1) 지원에 의해 수행되었음

soil respiration including belowground litterfall(especially fine roots) inputs, litter quality should be well understood to predict soil carbon fluxes and relative contributions to total soil respiration in forest ecosystems.

Key words : Larix leptolepis, Pinus rigida, root respiration, soil moisture, soil respiration, soil temperature

서론

산림생태계를 대상으로 한 에너지와 물질순환 연구에서 탄소의 순환은 매우 중요한 과제이다. 더욱이 최근 지구 대기 중의 이산화탄소 농도가 점차 증가하고 있음이 밝혀지면서(Aber와 Melillo, 1991) 생태계 차원과 전지구 차원에서 탄소의 공급원과 수요원을 계량화하는데 관심이 고조되고 있으며 지구상의 토지이용이 이산화탄소 발생량에 미치는 영향에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(Bertram, 1991). 이산화탄소는 동·식·미생물 대사작용의 최종산물로(Anderson, 1982) 토양으로부터 발생하는 이산화탄소는 토양내 미생물과 식물체 뿌리 활동의 결과로써 미생물과 식물체 뿌리의 활성정도를 나타내는 지표로 사용된다. 특히 토양에 유입된 지상부와 지하부의 유기물이 분해되면서 이산화탄소를 발생시키는데 이때 발생하는 이산화탄소의 양은 유기물의 종류와 양에 따라 크게 달라진다.

산림토양과 이산화탄소 발생에 관한 연구에서 각기 다른 수종 하의 산림토양으로부터 발생하는 이산화탄소의 양을 측정하고 수종에 따른 이산화탄소 발생 차이를 비교한 연구들이 있으나, 이들 연구의 대부분은 서로 다른 입지 여건하(토양, 방위, 경사, 고도 등)에 있는 수종들을 비교한 것이어서 설사 수종 간에 이산화탄소 발생량 차이가 있다 하더라도 이러한 차이가 수종의 차이에 의한 것인지 혹은 임목 생육환경 인자의 차이에 의한 것이냐가 불분명한 경우가 많다. 따라서 산림생태계내 임목 생육환경이 유사한 입지에 각기 다른 수종을 식재하고 그 수종의 영향을 연구하는 방식이 산림토양으로부터 발생하는 이산화탄소를 연구하는데 반드시 필요하다.

한편 산림토양으로부터 발생하는 이산화탄소는 토양내 존재하는 다양한 미생물들의 호흡과 임목 뿌리호흡의 산물이므로 전체 발생하는 이산화탄소량 가운데 미생물의 호흡에 의한 양과 임목뿌

리호흡에 의한 양이 차지하는 비율을 측정하는 일 또한 탄소의 순환을 이해하는데 필요하다(Bowden 등, 1993; Ellert와 Gregorich, 1995; Ewel 등, 1987b; Weber, 1990). 그러나 연구방법 상의 어려움 때문에 양자를 분리, 측정하여 계량화한 연구 결과는 그리 많지 않다. 또한 토양으로부터의 이산화탄소 발생이 어느 과정에 의한 것이든 관계없이 기후인자가 발생량과 발생행태에 크게 영향을 미치고 특히 계절별로 각기 다른 미세환경인자가 제한요소로 작용하므로(Garrett와 Cox, 1973), 토양온도와 토양습도와 같은 토양환경인자들의 영향 정도를 평가하는 일도 매우 중요하다(Fernandez 등, 1993).

본 연구의 목적은 우리나라 온대지방에서 우수한 생장을 보여 그동안 대면적에 식재되어 온 리기다소나무(*Pinus rigida* Mill.)와 낙엽송(*Larix leptolepis* Gordon)을 대상으로 첫째, 임목생육환경이 유사한 입지에 동일한 시기에 식재되어 성립된 인공조림지의 산림토양에서 발생하는 이산화탄소량을 측정하여 두 수종 간의 차이를 비교하고 이산화탄소 발생의 계절적 변동 상태를 조사하며, 둘째, 산림토양온도와 토양습도가 이산화탄소 발생에 미치는 영향과 이들 토양환경인자와 이산화탄소 발생량 간의 상관관계를 구명하며, 셋째, 입지로부터 발생하는 이산화탄소의 양을 그 발생 원인에 따라 미생물 호흡과 임목뿌리 호흡으로 분리하여 계량화하는 것 등이다.

재료 및 방법

1. 연구 대상 임분

본 연구는 경기도 양평군 양동면 고송리 일대의 고려대학교 양평연습림내 리기다소나무와 낙엽송 인공조림지에서 실행되었다. 연구를 위하여 토양, 방위, 경사, 고도 등의 입지여건과 수령 및 과거 시업과정 등이 동일하고 인접하여 있는 40년생 리기다소나무와 낙엽송 임분을 선정하였고 수종별로 3개소에서 15×15m의 정방형 시험구를

Table 1. Stand and soil characteristics of *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantations in Yangpyeong, Kyonggi Province(from Kim, 1996).

