

## 아차산 낙엽활엽수림과 침엽수림 임상의 미기후 특성과 토양탄소 축적량 및 토양호흡 특성

민윤경 · 이재만 · 이은혜 · 전호수 · 이재석

건국대학교 이과대학 생명과학과

### A Study on the Microclimate and Soil Characterstics in Temperate Deciduous and Evergreen Coniferous Forest in Mt. Acha

MIN, Youn Kyung · Jae-Man LEE · Eun-Hye LEE · Ho-Su JEON · Jae-Seok LEE

Department of Biological Sciences, College of Science, Konkuk University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

We investigated the differences in microclimate and soil characteristics between the evergreen coniferous(Mang-u) and the temperate deciduous hardwood forest(Uminae) that different with dominant species in Mt. Acha. (Mt. Acha is located in urbane.) Guri, along the riverside, is the control site which consist of a herbaceous plant without canopy. In November 2005, Solar radiation and PPFD(Photosynthetic Photon Flux Density) of the evergreen coniferous, temperate deciduous hardwood forest and riverside were  $1.2 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ -  $15.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ - $12.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , and  $15.1 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ - $192.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectively. LAI(Leaf Area Index) of the evergreen coniferous forest and the deciduous hardwood forest were 2.53 and 1.91. Litter production of the evergreen coniferous forest was higher than the deciduous hardwood forest( $279.48 \pm 52.72 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  and  $139.96 \pm 16.54 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ). The amount of litter accumulation in the forest floor was also higher than the deciduous forest( $7,852.72 \pm 1,633.42 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  and  $1,245.48 \pm 273.63 \text{ g m}^{-2}$ ). Carbon storage in 0~20cm soil depth of the evergreen coniferous, the temperate deciduous hardwood forest and the riverside were measured  $52.2 \text{ t C ha}^{-1}$ ,  $58.9 \text{ t C ha}^{-1}$  and  $56.5 \text{ t C ha}^{-1}$  respectively. According to our research, the temperate deciduous hardwood forest in Mt. Acha(35%) accumulates about  $23,223 \text{ t C ha}^{-1}$  in soil and  $18,939 \text{ t C ha}^{-1}$  for evergreen coniferous forest in Mt. Acha(32.3%) respectively.  $\text{CO}_2$  concentration *in situ* was the highest evolution in the soils with water contents of 60% and the temperate deciduous hardwood forest was 3.4 times higher than the evergreen coniferous.

**Key words** : Mt. Acha, soil carbon storages, soil environment, soil respiration

## 서론

지구 온난화의 원인이 되는 온실 효과 가스 중 가장 많은 비율을 차지하고 있는 CO<sub>2</sub>는 (IPCC, 1990) 급속한 화석 연료의 사용 증가 등으로 인하여 꾸준히 증가하고 있으며 21세기 후반에는 산업혁명 이전보다 2배 이상까지도 증가할 것으로 예측되고 있다 (Jin *et al.*, 2000). 이와 같은 CO<sub>2</sub> 농도 증가로 야기되는 급속한 지구 온난화는 국지적으로 폭염, 폭우, 폭설 등과 같은 극단적인 기상 현상이 빈번하게 나타나는 원인이 됨은 물론, 광역적으로는 수자원 고갈, 새로운 병원균 만연, 사막화 등과 같이 인간의 생존에 심각한 영향을 주는 환경 변화의 원인이 된다. 인간뿐만 아니라 자연생태계에 있어서도 완전한 온도 변화는 종의 이동과 적응 기작을 통해 구성종은 혼란없이 유지되지만, 급격한 온도 변화는 이동 속도와 적응 속도가 많은 종들이나 생태계를 멸종 위기에 처하게 하거나 소멸시킬 것으로 제기되고 있다(IPCC, 1995).

