

발생원별 토양 호흡 측정 연구 방법에 대한 고찰

구진우¹ · 손요환¹ · 김래현¹ · 김준²

¹고려대학교 환경생태공학부

²연세대학교 대기과학과

(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

A Study on Methods of Separating Soil Respiration by Source

Jin-Woo Koo¹, Yowhan Son¹, Rea-Hyun Kim¹ and Joon Kim²

¹Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

²Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

ABSTRACT

We review three methods of separating soil respiration into root and soil microbial contribution: (1) component integration, (2) root exclusion, and (3) isotopic method. Among these methods, component integration and root exclusion are most commonly used. Root respiration contribution to soil respiration estimated by the root exclusion method is higher than those by other two methods. Trenching has little environmental disturbances in soil or on surface of site compared to other methods in root exclusion such as root removal and gap formation. Isotopic method has an advantage over other methods because of minimal soil and root disturbances, but this method is costly and requires techniques for the complex analysis. Trenching seems to be an appropriate *in situ* method for calculating component contributions to soil respiration with minimum disturbances in site. However, the method overestimates the contribution of microbial respiration because of root decay, and realistic results could be obtained by estimating root decay or avoiding large roots in trenched plots.

Key words : Component integration, Isotopic method, Root respiration, Microbial respiration, Soil respiration, Trenching

I. 서 언

탄소 순환은 산림생태계에서 에너지 흐름과 물질 순환을 연구하는 중요한 과제 중 하나이다(Son and Kim, 1996). 특히 최근 온실가스 증가로 인한 지구온난화가 환경변화를 가져올 것으로 예상되고 있어(Vitousek *et al.*, 1997), 탄소 순환에 대한 관심이 높다. 토양 호흡은 전지구적 탄소 순환에서 두 번째로 큰 플럭스(75×10^{15} gC/yr)이며(Bond-lamberty *et al.*, 2004; Schlesinger and Andrews, 2000) 토양을 대기 중 이산화탄소의 공급원 혹은 수용원으로서의 역할로

평가할 수 있어(Hanson *et al.*, 2000) 탄소 순환 연구에서 매우 중요하다. 토양 호흡은 토양 내 유기물 분해나 뿌리의 호흡에 의해 발생한 이산화탄소가 대기 중으로 방출되는 것으로, 토양 호흡을 미생물 호흡과 뿌리 호흡으로 구분하여 측정하는 것이 탄소 순환을 정확하게 이해하는데 필요하다(Bowden *et al.*, 1993; Ewel *et al.*, 1986; Son and Kim, 1996). 또한 토양 호흡 중 미생물 호흡량은 순생태계생산량을 추정하는데도 필요하며, 산출된 순생태계생산량은 eddy 플럭스 측정 결과와 비교하여 분석되기도 한다(Choi, 2004; Gower, 2003).

발생 원인으로 토양 호흡을 측정하는 연구는 다양한 방법에 의해 수행되고 있다. 즉, 발생 원인별 호흡량을 직접 측정하는 방법, 미생물 호흡을 측정하고 뿌리 호흡을 추정하는 방법, 토양 호흡 내 탄소 동위원소 분포를 측정하여 발생 원인별 토양 호흡량을 추정하는 방법 등으로 수행되는데, 각 방법별로 서로 다른 장점과 제한조건이 있다(Hanson *et al.*, 2000). Hanson *et al.* (2000)은 몇 가지 방법들을 분석하여 실외 실험에 적합한 방법을 제안하고자 한 바 있으나, 현재까지 이루어진 연구 사례에 대해 방법별로 비교 분석하고 각 방법별 제한 조건 및 그 조건을 보완하기 위한 연구는 미흡하다.