	<i>Pinus rigida</i>	<i>Larix leptolepis</i>
Stand		
DBH (cm)	23.5	24.0
basal area (m ² /ha)	64.8	55.5
No. of tree/ha	667	548
Forest floor		
dry mass (kg/ha)	14,110	12,150
N (kg/ha)	128	124
P (kg/ha)	15	17
Soil		
texture	sandy clay loam	sandy clay loam
pH	4.9	4.9
total N (%)	0.18	0.28
P ₂ O ₅ (ppm)	15.3	18.5

설치하고 경계를 표시하였다. 연구 대상 임분에 관한 개략적인 자료는 Table 1에 나타나 있으며 주요 하층식생은 리기다소나무 임분에서 신갈나무 (*Quercus mongolica*), 졸참나무(*Q. serrata*), 상수리나무(*Q. acutissima*), 개울나무(*Rhus trichocarpa*) 등이었으며, 낙엽송 임분에서는 갈참나무(*Q. aliena*), 신갈나무, 난터잎개암나무(*Corylus heterophylla*), 그리고 노린재나무(*Symplocos chinensis* for. *pilosa*) 등이었다. 이 지역의 지난 10년간 1월과 7월의 평균 기온은 각각 -7.9°C와 24.1°C이었고 연평균 강우량은 1,365mm이었다.

2. 이산화탄소 발생량 측정

토양으로부터 발생하는 이산화탄소량을 측정하는 방법은 여러가지가 있으나(Cropper 등, 1985; Minderman과 Vulto, 1973; Singh과 Gupta, 1977), 본 연구에서는 측정 방법이 용이하고 경제적인 뿐 아니라 측정치가 비교적 정확하여 산림생태계 연구에서 널리 이용되고 있는 Edwards (1982)의 soda lime법을 사용하였다(Schlentner와 Van Cleve, 1985; Weber, 1990). 매 시험구 임의의 4개 지점(총 24개)에서 1995년 5월 12일부터 11월 29일까지 약 7개월간 매 2주 간격으로 다음과 같이 이산화탄소 발생량을 총 15회에 걸쳐 측정하였다. 약 40g 정도의 soda lime을 105°C에서 10시간 건조시킨 뒤 중량을 측정하고 직경 6cm, 높이 5cm의 원통형 알루미늄 통에 넣고 밀봉하여 시험구내에 직경 24cm, 높이

30cm의 원통형 plastic chamber를 설치한 뒤 chamber내에서 알루미늄 통을 개봉시켜 24시간 동안 발생하는 이산화탄소가 흡수되도록 하였다(Witkamp, 1969). Chamber 설치 후 24시간이 경과한 뒤 chamber를 개봉하여 알루미늄 통을 회수, 밀봉하고 실험실로 운반한 뒤 105°C에서 10시간 건조시켜 중량을 측정한다 다음 24시간 동안 발생한 이산화탄소량을 계산하였다. 매 24시간 동안 발생한 이산화탄소량을 기준으로 측정간격인 2주 동안의 이산화탄소 발생량을 계산하였고, 측정 시점 별로 이를 합산하여 측정 전기간 동안의 이산화탄소 발생량을 구하였다.

3. 토양온도 및 토양습도 측정

매 2주 간격으로 이산화탄소 발생량 측정시 인접 지점에서 thermocouple thermometer와 soil probe(Hanna, model HI 9063)로 지표로부터 15cm 깊이의 토양온도를 측정하였다. 또한 지표로부터 30cm 지상부 대기 중의 온도를 thermocouple thermometer로 측정하였고 매 이산화탄소 발생량 측정시 시험구 별로 6개소에서 지표로부터 15cm 깊이의 토양 20-30g을 채취하고 105°C에서 건량이 일정해질 때까지 건조시켜 토양 내 함수율을 계산하였다.

4. 뿌리호흡량 측정

산림토양으로부터 발생하는 총 이산화탄소량 가운데 뿌리의 호흡에 의한 부분을 측정하는 방

법은 Bowden 등(1993)을 따랐다. 즉 임목의 뿌리가 포함된 토양으로부터 발생하는 총 이산화탄소량에서 단근에 의해 뿌리를 제거한 토양으로부터 발생하는 이산화탄소량을 뺀 값으로 계산하였다. 이를 위하여 매 시험구별로 1개씩 2m×2m의 소형 방형구를 시험구 내에 설치하고 소형 방형구 내의 모든 지피식생을 제거한 다음 폭 20cm, 깊이 50-60cm의 도랑을 방형구 경계에 파서 모든 뿌리를 끊고 약 3mm 두께의 비닐을 도랑 주위에 싸고 다시 도랑을 메꾸어 주위 식생의 뿌리가 방형구내로 침입하는 것을 방지하였다. 소형 방형구 내에서는 지상부 위에 식생이 없도록 하기 위하여 목본류는 계속해서 절단하고 초본류는 토양이 교란되지 않도록 주의하며 계속하여 뽑아내었다. 2m×2m의 소형 방형구 내 임목의 2개소에서 전술한 방법에 의해 매 2주 간격으로 이산화탄소 발생량을 측정하였다. 도랑을 파고 단근을 실시한 시험구를 처리구로 취급하였다.