국제 사회는 인류와 자연생태계를 위협하는 이러한 기후 변화를 방지하고 그로부터 인류의 안전한 생존을 확보하기 위하여 1992년 6월 리우환경회의(유엔환경개발회의 UNCED)에서 지구 온난화에 따른 이상 기후 현상을 예방하기 위한 기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)을 채택하였고, 한국을 포함한 154개국이 서명, 1994년 3월 21일 공식 발효되었다. 이 협약의 목적을 "인간이 유발하는 지구 기후 시스템의 교란을 방지할 수 있는 수준으로 대기 중의 온실 가스를 안정화시키는 것"으로 정하여, 인류에 의해 유발된 기후 변화를 억제하기 위하여 국제적 공동 대처를 주문하였다. 이후 기후협약의 당사국 회의가 거듭되어 마침내 2005년 2월에는 지구 온난화의 방지를 위한 교토의정서가 발효되어 선진국을 중심으로 90년도 배출한 CO<sub>2</sub>양을 기준으로 약 5.2%를 감축하기로 합의하였으며, 지난 2005년 2월 러시아의 비준으로 그 효력이 발생되었다. 우리나라는 2008년부터 2012년까지의 1차 의무 감축 대상국에는 포함되지는 않았지만 2차 감축 기간이 되는 2013년부터는 확실한 의무 감축 대상국이 될 것으로 예측하고 있다. 교토의정서는 이러한 의무 감축과 더불어 청정개발제(Clean Development Mechanism)를 도입하여 자국뿐만 아니라 국가 간의 협조 체제하에 보다 효과적으로 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄이기 위한 제도를 도입하고 있으며, 이러한 제도는 새로운 산림의 조성이나 산림의 효과적인 관리를 통하여 발생하는 대기 CO<sub>2</sub>의 저감분에 대하여는 의무 감축 분에서 공제시켜 의무 감축 부담을 경감시키는데 있다. 이러한 제도를 바탕으로 각국은 적극적인 흡수원 발굴 연구에 박차를 가하게 되었고, 그중 산림은 가장 큰 흡수원의 대상으로 지목되고 있다.

이러한 측면에서 볼 때 전 국토 면적의 약 65%가 산으로 구성된 우리나라의 경우 흡수원 개발에 매우 유리한 입장에 있는 국가이며, 산림의 흡수 능력을 증가시키기 위한 적극적인 연구와 노력을 투자한다면 그 효과는 매우 크리라 생각된다.

탄소 흡수원으로서 가장 주목을 받고 있는 산림 생태계의 탄소 흡수는 1차 생산자인 식물의 광합성으로부터 시작되며 광합성으로 고정된 탄소의 일부는 1차 생산자인 식물의 호흡을 통해 대기 중으로 환원된다. 환원된 분을 제외하고 남은 부분 즉, 식물 자체의 성장에 사용된 부분을 순1차 생산량(Net Primary Production)이라 하며 이는 식물 자체의 생물량 증가, 낙엽, 낙지, 세균, 그리고 동물의 피식분 등으로 구성되고, 이러한 부분의 많은 부분은 토양으로 유입되어 미생물의 에너지원으로 공급된다. 토양에 유입된 탄소는 최종적으로 미생물의 분해에 의해 다시 대기 중으로 환원되고 리그닌과

같이 분해가 어려운 난분해성 유기물은 토양에 오랜 동안 축적되어 토양 탄소의 원천이 된다. 이러한 대기-식물-토양 간을 이동하는 일련의 탄소 순환 속도는 순환과 관련되어 물리화학적 환경 요인에 의해 직접적으로 영향을 받는다. 특히, 온도와 수분, 광과 같은 요인은 생물의 활성을 좌우하는 중요 환경 인자로 생태계를 구성하는 생물 그 자체뿐만 아니라 환경인자까지도 영향을 미치게 된다.

이러한 생태계의 탄소 순환과 축적 중 토양에 축적되어 있는 탄소의 양은 전 지구적으로 1,500 Pg에 달하며, 이는 대기의 2배, 식생의 3배에 가까운 양이 된다 (Waring and Running, 1998). 토양 탄소 역시 온도와 수분 요인과 같은 물리 화학적 요인에 의해 토양 호흡을 통해 대기로 환원되는 속도는 크게 좌우되며, 토양에 축적된 양이 막대한 만큼 그 저장과 방출의 속도와 움직임에 있어서의 약간의 변화에도 대기의 CO<sub>2</sub> 농도는 크게 영향을 받는다. 이러한 이유에서 최근 토양 호흡의 정량적 측정을 통한 산림생태계의 탄소 순환 모델을 예측하고 산림 내 탄소 저장량에 대한 관심이 증가하고 있으며 (Vitousek, 1991; Wang *et al.*, 2002), 우리나라에서도 산림생태계의 탄소 수지에 대한 연구가 여러 방면으로 진행되고 있으나(박, 1997; 박, 1999; 손 등, 2001; 표 등, 2003), 축적된 자료는 극히 빈약한 실정으로 기후 협약에 대응하기 위한 탄소 흡수원으로서의 효과적인 산림 관리에 필요한 우리나라 산림의 활용 유형과 형태에 따른 탄소 저장 및 토양 호흡을 통한 CO<sub>2</sub> 방출량 등의 연구 자료가 절실히 필요하다.