본 연구에서는 발생 원인별 토양 호흡 측정 연구의 경향과 방법을 비교 분석하고, 이전 연구에서 제시된 제한 조건의 보완 방법을 알아보며, 교란을 최소화하고 조사 지역의 환경 특성이 반영되는 토양 호흡 구분 연구 방법을 제시하고자 하는데 목적이 있다. 그리고 탄소와 물의 순환에 관한 학제간 연구가 수행되고 있는 광릉 국립수목원에 위치한 KoFlux 슈퍼사이트(Kim, 2005; Kim *et al.*, 2002)에서 이러한 방법의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

II. 발생 원인별 토양 호흡 구분 측정 연구 사례의 분석

발생 원인으로 토양 호흡량을 측정하기 위한 주요 연구 방법은 토양 호흡의 구성요소를 직접 측정하는 방법(component integration), 뿌리를 제거하는 방법(root exclusion), 동위원소를 이용하는 방법(isotopic method) 등으로 구분된다(Bond-lamberty *et al.*, 2004; Hanson *et al.*, 2000). 구성 요소 직접 측정 방법은 총 토양 호흡량에서 직접 측정한 낙엽낙지 분해량과 뿌리 호흡량을 감하여 미생물 호흡을 추정하는 것이며(Edwards and Harris, 1977; Edward and Sollins, 1973), 뿌리 제거 방법은 뿌리를 제거한 지역에 토양 호흡 측정구를 설치하여 미생물 호흡에 의한 토양 호흡량을 측정하고, 총 토양 호흡량에서 미생물 호흡 부분을 제외시켜 뿌리 호흡을 산출하는 것이다(Bowden *et al.*, 1993; Ewel *et al.*, 1986 Nakane *et al.*, 1983; Wiant, 1967). 그리고 동위원소 이용 방법은 토양 호흡의 결과로 방출되는 이산화탄소의 안정동위원소 또는 방사성 동위원소의 조성을 측정하여

발생 원인에 따른 토양 호흡량을 추정하는 것이다(Hanson *et al.*, 2000).

산림 생태계에서 수행된 발생 원인별 토양 호흡의 구분 측정에 대한 66개 연구(Appendix 1)를 사용된 방법별로 분석하였다(Fig. 1). 연구 사례 수는 구성 요소 직접 측정 방법이 25개(38%), 뿌리 제거 방법이 24개(36%), 동위원소 이용 방법이 9개(14%), 그리고 방법이 미제시된 연구가 8개(12%)로 나타났다. 구성 요소 직접 측정 방법과 뿌리 제거 방법의 연구 사례 수가 서로 비슷하나 동위원소 이용 방법보다는 월등히 많다. 따라서 이 두 방법이 일반적으로 널리 사용되고 있는 것으로 판단된다. 주요 방법별로 측정된 전체 토양 호흡에서 뿌리 호흡이 차지하는 평균 비율은 뿌리 제거 방법이 52%로 가장 높고, 구성 요소 측정 방법이 45%, 그리고 동위원소 이용 방법이 34% 등으로 나타났다. 그리고 측정 방법이 제시되지 않은 연구에서는 44%의 평균 뿌리 호흡량을 나타냈다. 이와 같이 측정방법에 따라 차이는 있지만 모든 방법을 총괄적으로 분석하면 토양 호흡 중 뿌리 호흡의 비율은 0-90%의 범위에 있으며, 평균 46% 정도로 볼 수 있다.

III. 발생 원인별 토양 호흡 구분 측정 방법과 제한 조건

3.1. 구성 요소 직접 측정 방법

구성 요소 직접 측정 방법은 뿌리, 낙엽낙지, 무기 토양 등 토양 호흡 발생의 구성요소별 호흡량을 직접 측정하는 것이다. 뿌리 호흡과 낙엽낙지의 분해로 발생하는 이산화탄소량을 실험실 내에서 측정하는데

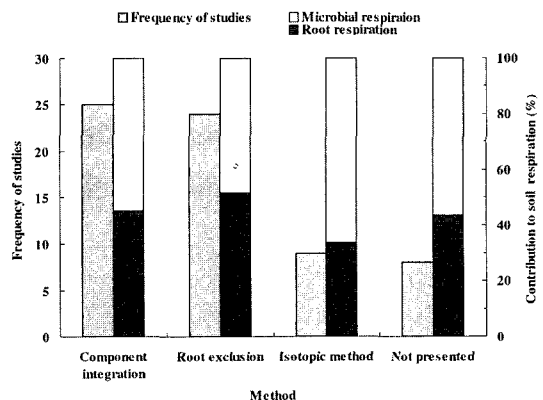


Fig. 1. Reported frequency and contribution of microbial and root respiration to soil respiration in forest ecosystems.