결과 및 고찰

1. 이산화탄소 발생량

측정기간 중 토양으로부터 발생한 이산화탄소의 평균값은 리기다소나무의 대조구에서 0.38g/m²/hr, 처리구에서 0.38g/m²/hr이었으며, 낙엽송의 대조구에서 0.33g/m²/hr, 처리구에서 0.31g/m²/hr 등이었다. 단근 처리 여부에 관계없이 이산화탄소 발생량은 리기다소나무에서 0.38g/m²/hr로 낙엽송의 0.32g/m²/hr보다 많았다(p < 0.01). 또한 수종에 관계없이 처리구는 0.35g/m²/hr로 대조구의 0.36g/m²/hr보다 비록 0.01g/m²/hr 높았으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(p > 0.1). 측정시점에 따라 이산화탄소 발생량은 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p < 0.01). 본 연구결과 나타난 이산화탄소 발생량은 Singh과 Gupta(1977)가 온대지방 여러 산림생태계에서 측

Table 2. Soil respiration during a two-week period of control and no roots plots for *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantations in Yangpyeong, Kyonggi Province.

Measuring date	<i>Pinus rigida</i>		<i>Larix leptolepis</i>	
	control	no roots	control	no roots
May 12	506	656	413	420
26	1019	1096	911	832
Jun. 9	1304	1288	976	879
23	1666	1697	1299	1375
Jul. 7	1723	1512	1435	1319
21	1860	2065	2284	1667
Aug. 4	1744	2182	1656	1765
18	2261	2068	1468	1628
Sept. 1	1431	1392	1136	1003
15	1714	1525	1310	1375
29	1080	1040	1039	879
Oct. 13	1034	800	826	613
27	908	929	854	749
Nov. 10	675	629	681	653
29	552	469	475	521
Subtotal	19478	19350	16763	15679
Estimated rates (Nov. 30-May 11)*	7362	6588	6936	7044
Yearly total (kg/ha/yr)	26840	25938	23699	22723

* Assumed that the respiration rate measured in late fall (November) represented the winter rate (Ellert and Gregorich 1995).

정된 결과를 종합한 0.01-1.0g/m²/hr의 범위내에 있으며, 우리나라 중부지방의 유사한 기후 하 활엽수 임지에서 측정된 0.21-0.33g/m²/hr(Son 등, 1994)에 비해 약간 높은 것이다.

일반적으로 겨울철에도 토양으로부터 이산화탄소 발생은 지속되어(Bremner와 Huntington, 1995; Sommerfeld 등, 1993) 이를 간접적으로 추정할 때 여름철 이산화탄소 발생량의 절반 수준으로 가정하거나(Bowden 등, 1993) 또는 이른 봄이나 늦가을의 이산화탄소 발생량과 동일한 것으로 가정할 수 있다(Ellert와 Gregorich, 1995). 본 연구에서는 겨울철 이산화탄소 발생량이 늦가을인 11월의 발생량과 동일하다는 가정 하에 실제로 측정하지 않은 12월-4월의 이산화탄소 발생량을 추정하였다. 본 연구에서 실제로 측정된 5월부터 11월까지의 이산화탄소 발생량과 전술한 가정에 의해 추정된 12-4월까지의 동계기간 중의 이산화탄소 발생량이 Table 2에 나타나 있다. 7개월간의 이산화탄소 발생량 측정치인 16-19t/ha는 Schientner와 Van Cleve(1985)가 침엽수 임지(*Picea mariana*와 *P. glauca*)에서 5월부터 9월까지 5개월간 측정된 13-16t/ha와 측정기간을 감안하면 매우 유사하다. 또한 본 연구에서 추정된 연간 이산화탄소 총 발생량은 23-27t/ha/yr로써 전세계의 여러 침엽수림 하에서 측정된 10-46t/ha/yr의 범위 내에 있으며(Raich와 Nadelhoffer, 1989), 특히 온대침엽수림 하에서 일반적으로 관찰되는 연간 발생량 15-23t/ha/yr과 큰 차이는 없다. 그러나 본 연구대상지와 위도나 임령이 비슷한 일본의 40년생 소나무(*Pinus densiflora*)림에서 보고된 36t/ha/yr에 비해 낮은 결과이다(Nakane, 1995).