이와 같은 상황에서 본 조사는 산림생태계의 탄소 순환에 중요한 구성인자로서 1차 생산자인 식물의 우점종의 차이에 의해 서로 다른 생태적 특성을 갖는 온대 낙엽활엽수림과 침엽수림에 있어서, 생태계 순생산량(Net Ecosystem Production)에 크게 영향을 미치는 잠재적 토양 호흡량을 파악함과 동시에 토양 호흡과 토양 탄소 축적에 중요한 역할을 하는 리터 생산량 및 임상의 미기상학적 요인을 조사하여 산림에 유입, 축적되는 양과 속도와 그와 관련된 미세 환경 요인의 특성과 관련성을 파악하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

조사지인 아차산 지역은 서울의 중랑구 및 광진구와 경기도 구리에 걸쳐 남북으로 길게 뻗어 있으며, 중랑천을 중심으로 북한산을 마주 보고 동쪽으로는 왕숙천을, 남동쪽으로는 한강과 인접하고 있다. 아차산 지역은 가장 높은 용마봉(348m)을 시작으로 불암산(508m)으로 이어져 북쪽으로 길게 뻗어 있으며, 이 중 아차산은 해발 285m로 기록되어 있다.

각 관측지의 고도는 낙엽활엽수림군락인 망우공원묘지가 190m, 사면방향은 SE 6.6이었고 상록침엽수림군락인 우미내 부근은 고도 40m, 경사도 SE 5.0이었으며, 나지인 구리 한강시민공원은 해발 20m였다(Fig. 1). 세 지역 모두 인근 주민의 출입이 빈번하게 이루어져 교란이 많은 지역이다.

### 2. 임상의 미기후 요인 측정

#### 1) 일사량과 광량자 밀도(PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density)

임관을 투과한 임상의 일사량은 임상의 온도 및 수분 환경에 중요한 요인으로 작용한다. 일사량 측정은 지표로부터 30cm 위치에 일사계(MS-100, Eko)와 광량자계(LI-190SA, Li-cor)를 수평으로 설치하