(Edwards and Harris, 1977), 이를 위하여 뿌리와 낙엽낙지를 토양에서 물리적으로 분리할 때 뿌리 표면의 대기 조성 변화, 토양 미생물의 교란 등이 발생한다(Hanson *et al.*, 2000). 또한 뿌리 호흡 측정 과정에서 인위적으로 조성한 무기 토양을 사용하는데, 이 토양 내 자연 상태와 다른 이산화탄소 농도가 뿌리 호흡에 영향을 줄 것으로 판단된다(Qi *et al.*, 1994). 따라서 구성 요소 측정 방법은 대상지역의 환경 특성을 반영한 상태에서 발생 원인별 토양 호흡량을 정확히 측정하는 연구에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

3.2. 뿌리 제거 방법

뿌리 제거 방법은 조사 지역에서 일정한 조사구 내의 뿌리를 제거한 다음 토양 호흡을 측정하고, 나머지 조사구의 총 토양 호흡량과 비교하여 발생 원인별 토양 호흡량을 산출하는 것이다. 이 방법은 뿌리를 제거하는 방법의 차이에 따라, 뿌리를 굴취하여 제거하는 방법(root removal), 지상부 식생을 제거하는 방법(gap formation), 그리고 단근 처리를 이용하는 방법(trenching) 등으로 세분된다(Hanson *et al.*, 2000).

(1) 뿌리를 굴취하는 방법 : 이 방법은 뿌리가 존재하는 깊이까지 토양을 파고 뿌리를 제거한 다음 토양으로 매우고 여기에서 토양호흡을 측정하는 것이다. 그리고 뿌리가 존재하는 곳과의 차이로 뿌리 호흡량을 계산한다(Wiant, 1967). 그런데 뿌리 굴취 과정에서 일어나는 토양 구조 파괴, 토양 수분 변화 등 많은 교란이 굴취한 지역의 토양 호흡에 영향을 주어, 자연 상태의 뿌리 호흡과는 다른 값을 보이게 된다. 따라서 뿌리를 굴취하는 방법은 조사지의 자연 환경을 그대로 반영하기 위한 연구에 적용하기는 어려우며, 뿌리 굴취 후 토양 회복 가능성에 대한 논의도 필요하다(Hanson *et al.*, 2000).

(2) 지상부의 식생을 제거하는 방법 : 이 방법은 지상부 식생의 일부를 제거하여 뿌리를 고사시킨 후, 지상부 식생이 존재하는 지역의 토양 호흡량에서 지상부 식생이 제거된 지역에서의 토양 호흡량을 감하여 뿌리 호흡량을 산출하는 것이다(Nakane *et al.*, 1983). 이 방법에서 지상부 식생 제거 범위는 측정 지점 아래로의 주변 뿌리 침입이 발생되지 않을 정도의 크기로 선정하는 것이 중요하다. 그러나 이 과정에서 틈이 형성되는데, 틈으로 유입되는 광량의 증가가 온도 상승과 토양 수분 감소 등의 교란을 발생시켜 토양 호흡

에 영향을 준다. 차광막을 사용하여 온도에 대한 교란은 억제할 수 있으나, 차광막과 임관의 증산작용, 임관통과 과정에서 발생하는 강우의 성질 변화(Joo *et al.*, 1999) 등 기능적 차이로 토양 수분에 대한 교란을 방지하기는 어렵다(Hanson *et al.*, 2000). 한편 현재 진행되고 있는 KoFlux 연구 대상지는 학술보전림이라는 특성으로 인하여 지상부 식생을 제거하기 어려운 실정이다.

(3) 단근 처리를 이용하는 방법 : 이 방법은 토양 호흡 측정 지점 주변의 뿌리를 자르고 측정 지점 내의 뿌리를 고사시켜 뿌리를 제거하며, 단근 처리 후 방어벽을 설치하여 주변 뿌리의 침입을 막는 방법이다(Bowden *et al.*, 1993; Ewel *et al.*, 1986). 뿌리 호흡량은 뿌리가 존재하는 지역의 토양 호흡량에서 단근 처리로 뿌리가 고사된 지역의 토양 호흡량을 감하여 산출한다. 잘려진 뿌리가 고사되면서 뿌리 호흡이 제거되지만, 구성 요소 측정 방법과 뿌리 굴취 방법에서 발생하는 토양 구조 파괴 현상은 일어나지 않는다. 또한 지상부 식생의 제거 방법에서 발생하는 광선 유입량 증가에 따른 환경변화 등도 발생하지 않는다(Hanson *et al.*, 2000).