산림토양에서 발생하는 이산화탄소의 양은 수종, 토양의 비옥도, 지형 등에 따라 차이가 있는 것으로 알려져 있으나(Ellert와 Gregorich(1995)에 요약됨; 수종간 차이가 없는 연구결과: Fernandez 등, 1993; Reiners, 1968; Schientner와 Van Cleve, 1985) 수종의 영향만을 따로 구별하여 연구한 결과는 많지 않다. 광릉지역에서 Son 등(1994)은 비슷한 토양 및 임지조건에 식재된 20년생 3종의 활엽수림(*Liriodendron tulipifera*, *Populus alba*×*P. glandulosa*, *Quercus rubra*)하의 토양발생 이산화탄소 양에 차이가 있음을 보고한 바 있다. 연구대상 임분은 토양, 방위,

경사 및 고도 등의 입지여건이 유사한 곳에 동일한 시기에 조성되었고 본 연구에서 측정된 토양과 대기의 온도, 토양습도 등은 리기다소나무와 낙엽송림에서 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p>0.1$). 따라서 수종 간의 이산화탄소 발생량 차이는 토양의 물리적 성질이 아닌 다른 인자에 기인한 것으로 볼 수 있다.

Raich와 Nadelhoffer(1989)는 열대에서 한대에 이르는 침, 활 혼효림 27-170년생 임분 30개를 대상으로 토양 발생 이산화탄소와 지상부 낙엽(잎) 유입량 간의 관계를 연구하여 이들 간에는 통계적으로 유의한 정의 상관관계가 있음을 밝힌 바 있다. 연구대상 임지에 지상부로부터 유입되는 연간 총 낙엽량은 리기다소나무 6,020kg/ha(잎만은 4,749kg/ha)로 낙엽송 4,191kg/ha(잎만은 3,179kg/ha)보다 월등히 많은 점(김종성, 1996)에 비추어 연구대상 임지에서도 지상부의 유기물 공급량 차이가 수종 간의 토양발생 이산화탄소량 차이를 가져온 원인이 될 수 있음을 추정할 수 있다. 이러한 추론은 낙엽층의 유기물 양과 성질이 이산화탄소 발생에 영향을 주는 중요한 요인이 된다는 다른 연구 결과와도 일치되는 것이다(Bridgham과 Richardson, 1992).

본 연구대상 임지에서 김종성(1996)이 측정된 바에 의하면 리기다소나무와 낙엽송 임지의 토양 내 유기물 및 전질소의 함량에는 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 그러나 토양 내 미생물의 활동 정도는 단순한 탄수화물이나 질소의 양 또는 이들 간의 비율보다는 오히려 유기물 내 리그닌의 농도 또는 리그닌: 질소의 비와 같은 다른 인자에 의해 크게 영향을 받는다는 보고(Meentemeyer, 1978; Melillo 등, 1982)가 있으므로 연구대상 수종의 지상부와 지하부 유기물에 대한 보다 상세한 분석이 필요한 것으로 보인다. 또한 두 수종 간의 지하부 유기물 공급량 차이를 밝히기 위하여 세균을 포함한 지하부 유기물의 현존량과 변동량을 정확히 측정할 필요가 있는 것으로 사료된다.

2. 토양온도와 습도 및 이산화탄소 발생의 계절적 변화

대기 및 토양 온도, 토양 습도, 그리고 이산화탄소 발생량 등의 계절적 변화는 리기다소나무나 낙엽송의 수종 간이나 처리구와 대조구 간에 관계

없이 거의 유사하여 대표값으로서 낙엽송 임지 및 리기다소나무 임지의 대조구를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 대기 및 토양 온도는 임목 생장시기 초부터 증가하기 시작하여 8월 중순에 연중 최고치에 도달하고 이후 점차 감소하는 계절적 변화를 보이고 있다(Fig. 1a, Fig. 2a). 토양온도는 대기온도에 비해 낮고($p < 0.05$) 연중 변화 폭도 작다(Fig. 1a, Fig. 2a). 토양습도(함수율)는 일시적으로 건조하였던 6월 하순과 7월 초순의 30%를 제외하면 연중 40-50% 사이로 변화가 거의 없다(Fig. 1b, Fig. 2b). Nakane(1995)이 일본의 삼나무(*Cryptomeria japonica*) 조림지에서 낙엽층의 유기물과 지표로부터 5cm 깊이의 무기토양 내 함수율을 측정된 결과에 의하면 낙엽층의 함수율은 계절에 따라 크게 변하나 무기광물토양의 함수율은 30-40%로 계절에 따라 큰

변화가 없음을 보여 본 연구결과와 매우 유사하였다. 한편 토양습도는 리기다소나무와 낙엽송 임지 모두에서 처리된 즉 도랑을 파서 뿌리를 끊고 지상부의 식생을 제거한 시험구에서 대조구보다 높게 나타났다($p < 0.01$). 이는 처리구에서 식생에 의한 수분의 흡수가 감소한 때문인 것으로 사료된다(Bowden 등, 1993).