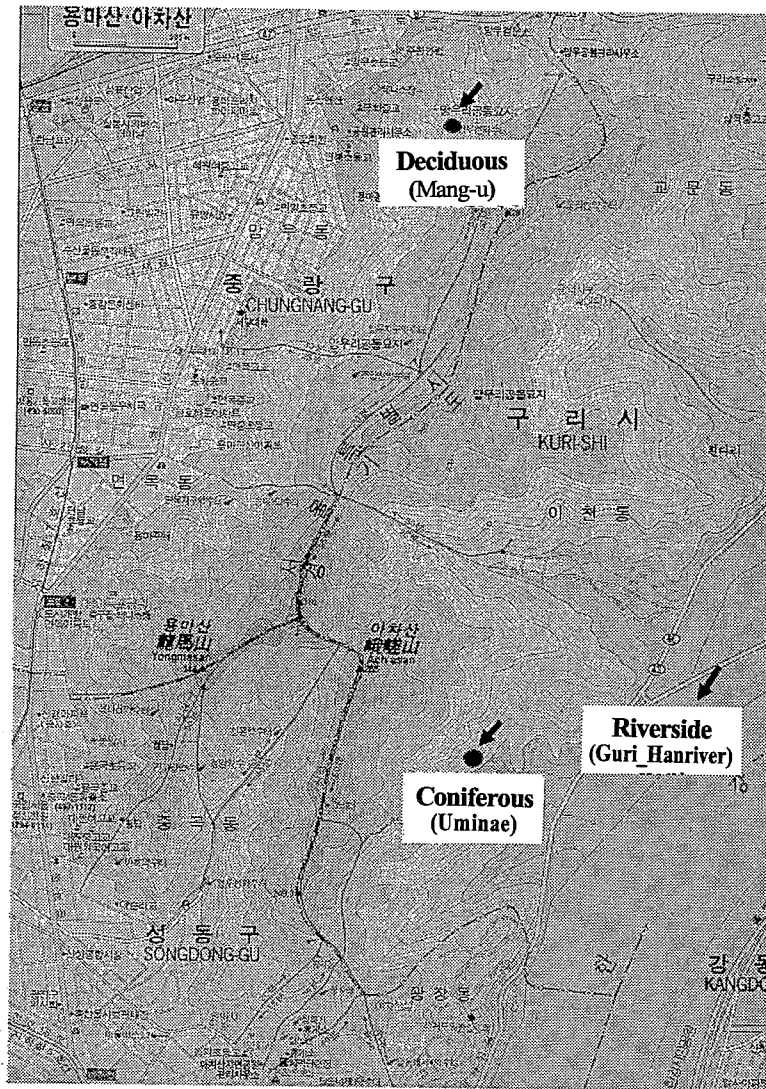


Fig. 1. Location of the study sites.

여 2005년 10월 24일부터 11월 1일까지 데이터로거(Thermodac EF 5020A, ETO denki)에 연결한 후 30초 간격으로 측정된 데이터를 10분 간격으로 평균하여 기록하였으며, 수집된 자료를 바탕으로 적산량을 계산하였다.

## 2) 임상의 기온 및 지온

각 임상의 지온은 0, 5, 10, 20 cm의 깊이에 열전대(T-CC, 0.32 mm, Ninomiya)를 설치하여 측정하였으며, 기온의 경우 지온 측정에 사용한 동일 종류의 열전대로 태양복사 차단 셀 내에 설치하였다. 지온 및 기온 측정용 열전대는 데이터로거(Thermodac EF 5020A, ETO denki)에 연결하여 일사량 및 광량자 밀도의 측정기간과 동일하게 측정하였다.

### 3. 엽면적지수 측정과 리터 생산량 추정

엽면적지수는 2005년 10월 임관분석기(LAI-2000, Li-Cor)를 이용하여 낙엽활엽수림(망우공원묘지)과 상록침엽수림(우미내)에서 각각 3회 측정하여 평균값을 산출하였다. 각각의 군락에서 전년도 공급된 리터량을 추정하기 위하여 2005년 10월, 낙엽활엽수림과 상록침엽수림, 나지(구리한강시민공원)의 각 군락에서 50 cm×50 cm의 방형구를 3군데 선정하였다. 전년도 공급되었으나 동계의 저온과 건조로 인해 분해가 진행되지 않은 미분해 낙엽층과 이전년도 공급되어 상당 부분 분해가 진행된 유기물층을 따로 분리하여 수집한 후 실험실에서 건조기로 80℃에서 48시간 이상 건조한 후 무게를 칭량하여 단위면적당 공급된 전년도 리터량 및 리터로 축적된 총 탄소량으로 계산하였다.

### 4. 토양 환경 요인 조사 및 토양 탄소 축적량 추정

리터를 수거한 방형구와 같은 곳에서 0 cm에서 20 cm 깊이까지 각 5 cm 단위로 토양 샘플관( $\Phi=5$  cm,  $h=5.1$  cm)을 이용하여 깊이별로 샘플관과 그 주변의 토양을 채취하였다. 채취한 샘플관의 무게를 측정한 후 80℃ 건조기에서 48시간 건조시킨 무게를 측정하여 토양 함수량을 구하고, 또한 건조 토양의 중량으로부터 토양용적밀도(soil bulk density)를 구하였다.

유기물 함량은 채취한 토양을 2 mm 체로 쳐 얻은 2 mm 이하의 토양만을 넣은 도가니를 800℃의 전기로에서 4시간 동안 작열시킨 후, 작열 전과 작열 후의 토양 무게 차이를 작열 전 토양 무게로 나눈 값을 백분율로 나타내어 얻었다.

최대 용수량은 토양 샘플관 두 개를 연결하여, 밀면을 4겹의 거즈로 막은 원통에 2 mm 이하의 토양을 가득 채워 증류수를 넣은 접시에 놓은 후 토양면으로부터의 증발을 차단하기 위해 상부를 불투수성 랩으로 덮어 토양이 충분히 물을 흡수할 수 있도록 방치하였다. 토양이 물을 더 이상 흡수하지 않는다고 판단되었을 때 두 샘플관의 가운데 토양을 약 15g 채취하여 건조시켜 건조 전후의 토양 무게 차이를 건조 후 토양 무게로 나누어 100을 곱하여 계산하였다.