단근 처리 후 뿌리 제거 지역에서 토양 호흡량이 급격히 증가하다 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고되고 있다(Bowden *et al.*, 1993; Ewel *et al.*, 1987). 이것은 잘려진 뿌리가 토양미생물에 의해 분해되면서 이산화탄소가 발생하여, 자연 상태보다 미생물 호흡이 증가되기 때문이다. 증가된 미생물 호흡은 평균잔류기간이 1년 이하(Fitter *et al.*, 1996)인 세균의 분해에 의해 발생하는 것으로 판단된다. Bowden *et al.* (1993)은 뿌리의 분해 영향을 최소화하기 위해 단근 처리하고 9개월이 경과한 후 측정을 시작하였고, Ewel *et al.* (1987)은 단근 처리한 시기로부터 4개월 후 토양 호흡을 측정할 바 있다. 한편, 굵은 뿌리의 분해 효과는 수년간 지속된다(Bond-lamberty *et al.*, 2004). 고사된 뿌리의 분해 영향은 측정 기간동안 분해된 뿌리의 증량 변화로 추정하거나(Lee *et al.*, 2003), 수간으로부터 떨어진 곳을 조사 위치로 지정하는 등 굵은 뿌리가 있는 곳을 피하여 설치하는 방법으로 보완할 수 있다(Bond-lamberty *et al.*, 2004; Hanson *et al.*, 2000). 따라서 단근 처리를 이용하는 방법은 구성 요소 직접 측정 방법, 뿌리 굴취 방법 등에서 발생하는 토양환경에 대한 교란과(Bowden *et*

al., 1993) 지상부 식생을 제거하는 방법에서 발생하는 광량 변화에 따른 교란을 억제하며 뿌리 호흡을 측정할 수 있는 적절한 방법 중 하나로 판단된다.

3. 동위원소 이용 방법

이 방법은 토양 호흡의 결과로 방출되는 이산화탄소의 안정동위원소 또는 방사성 동위원소의 조성을 측정하여 뿌리 호흡량을 추정하는 것으로 다른 방법과 달리 생태계의 교란이 발생되지 않는다는 장점이 있다. 그러나 시료 채취 및 분석 절차가 다소 복잡하고 자료 해석 시 고려해야 할 식물의 생리학적 그리고 토양의 지화학적 요소의 불확실성 때문에 실제 적용에는 많은 어려움이 따른다(Hanson et al., 2000). 따라서 동위원소를 이용하는 방법은 개선의 여지가 많으며, 실험의 용이성과 신뢰성을 개선시키는 등의 향후 연구를 통한 표준 방법의 확립이 필요하다. 동위원소를 이용한 뿌리 호흡연구의 주요 방법으로 방사성 동위원소를 인위적인 추적자로 이용하는 방법과 자연 상태에서 뿌리 호흡과 미생물 호흡에 의해 방출되는 이산화탄소의 안정 동위원소 비의 차이를 이용하는 방법이 있다.

(1) 인위적인 추적자를 이용하는 방법(radioactive isotope technique): 이 방법은 방사성 동위원소(^{14}C) 추적자를 식물체에 투입한 후, 뿌리 호흡에 의해 방출된 이산화탄소의 추적자 동위원소 함량과 추적자의 영향을 받지 않은 미생물 호흡에 의해 발생된 이산화탄소의 동위원소 함량을 비교하는 것이다(Kuzyakov, 2002). 그런데 이 방법은 많은 비용과 시설의 기술적 난이성, 방사성 동위원소의 위험성, 그리고 추적기간과 식물의 성장 단계를 고려하여 실험을 수행해야 한다. 추적기간은 추적자가 식물체 내로 투입되는 순간부터 물질 분배과정을 거친 후 다시 호흡 등을 통해 배출되기까지의 기간으로, 식물 종류나 크기, 성장 단계에 따라 다르기 때문에 추적기간 결정시 세심한 주의가 요구된다(Hanson et al., 2000). 생활사가 긴 목본식물을 대상으로 동위원소를 이용한 방법을 적용할 경우, 생산된 물질 분배가 일년생 초본류 등과 같이 신속하게 나타나지 않아, 추적기간을 짧게 설계한 연구에서는 추적자 동위원소 농도가 측정할 수 있는 농도보다 낮게 발생할 가능성이 높다(Hanson et al., 2000). 또한 식물의 성장 단계에 따라 체내에서 물질 분배과정이 달라져 뿌리 호흡에서 발생하는 추적자 동위원소