이산화탄소 발생의 계절적 변화는 대기나 토양 온도의 계절적 변화와 크게 다르지 않아서 봄부터 계속 증가하여 7-8월에 최고치에 도달한 후(Dulohery 등, 1996) 점차 감소하다가 9월 중순경 일시적으로 증가하는 형태를 보이고 있다(Fig. 1c, Fig. 2c). 가을철 이산화탄소 발생량의 일시적 증가 현상은 지상부 낙엽의 공급과 관련이 있는 것으로 보이며, Reiners(1968)나 Son 등(1994) 등의 연구에서도 동일한 결과가 보고된 바 있다.

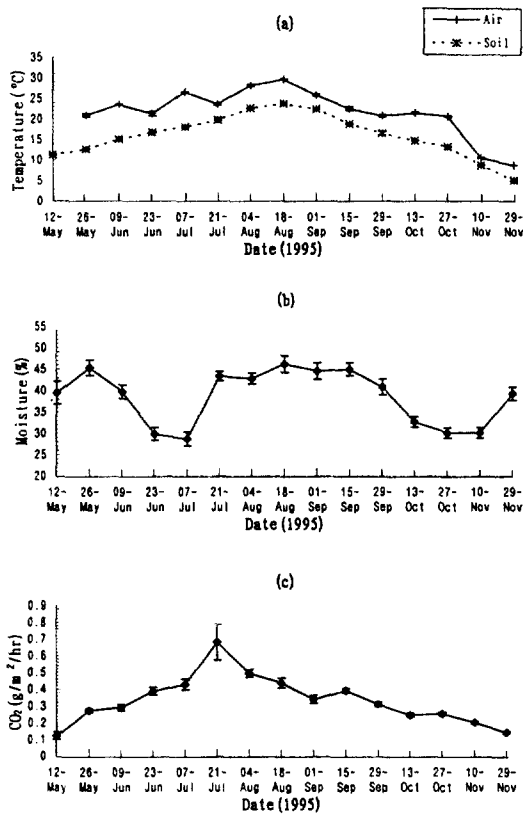


Fig. 1. Seasonal air and soil temperatures (a), mineral soil moisture (b), and soil respiration (c) from May 12 through November 29, 1995 in a *Larix leptolepis* plantation. Values are mean \pm one standard error.

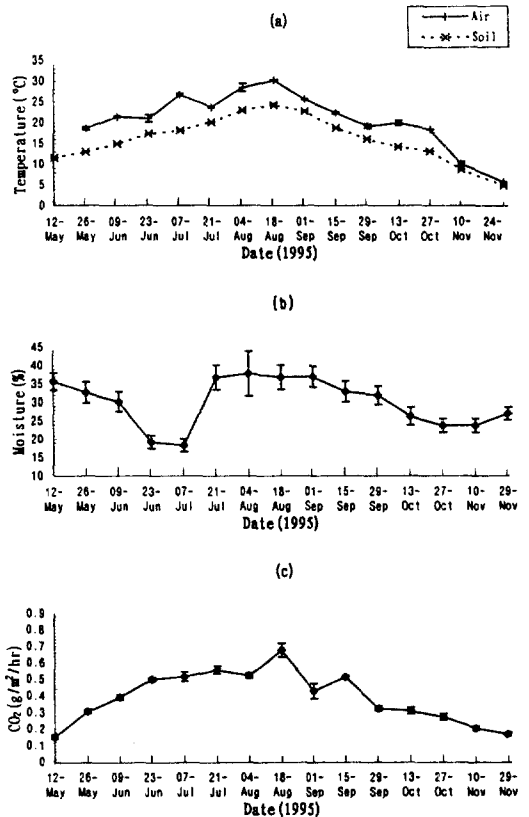


Fig. 2. Seasonal air and soil temperatures (a), mineral soil moisture (b), and soil respiration (c) from May 12 through November 29, 1995 in a *Pinus rigida* plantation. Values are mean \pm one standard error.

3. 이산화탄소 발생과 환경인자와의 관계

이산화탄소 발생량과 대기 및 토양 온도의 계절적 변화가 유사하여 이들 상호 간의 상관울 조사하기 위하여(Bertram, 1991) 수종과 처리 여부에 관계없이 모든 이산화탄소 발생량을 pool로 하여 회귀분석한 결과 토양발생 이산화탄소량과 토양온도 및 대기온도간에는 통계적으로 유의한 정의 상관관계가 있었다($p < 0.01$). 그러나 이산화탄소량과 토양습도 간에는 유의한 상관관계가 없었다($p > 0.1$). 또한 일반적으로 예측되며 다른 연구에서도 밝혀지고 있는 바와 같이(Fernandez 등, 1993) 토양온도와 대기온도 간에는 정의 상관관계가 있었다($p < 0.01$, $R^2 = 0.85$).