각 군락의 토양을 0~20 cm까지 5 cm 깊이별로 채취한 후 깊이 별로 토양밀도, 토양함수량, 토양비율, 유기물함량, 최대용수량을 조사하여 토양의 특성을 조사하였다(표 1). Wang *et al.* (2002)의 방법으로 토양 내 탄소량( $Pc1$ )을 구하고(식 1), 거기에 2 mm 이하 토양비율을 곱하여 암석 등 토양 외의 물질에 의한 과다한 측정 오류를 최소화하여(식 2) 토양 내의 축적된 탄소량( $Pc2$ )을 계산하여 각 군락간의 차이를 비교하였다.

$$\text{토양 내 탄소량}(Pc1) = rHb_a \quad (\text{토양 유기물량}) \quad (\text{식 1})$$

$$(r=\text{토양밀도}, H=\text{분석한 토양두께}, b=\text{유기물비율}, a=\text{토양 내 탄소비율})$$

$$\text{토양 내 탄소축적량}(Pc2) = rHb_a \times \text{단위체적 내 2mm 이하 토양비율} \quad (\text{식 2})$$

### 5. 잠재 토양호흡량 측정

토양 시료는 리터 채취 시 채취한 0 cm에서 15 cm 깊이까지 토양을 건조되지 않도록 4℃로 유지되는 냉장고에 일시 보관한 후 사용하였다. 토양 호흡 측정은 생토 30g을 50ml 비이커에 넣은 후 500ml

용량의 토양 호흡 측정용 병 속에 넣고, 토양 수분량을 60%로 맞추어서 25℃로 유지되는 온도 조절실(Phytotron, Py-1000)에서 3일간(72시간) 안정 배양시킨 후 측정하였다. 토양 호흡의 계산은 토양 호흡 측정용 병을 밀폐한 후 약 1분 후, 주사기로 통해 내부 공기 60ml를 채취하여 초기(0시간), 2시간 및 4시간 후 각각 Gas chromatography(ACME6000GC, Yonglin instrument)를 이용하여 CO<sub>2</sub> 농도를 측정 한 후, CO<sub>2</sub> 농도를 단위 시간 경과에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 증가 속도를 계산하여 토양 호흡량을 산정하였다. 이러한 방법으로 20%, 40%, 60%, 80%의 수분 구배 조건에서도 토양 호흡량을 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 임상의 미기상 요인

두 관측지의 엽면적지수는 2005년 11월 측정 시 낙엽활엽수림군락과 침엽수림군락이 각각 1.91과 2.53으로 리기다소나무가 우점하고 있는 침엽수림군락에서의 엽면적 지수가 더 크게 나타났다(Fig. 2). 군락의 엽면적지수는 일반적으로 낙엽활엽수림군락에서 보다 상록침엽수림군락에서 높은 것을 보고되어 있으며, 이러한 우점종 차이에 따른 군락의 엽면적지수의 차이는 임상의 광환경과 온도 및 습도 환경의 차이를 유발하는 중요한 요인으로 작용한다.

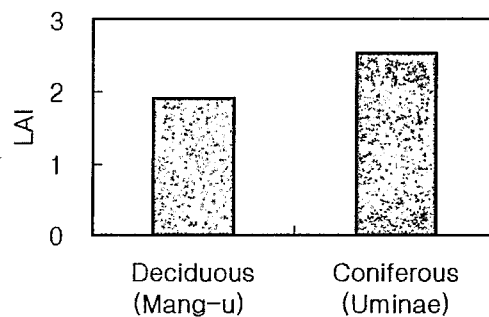


Fig. 2. Comparison of LAI between coniferous and deciduous forests.