의 함량에 영향을 미치게 되므로, 성장 단계를 고려하여 추적기간을 정해야 한다. 예를 들면 미성숙시기에는 뿌리에 탄소의 저장량이 많았으나, 성숙시기에 눈이 발생하면서 눈으로 직접적으로 이동하는 탄소량이 증가한다(Hanson et al., 2000). 따라서 뿌리 호흡량 측정 시기를 뿌리로 이동하는 물질 분배량에 영향을 많이 받는 시기인 개화와 결실 시기를 고려하여 선택해야 한다. 식물의 성장 단계에서 발생하는 문제를 극복하기 위해 추적자를 오랜 기간 동안 연속적으로 투입하는 방법이 이용되기도 한다. 이 방법은 식물에 투입된 추적자 동위원소의 양이 안정화되어 식물체 내에서 균질한 분포를 보인다는 장점이 있지만, 연속적으로 추적자를 투여할 장비가 비싸고, 산림지역에서는 직접 적용하기 어렵다.

(2) 자연 상태의 안정 동위원소 조성을 측정하는 방법(stable isotope technique): 이 방법은 자연 상태에서 뿌리 호흡과 미생물 호흡에 의해 방출되는 이산화탄소의 안정 동위원소 조성($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)의 차이를 이용하여 뿌리 호흡의 기여도를 산출하는 것이다(Brupinderpal-Singh et al., 2003). 또한 이 방법은 큰 규모의 FACE(free-air CO_2 enrichment) 실험으로 수행될 수 있는데, IRGA(Infrared Gas Analyser) 측정 등에서 사용하는 chamber 등의 밀폐 공간으로 인한 교란을 피할 수 있다(Hanson et al., 2000). 그러나 이 방법은 미생물 호흡과 뿌리 호흡에서 발생된 탄소의 안정 동위원소 비가 유사하여 구분하기 어렵고(Hanson et al., 2000), 이산화탄소 분자 내 산소 동위원소의 경우 토양 내 존재하는 물과의 반응에 의해 쉽게 조성이 변화하여 토양 호흡 발생원인에 따른 본래의 조성을 유지하기 어려운 단점이 있다. 그리고 이 방법이 FACE 실험에서 발생하는 이산화탄소 시비 효과는 토양 호흡을 증가시키므로(Schlesinger and Andrews, 1999), 측정된 발생원별 토양 호흡은 자연 상태의 것과 차이를 보일 것으로 판단된다.

IV. 결 론

산림생태계에서 발생원별 토양호흡을 측정하는 방법으로는 구성 요소 직접 측정 방법과 뿌리 제거 방법이 널리 이용되고 있는데, 이 가운데 뿌리 제거 방법 중 하나인 단근 처리를 이용한 방법이 조사 지역의 자연 환경을 그대로 반영할 수 있으므로 KoFlux와

같은 탄소와 물의 순환 관련 연구에 적합한 것으로 판단된다. 그런데 뿌리 호흡량을 측정하기 위해 뿌리를 뽑아서 직접 측정하거나 뿌리를 굴취한 토양에서 측정하면 토양과 뿌리에 교란이 발생한다. 또한 지상부 식생을 제거하여 뿌리 호흡을 측정하는 방법은 광량증가로 인한 교란이 발생하여 자연 상태의 뿌리 호흡량과 달라진다. 안정동위원소를 이용하는 방법은 고가의 장비와 전문적인 기술이 필요하며, 식물의 생리적 특성을 고려하는 등의 측정과정이 어려워 현재까지는 실험에 적용성이 낮다. 그러나 단근 처리를 이용한 뿌리 호흡 측정은 자연 상태 연구 대상지의 특성을 반영하여 교란을 최소화하고, 다른 실험 방법보다 비교적 간단한 과정으로 이루어질 수 있다. 단근 처리된 뿌리의 분해로 인한 측정 오차 발생이 문제점으로 지적될 수 있으나, 굵은 뿌리를 피하여 뿌리 제거 지역을 설치하고 뿌리의 분해량을 측정하는 등의 실험을 통하여 이러한 문제점을 보완할 수 있다. 따라서 단근 처리를 이용한 방법이 KoFlux와 같은 연구대상지에서 발생원별 토양 호흡량 측정에 적합한 실험법으로 이용될 수 있을 것으로 보인다.