이산화탄소 발생량과 토양온도 및 대기온도 간의 상관관계에서 이전에 주로 사용하던(Fernandez 등, 1993; Son 등, 1994) 일차선형 회귀식보다 (토양온도 $R^2 = 0.52$, 대기온도 $R^2 = 0.41$) 지수함수를 이용한 회귀식에서(Bertram, 1991; Nakane, 1995; Nakane 등, 1983) 더 높은 설명력을 보였다(토양온도 $R^2 = 0.55$, 대기온도 $R^2 = 0.53$)(Fig. 3, 4). 이산화탄소 발생량과 토양온도 간 지수함수 회귀식의 결정계수는 다른 연구결과 보고된 일차선형 회귀식의 결정계수인 Fernandez 등 (1993)의 $R^2 = 0.08$ 이나 Son 등(1994)의 $R^2 = 0.42$ 등보다 월등히 높은 것이다. 그러나 Dulohery 등 (1996)가 지수함수를 이용한 회귀식에서 보인 $R^2 = 0.85$ 보다는 낮았다. 이산화탄소 발생량과 토

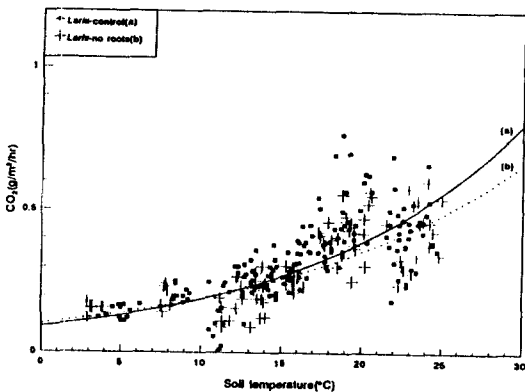


Fig. 3. Exponential regressions of soil respiration and soil temperature in a *Larix leptolepis* plantation. Regression equations are as follows; a: *Larix*-control, $Y = 0.0903 \times 10^{0.0320x}$ ($p = 0.0001$, $R^2 = 0.45$), b: *Larix*-no roots, $Y = 0.1001 \times 10^{0.0278x}$ ($p = 0.0001$, $R^2 = 0.59$).

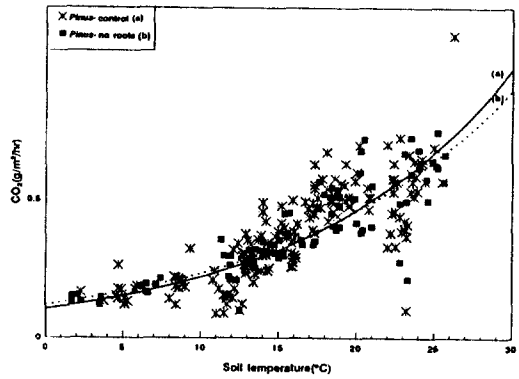


Fig. 4. Exponential regressions of soil respiration and soil temperature in a *Pinus rigida* plantation. Regression equations are as follows: a: *Pinus*-control, $Y = 0.1047 \times 10^{0.0324x}$ ($p = 0.0001$, $R^2 = 0.62$), b: *Pinus*-no roots, $Y = 0.1126 \times 10^{0.0296x}$ ($p = 0.0001$, $R^2 = 0.74$).

양온도의 상관관계가 대기온도에서보다 밀접하므로 이를 Fig. 3과 4에 수종별로 처리여부에 따라 각기 다른 지수함수의 회귀식으로 나타내었다.

토양습도와 이산화탄소 발생량과의 관계에 대하여는 기존의 연구에 따라 다른 결론에 이르고 있다. 즉 Bremner와 Huntington(1995)이나 Bringham과 Richardson(1992) 등은 양자 간의 관련성이 없다고 보고하였고, Weber(1985)는 낙엽종의 함수율이 이산화탄소 발생량과 관련이 있으며 15cm 깊이에서의 토양습도와는 상관관계가 없다고 보고하였다. 한편 Schlentner와 Van Cleve (1985)는 토양온도에 따라 토양습도가 이산화탄소의 발생량에 영향을 준다고 하여 10-20°C 사이의 토양온도에서 토양습도가 중요한 인자가 된다고 하였다. 그러나 본 연구에서 11월을 제외하고 모든 측정기간동안 토양온도가 10°C 이상이었으나 이때에도 양자 간의 상관관계는 유의하지 않았다($p > 0.1$). 토양발생 이산화탄소는 강우 직후 급격히 증가하는 추세를 보이기도 하는데(Ellert와 Gregorich, 1995) 본 연구에서 이산화탄소 측정 최소 1-2일 전에는 강우가 없었기 때문에 강우가 직접적으로 이산화탄소 발생에 영향을 주는 지 여부를 확인할 수는 없었다.