세 관측 지점에서 10월 27일부터 30일까지 4일간 측정한 일평균 적산 일사량은 나지 상태의 구리 한강시민공원의 경우  $15.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 낙엽활엽수림군락인 망우리가  $1.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , 상록 침엽수림군락의 우미내가  $1.0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 으로 삼림군락과 나지에서는 나지가 약 14배 높은 수치로 나타났다. 한편 침엽수림군락의 경우 낙엽활엽수림군락보다 약 20% 낮은 값을 보였는데, 이는 낙엽 활엽수림보다 높은 엽면적지수에서 비롯된 결과라 판단된다(Fig. 3). 동일한 측정기간 수집한 평균 광량자밀도에서도 나지의 구리한강시민공원의 경우,  $192.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 낙엽활엽수림군락의 망우공원 묘지가  $15.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 침엽수림군락의 우미내가  $12.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 으로 23.4% 낙엽활엽수림군락에서 높게 측정되어 일사량과 유사한 결과를 보였다. 한편 10월 27일 0시부터 28일 23시까지 각 측정 지점에 대한 일사량의 일변화는 나지에서 최고  $915.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  최저  $4.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 으로 9시부터 증가하기 시작하여 12~13시에 정점을 이룬 후 17시까지 감소하였다(Fig. 4).

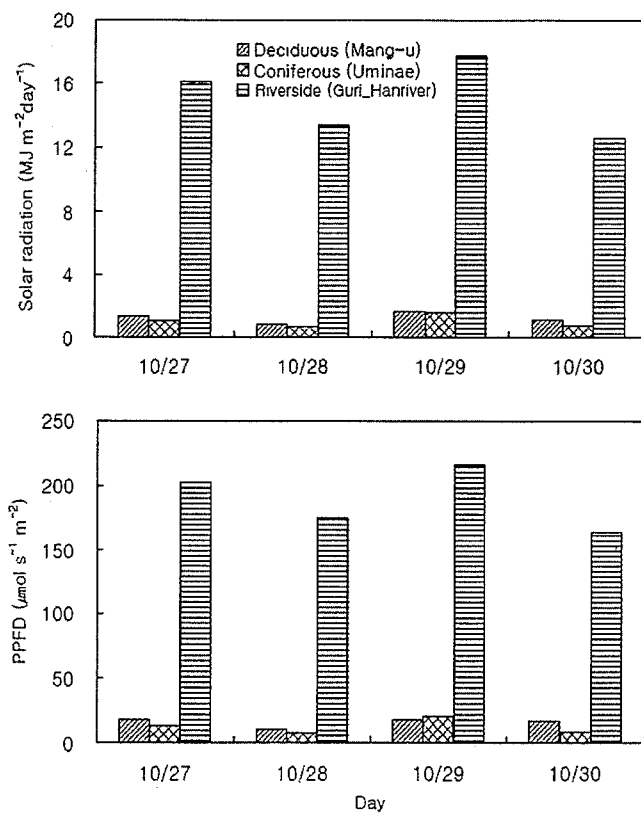


Fig. 3. Variations of solar radiation and PPFD.

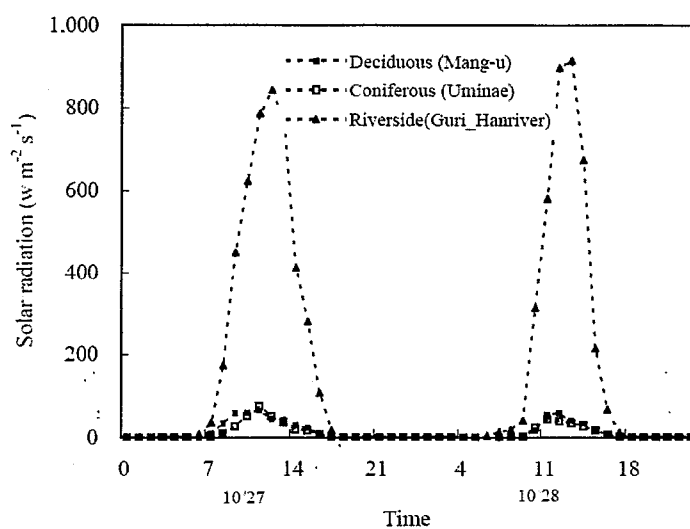


Fig. 4. Diurnal variations of solar radiation (2005. 10. 27~28).

## 2. 군락의 지온 및 기온의 일 변화

2005년 10월 26일(18시)부터 28일(17시)까지 측정한 임상의 지온 및 기온은 3 측정지역 모두 9시경부터 약 14시경까지 증가를 계속하지만 이후 감소하기 시작하며 다음 날 6시경에 최저 기온을 나타냈다(Fig. 5). 또한 각 측정지점의 최고 최저 기온의 폭은 나지에서 14.4 °C로 낙엽활엽수림군락(망우공원묘지)의 8.1 °C, 상록침엽수림군락(우미내)이 9.7 °C로 나지(구리한강시민공원)가 낙엽활엽수림군락보다는 약 4.3 °C, 활엽수림군락보다는 4.7 °C 높게 측정되었다.