V. 적 요

탄소 순환에 중요한 부분을 차지하는 토양 호흡을 뿌리와 토양 미생물에 의한 호흡으로 분리하는 세 가지 연구 방법, 즉 (1) 구성 요소 직접 측정 방법, (2) 뿌리 제거 방법, (3) 동위원소 이용 방법을 검토하였다. 이 중에서, 구성 요소 직접 측정 방법과 뿌리 제거 방법이 가장 널리 사용되고 있는데, 전체 토양 호흡에서 뿌리 호흡이 차지하는 부분은 뿌리 제거 방법이 다른 두 방법과 비교하여 더 높게 나타난다. 뿌리 제거 방법 중 단근처리 방법은 뿌리를 굴취하여 제거하거나 지상부 식생을 제거하는 방법과 비교해 볼 때 토양이나 관측 지면에 거의 교란을 일으키지 않는다. 동위원소 이용 방법은 다른 방법과 비교해서 토양이나 뿌리에 미치는 영향이 가장 적으나 비용이 많이 들고 복잡한 분석 기술을 필요로 한다. 관측지의 교란을 최소화하면서 발생원별 토양 호흡에 기여하는 부분을 계산하는 방법으로 단근처리 방법이 적절한 것으로 사료된다. 그러나 이 방법이 뿌리의 분해로 인해 미생물의 호흡을 과대평가함을 고려해서 뿌리의 분해를 동시에 관측하거나 큰 뿌리들을 피해서 단근처리 대상지

역을 선택함으로써 현실적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)의 지원을 받아 수행되었다. 연구에 도움을 주신 연세대학교 이동호 박사께 감사드립니다.

인용문헌

- Bhupinderpal-Singh, A. Nordgren, M. Ottosson L fvenius, M. N. H gberg, P. E. Mellander, and P. H gberg, 2003: Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year. *Plant, Cell and Environment* **26**, 1287-1296.
- Bond-Lamberty, B., C. Wang, and S. T. Gower, 2004: Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiology* **24**, 1387-1395.
- Bowden, R. 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. *Canadian Journal of Forest Resource* **23**, 1402-1407.
- Choi, T., 2004: CO₂ and energy exchange over a Gwangneung broadleaf deciduous forest in a complex terrain. Ph.D Dissertation. Yonsei University, Korea.
- Edwards, N. T. and P. Sollins, 1973: Continous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components. *Ecology* **54**, 106-412.
- Edwards, N. T. and W. F. Harris, 1977: Carbon cycling in a mixed deciduous forest floor. *Ecology* **58**, 431-437.
- Ewel, K. C., W. P., Jr., and H. L. Gholz, 1987: Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations: Importance of root respiration. *Canadian Journal of Forest Resource* **17**, 330-333.
- Fitter, A. H., G. K. Self, J. Wolfenden, M. M. I. van Vuuren, T. K. Brown, L. Williamson, J. D. Graves, and D. Robinson, 1996: Root production and mortality under elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant and Soil* **187**, 299-306.
- Gower, S. T., 2003: Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. *Annual Review of Environment and Resource* **28**, 169-207.
- Hanson, P. J., N. T. Edwards, C. T. Garten, and J. A. Andrews, 2000: Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* **48**, 115-146.
- Joo, Y. T., H. O. Jin, Y. Son, J. M. Oh, and D. Y. Jung, 1999: The effects of the interaction between precipitation and