4. 뿌리의 호흡

뿌리의 호흡이 전체 토양발생 이산화탄소 양 가

운데 차지하는 비율이 본 연구에서는 3% 정도로 추정되었고 수종 간에 차이는 없었다($p>0.1$). 이는 식생의 종류나 생육단계에 따라 차이를 보이며 다른 연구에서 일반적으로 추정되고 있는 20-60%에 비해 낮으나(Behera 등, 1990; Bowden 등, 1993; Ellert와 Gregorich, 1995; Ewel 등, 1987b; Kelting 등, 1995), Phillipson 등(1975)의 4%와는 유사한 값이다(Bowden 등(1993)에 인용되어 있음). 본 연구결과의 낮은 뿌리호흡 비율은 기존의 연구를 바탕으로 몇가지 면에서 설명할 수 있을 것으로 보인다. 첫째, 본 연구에서 임지에 도랑을 파고 단근을 실시한 후 곧바로 7개월 동안 이산화탄소 발생량을 측정하였으나 일반적으로 임지에서 도랑을 파고 단근을 하더라도 4-9개월 동안은 뿌리가 여전히 살아 있어 뿌리의 호흡이 지속될 수 있다는 결과(Bowden 등, 1993; Ewel 등, 1987a; Fahey 등, 1988)에 비추어 뿌리의 호흡만을 분리, 측정하는데 시일이 부족하였다는 점을 들 수 있다. 즉 단근처리 후 충분한 시일이 경과한 다음 이산화탄소 발생량을 측정하였다면 보다 높은 뿌리호흡량을 관측할 수도 있었을 것이다. 둘째, 이전의 연구자들이 뿌리의 호흡을 추정할 때 보통 70-100cm의 깊이로 도랑을 파고 단근을 했으나(Bowden 등, 1993; Ewel 등, 1987b), 본 연구에서 처리구에 도랑을 팔 때 암석의 장애물로 인하여 50-60cm 깊이까지만 도랑을 파서 그 아래 깊이에 있는 토양내 뿌리는 여전히 활동을 계속하였을 수도 있다(암석을 제거할 경우 주위의 임목과 토양에 큰 영향을 줄 것으로 우려되어 60cm 깊이까지 한정하였다). 이러한 이유 등으로 인하여 본 연구에서 추정된 뿌리 호흡량은 실제에 비하여 과소 측정되었을 가능성이 있는 것으로 사료된다.

Bowden 등(1993)은 토양발생 이산화탄소의 양은 발생 근원에 따라 지상부 낙엽(37%), 지하부 낙엽(30%), 그리고 뿌리의 호흡(33%) 등으로 분배할 수 있다고 하였다. 그러나 본 연구 결과에서는 이와는 상이한 이산화탄소 발생 근원에 따른 분배형태가 있을 가능성도 보이고 있다. 즉 본 연구에서 뿌리호흡량에는 수종간 차이가 없었다 하더라도 동일 임지를 대상으로 한 다른 연구 결과에서 토양질소 무기화량은 낙엽층에서 높게 나타나(Son과 Lee, 1997) 토양미생물의 지하부 또는 일부 지상부 유기물 분해시 발생하는 이산

화탄소 발생량은 낙엽층 임지에서 많을 것으로 추측되었다. 그러나 지상부 유기물 공급량이 리기다소나무에서 더 많기 때문에 현재의 측정 자료로는 임지의 지상부 유기물 유입량 차이에 의한 이산화탄소 발생량이 미생물의 유기물 분해시 발생하는 이산화탄소 발생량 차이를 초과하고 있는 것으로 추론할 수 있다. 결국 지상부 낙엽으로 인해 발생하는 이산화탄소의 비율이 Bowden 등(1993)이 보고한 것에 비해 훨씬 높을 수도 있다는 것이다.