한편, 지온의 경우도 지표면에 근접할수록 기온과 유사한 일 변화 경향을 보였지만, 토심이 깊어질수록 이러한 일 변화폭은 현저히 줄어들어 지상부의 온도 환경 변화보다 훨씬 안정된 온도 환경을 보였다. 지표면의 최고온도는 나지에서 17.8.°C, 낙엽수군락에서 14.1°C, 침엽수림군락에서 14.8°C로 기온에서와 마찬가지로 나지에서 가장 높은 값을 보였다(Fig. 5).

나지와 임상에서 기온과 지온이 최고 및 최저를 기점으로 하는 일변화 양상은 지표면에 도달하는 일사량의 일 변화 경향과 유사한 양상을 나타내어 기온 및 지온의 변화가 일사량의 변화를 추종하는 형태를 보였다(Fig. 4). 일반적으로 임관이 형성되어 있는 산림의 경우 지표면(0 cm)의 온도 변화는 나지보다 훨씬 변화폭이 적은 것으로 보고되어 있고 이러한 낮은 변화폭은 토심 전반에서 유사하게 나타난다. 본 조사 결과에서도 나지에 비해 군락이 형성되어 있는 임상에서 변화폭이 낮은 경향을 보였으며, 이러한 결과는 선행 연구에서 고찰된 것과 일치되는 것으로 생각된다.

임상의 온도 환경은 임상에 도달하는 일사량의 다소에 크게 의존하게 되며, 이는 임상을 덮고 있는 우점종의 특성이 임상의 미세 환경을 조절하는 근본적인 요인임을 시사하는 것이다. 결국 어떤 지역의 지표면 환경 특성을 파악하기 위하여는 측정 지역의 임관 형성 유무, 그리고 형성된 임관의 경우, 임관을 구성하는 우점종이 무엇인가를 명확히 하여야 하고, 그 우점종 차이에서 기인하는 엽면적 지수의 차이에서 임상 환경의 차이를 해석하여야 할 것이다.

## 3. 리터 생산

50 cm×50 cm의 방형구에서 얻은 리터로 추정된 2005년 아차산의 리터 생산량은 낙엽활엽수림군락(망우공원묘지)에서  $139.96 \pm 16.54 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  이었고, 상록침엽수림군락(우미내)에서  $279.48 \pm 52.72 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  이었다(Table 1). 조사지 중 망우공원묘지는 낙엽활엽수인 상수리나무(*Quercus acutissima*) 등 참나무류가 우점하고 있는 지역이며, 우미내는 리기다소나무(*Pinus rigida*)가 우점하며 일부 참나무류가 출현하는 지역이다. 구리한강시민공원의 경우 나지 상태로 생육지가 심하게 교란되어 노출된 토양면이 많은 지역으로 망초 및 환삼덩굴과 같은 잡초류가 우점하였으며 리터층 또한 매우 빈약하였으므로 리터와 토양 유기물 분석은 실시하지 않았다. 리터 축적량 분석에서 상록침엽수림군락이 낙엽활엽수림군락에 비해 2배 정도 더 많은 리터가 축적되어 있는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 수중에 따른 C/N비의 차이에서 기인되는 것으로 추측된다. 일반적으로 침엽수의 C/N비는 50~120으로 활엽수의 40~70 정도보다 높은 수치를 나타내는 것으로 보고되고 있으며(진 등, 2002), 이러한 침엽수 리터의 높은 C/N비는 미생물에 의한 리터 분해를 저해하는 요인으로 작용하며, 결과적으로 침엽수림에서 생산되는 리터의 분해의 지연으로 인해 토양 표면에 축적되는 메카니즘으로 설명할 수 있다. 리터 생산량은 1998~1999년 및 1999~2000년의 2년간 광릉 천연활엽수림에서 수집한 리터의 평균량(김 등,