- tree species on the chemical properties of throughfall and stemflow. *Journal of Korean Forest Society* **88**(2), 149-156. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., W. Kim, C. Cho, B. Choi, H. Chung, B. Lee, K. Kim, K. Kim, M. Kim, B. Lee, D. Lee, G. Lee, J. Lee, J. Lim, J. Oh, E. Park, J. Shim, J. Yun, and C. Rho, 2002, KoFlux: A new tool to study the biosphere-atmosphere interactions in Asia, in *Ecology of Korea* edited by D. Lee, Y. Son, 215-229.
- Kim, J., 2005: Coping with Climate Change Protocols by Understanding Water and Carbon Cycles in Korean Ecosystems: Foreward, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, this issue. (in Korean with English abstract)
- Kuzyakov, K., 2002: Separation microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils: a comparison of four methods. *Soil Biology and Biochemistry* **34**, 1621-1631.
- 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.
- Nakane, K., M. Yamamoto, and T. Hiroyuki, 1983: Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Japanese Journal of Ecology* **33**, 397-408.
- Qi, J., J. D. Marshall, and K. G. Mattson, 1994: High soil carbon dioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas fir. *New Phytologist* **128**, 435-442.
- Schlesinger, W. H. and J. A. Andrews, 2000: Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* **48**, 7-20.
- Son, Y. and H. W. Kim, 1996, Soil respiration in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* Plantations. *Journal of Korean Forest Society* **85**(3), 496-505. (in Korean with English abstract)
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco, and J. M. Melillo., 1997: Human domination of earth's ecosystems. *Science* **277**, 494-499.
- Wiant, H. V., 1967: Contribution of roots to forest soil respiration. *Advances in Plant Science* **18**, 163-167. (Cited from Hanson, P. J., N. T. Edwards, C. T. Garten, and J. A. Andrews, 2000: Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* **48**, 115-146)

Appendix 1. Published studies for root/rhizosphere contributions to total soil respiration in forest ecosystem by species and method type. Setting type is the type of experimental setting for each study. (Bond-Lamberty *et al.*, 2004; Hanson *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2003; Son and Kim, 1996).

Species	Method type*	Setting type	Root contribution (%)	Reference
<i>Abies</i>	-	-	30	Lieth and Ovellette, 1962
<i>Betula</i>	RE	container	69	Minderman and Vulto, 1973
<i>Betula</i>	RE	contatner	33-50	Minderman and Vulto, 1973
<i>Castanea/Fagus</i>	CI	field	20	Andersen, 1973
<i>Fagus</i>	CI	field	5	Phillipson, 1975
<i>Fagus</i>	RE	field	40	Brumme, 1995
<i>Fagus/Abies</i>	-	field	42	Nakane, 1980
<i>Fagus/Picea</i>	IT	field	40	Dörr and Münnich, 1987
<i>Fagus/Picea</i>	IT	field	75	Dörr and Münnich, 1986
<i>Fagus/Picea</i>	IT	field	25	Dörr and Münnich, 1986
<i>Larix leptolepis, Pinus rigida</i>	RE	field	3	Son and Kim, 1996
<i>Liriodendron</i>	CI	field	22-36	Edwards and Sollins, 1973
<i>Liriodendron</i>	CI	field	77	Edwards and Harris, 1977
<i>Nothofagus</i>	CI	field	23	Tate <i>et al.</i> , 1993
<i>Picea abies,</i>				
<i>Pinus sylvestris</i>	CI	field	~31	Widen and Majdi, 2001
<i>Picea abies,</i>				
<i>Pinus sylvestris</i>	CI	field	~24	Widen and Majdi, 2001
<i>Picea mariana</i>	RE	field	17-22	O'Connell <i>et al.</i> , 2003
<i>Picea mariana</i>	-	-	24	Malhi <i>et al.</i> , 1999
<i>Picea mariana</i>	CI	field	54	Uchida <i>et al.</i> , 1998
<i>Picea mariana</i>	CI	field	6	Uchida <i>et al.</i> , 1998
<i>Picea mariana</i>	CI	field	80	Uchida <i>et al.</i> , 1998
<i>Picea mariana</i>	CI	field	43	Uchida <i>et al.</i> , 1998

Appendix 1. Continued.