인용문헌

1. 김종성. 1996. 양평지역 리기다소나무, 낙엽송, 졸참나무림의 물질생산과 질소 및 인의 분포에 관한 연구. 고려대학교 박사학위논문.
2. Aber, J.D. and J.M. Melillo. 1991. Terrestrial Ecosystems. Saunder College Publ. pp.429.
3. Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. Pages 467-476 in A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, eds. Methods of Soil Analysis 2. Chemical and Microbiological Properties. Am. Soc. Agron.
4. Behera, N., S.K. Joshi, and D.P. Pati. 1990. Root contribution to total soil metabolism in a tropical forest soil from Orissa, India. For. Ecol. Manage. 36:125-134.
5. Bertram, H.-S. 1991. Carbon dioxide and climate: climatic impact of soil-borne CO₂. Pages 391-395 in J. Berthelium, ed. Diversity of Environmental Biogeochemistry. Elsevier.
6. Bowden, K.D., K.J. Nadelhoffer, R.D. Boone, J.M. Melillo, and J.B. Garrison. 1993. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. Can. J. For. Res. 23:1402-1407.
7. Bremner, J.L and T.G. Huntington. 1995. The effects of temperature and moisture on dormant season soil respiration in a southern piedmont forest. Agron. Abst. pp. 309.

8. Bridgham, S.D. and C.J. Richardson. 1992. Mechanisms controlling soil respiration(CO₂ and CH₄) in southern peatlands. *Soil Biol. Biochem.* 24:1089-1099.
9. Cropper, W.P., K.C. Ewel, and J.W. Raich. 1985. The measurement of soil CO₂ evolution *in situ*. *Pedobiologia* 28:35-40.
10. Duloher, C.J., L.A. Morris, and R. Lowrance. 1996. Assessing forest soil disturbance through biogenic gas fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:291-298.
11. Edwards, N.T. 1982. The use of soda-lime for measuring respiration rates in terrestrial systems. *Pedobiologia* 23:321-330.
12. Ellert, B.H and E.G. Gregorich. 1995. Management-induced changes in the actively cycling fractions of soil organic matter. Pages 119-138 in W.W. McFee and J.M. Kelly, eds. *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Soil Sci. Soc. Am.
13. Ewel, K.C., W.P. Cropper, and H.L. Gholz. 1987a. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. I. Changes through time. *Can. J. For. Res.* 17:325-329.
14. Ewel, K.C., W.P. Cropper, and H.L. Gholz. 1987b. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. II. Importance of root respiration. *Can. J. For. Res.* 17:330-333.
15. Fahey, T.J. J.W. Hughes, M. Pu, and M.A. Arthur. 1988. Root decomposition and nutrient flux following whole-tree harvest of northern hardwood forest. *For. Sci.* 34:744-768.
16. Fernandez, I.J., Y. Son, C.R. Kraske, L.E. Rustad, and M.B. David. 1993. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1115-1121.
17. Garrett, H.E. and G.S. Cox. 1973. Carbon dioxide evolution from the floor of an oak-hickory forest. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37:641-644.
18. Kelting, D.L., J.A. Burger, and G.S. Edwards. 1995. Fractionating total soil respiration into root, rhizo-microbial, and non-rhizomicrobial respiration components. *Agron. Abst.* pp.308.
19. Meentemeyer, V. 1978. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecol.* 59:465-472.
20. Melillo, J.M., J.D. Aber, and J.F. Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecol.* 63:621-626.
21. Minderman, G. and J.C. Vulto. 1973. Comparison of techniques for the measurements of carbon dioxide evolution from soil. *Pedobiologia* 13:73-80.
22. Nakane, K. 1995. Soil carbon cycling in a Japanese cedar(*Cryptomeria japonica*) plantation. *For. Ecol. Manage.* 72:185-197.
23. Nakane, K., M. Yamamoto and H. Tsubota. 1983. Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Jap. J. Ecol.* 33:397-408.
24. Phillipson, J., R.J. Putman, J. Steel, and S.R.J. Woodell. 1975. Litter input, litter decomposition, and the evolution of carbon dioxide in a beech woodland-Wytham Woods, Oxford. *Oecologia* 20:203-217.
25. Raich, J.W. and K.J. Nadelhoffer. 1989. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecol.* 70:1346-1354.
26. Reiners, W.A. 1968. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. *Ecol.* 49:471-483.
27. Schlentner, R.E. and K. Van Cleve. 1985. Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Can. J. For. Res.* 15:97-106.
28. Singh, J.S. and S.R. Gupta. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Bot. Rev.* 43:449-528.
29. Sommerfeld, R.A., A.R. Mosier, and R.C. Musselman. 1993. CO₂, NH₄, and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets. *Nature* 361:140-142.
30. Son, Y and I.K. Lee. 1997. Soil nitrogen mineralization in adjacent stands of larch,

- pine, and oak in central Korea. *Ann. Sci. For.* (in press).
31. Son, Y., G. Lee and J.Y. Hong. 1994. Soil carbon dioxide evolution in three deciduous tree plantations. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fertil.* 27:290-295.
32. Weber, M.G. 1985. Forest soil respiration in eastern Ontario pine ecosystems. *Can. J. For. Res.* 15:1069-1073.
33. Weber, M.G. 1990. Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 31:1-14.
34. Witkamp, M. 1969. Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil. *Ecology* 50:922-924.