Species	Method type*	Setting type	Root contribution (%)	Reference
<i>Picea mariana</i>	CI	field	0	Uchida <i>et al.</i> , 1998
<i>Picea mariana</i>	CI	field	82	Flanagan and Van Cleve, 1977
<i>Picea mariana</i>	CI	field	80	Flanagan and Van Cleve, 1977
<i>Picea mariana</i>	CI	field	90	Flanagan and Van Cleve, 1977
<i>Picea mariana</i> , <i>Pinus banksiana</i> , <i>Populus tremuloides</i>	RE	field	5-40	Bond-Lamberty <i>et al.</i> , 2004
<i>Pinus</i>	RE	field	45-66	Wiant, 1967.
<i>Pinus banksiana</i>	RE	field	35	Striegl and wickland, 1998
<i>Pinus elliotii</i>	RE	field	51	Ewel <i>et al.</i> , 1987
<i>Pinus elliotii</i>	RE	field	62	Ewel <i>et al.</i> , 1987
<i>Pinus sylvestris</i>	-	-	54	Hogberg <i>et al.</i> , 2001
<i>Pinus taeda</i>	RE	field	67	Edwards, 1991
<i>Pinus taeda</i>	RE	field	78	Edwards, 1991
<i>Pinus taeda</i>	RE	field	54	Edwards, 1991
<i>Pinus taeda</i>	RE	field	67	Edwards, 1991
<i>Pinus taeda</i>	IT	field	49	Andrew <i>et al.</i> , 1997
<i>Pinus resinosa</i>	RE	field	40-65	Haynes and Gower, 1995
<i>Pinus densiflora</i>	RE	field	47-51	Nakane <i>et al.</i> , 1983
<i>Pinus ponderosa</i>	CI	field	~90	Johnson <i>et al.</i> , 1994
<i>Populus Eureamerican</i>	IT	field	20	Horwath <i>et al.</i> , 1994
<i>Populus tremuloides</i>	CI	field	60	Russel and Voroney, 1998
<i>Pseudotsuga</i> (1-y)	IT	chamber	28	Lin <i>et al.</i> , 1998
<i>Pseudotsuga</i> (1-y)	IT	chamber	12	Lin <i>et al.</i> , 1998
<i>Pseudotsuga</i> (1-y)	IT	chamber	25	Lin <i>et al.</i> , 1998
<i>Pseudotsuga</i> (1-y)	IT	chamber	30	Lin <i>et al.</i> , 1998
<i>Quercus</i>	RE.	field	84	Edwards and Ross-Todd, 1983
<i>Quercus</i>	CI	lab	40	De Boois, 1974
<i>Quercus</i>	-	field	48	Kira, 1978
<i>Quercus</i>	-	field	50	Nakane and Kira, 1978
<i>Quercus</i>	CI	field	6-11	Coleman, 1973
<i>Quercus</i>	RE	field	90	Thierron and Laudelout, 1996
<i>Quercus</i>	-	field	48-52	Nakane, 1980
<i>Quercus</i>	RE	field	52	Keltion <i>et al.</i> , 1998
<i>Quercus/Acer</i>	RE	field	33	Bowden <i>et al.</i> , 1993
<i>Quercus/Carya</i>	CI.	field	>50	Garret and Cox, 1973
<i>Quercus crispula</i> , <i>Betula ermanii</i>	RE	field	39	Lee <i>et al.</i> , 2003
<i>Tsuga</i>	RE	field	37-52	Wiant, 1967
<i>Broad-leaved</i>	RE	field	51	Nakane <i>et al.</i> , 1996
<i>Hardwood</i>	RE	field	13-17	Catricala <i>et al.</i> , 1997
<i>Hardwood</i>	CI	lab	~20	Hendrickson and Robinson, 1984
<i>Hardwood</i>	CI	lab	43-58	Hendrickson and Robinson, 1984
<i>Tropical deciduous</i>	CI	field	50.5	Behara <i>et al.</i> , 1990
<i>Tropical forest</i>	CI	field	55	Trumbore <i>et al.</i> , 1995
<i>Tropical forest</i>	CI	field	43	Trumbore <i>et al.</i> , 1995
<i>Tropical forest</i>	§—	field	49	Nakane, 1980

*CI = component integration, RE = root exclusion, and IT = isotopic method.