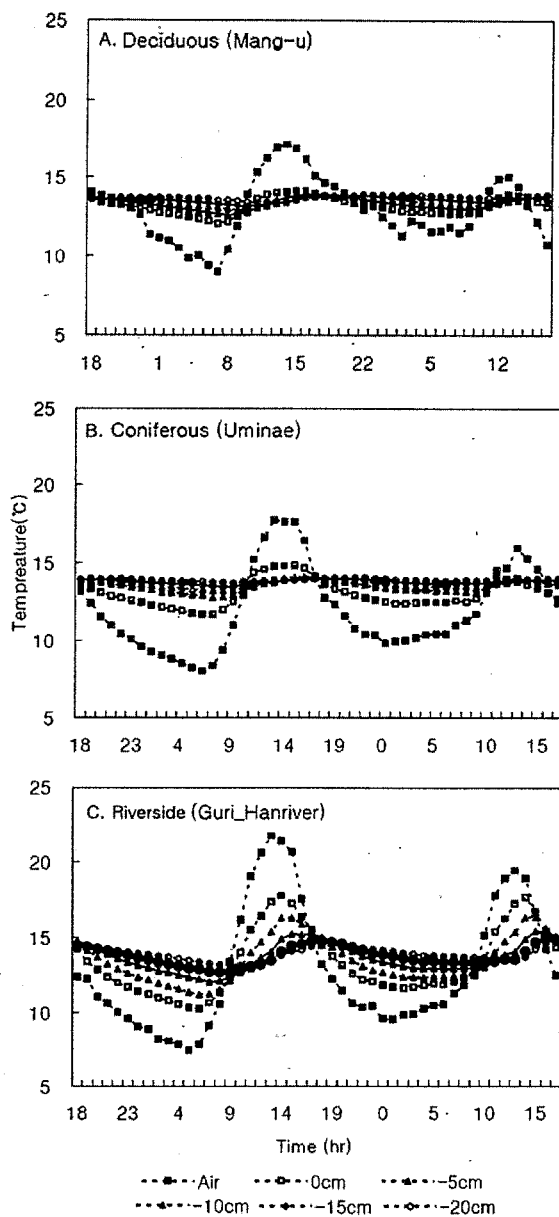


Fig. 5. Diurnal variations of soil and air temperatures (2005. 10. 27~28).

Table 1. Litter amount accumulated on soil surface in each community

Community	Litter layer (g m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	Fermentation layer (g m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )
Deciduous (Mang-u)	139.96±16.54	1245.48±273.63
Coniferous (Uminae)	279.48±52.72	7852.72±1633.42

2003)이나 1993년 공주의 상수리나무림과 리기다 소나무림의 리터 생산량보다 적었으며, 2004년 충북 괴산에서 같은 방법으로 수집한 리터의 양이 낙엽활엽수림에서  $503.8 \pm 71.7 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이고 상록침엽수림에서  $742.2 \pm 180.7 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (서 등, 2005) 것과 비교할 때 적은 수준이라고 하겠다. 이는 아차산의 조사지역들이 주민들의 출입이 자유로워 교란이 심한 이유로 리터가 잘 보존되지 않았던 것으로 사료된다. 본 조사지역의 경우 두 군락간의 리터 생산량은 우미내가 망우공원묘지의 생산량보다 1.47배 더 높은 것으로 조사되었다. 낙엽분해층 역시 망우공원묘지가  $1245.48 \pm 273.63 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 우미내가  $7,852.72 \pm 1,633.42 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 으로 상록침엽수림군락의 낙엽분해층이 월등히 높아 약 6.3배 많이 나타났다. 이는 서 등(2005)의 결과와 비교할 때 낙엽활엽수림의 낙엽분해층은 거의 비슷하다고 할 수 있으나 침엽수림과 우미내의 경우 우미내가 2배 이상 많은 양의 낙엽분해층이 형성되어 있었다. 이는 아차산의 리기다소나무림과 괴산지역의 상록침엽수림의 연령, 밀도의 차이에 의한다고 할 수 있겠다.

#### 4. 토양의 물리적 환경요인

토양환경요인으로서 토양함수량, 토양밀도, 최대용수량, 유기물함량을 0~20 cm까지 각 5 cm 깊이 별로 조사하였다(Table 2). 토양 밀도는 0~5 cm에서, 상록침엽수림군락(우미내)  $1.30 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$ , 나(구리한강시민공원)  $1.17 \pm 0.08 \text{ g cm}^{-3}$ , 낙엽활엽수림군락(망우공원묘지)  $1.00 \pm 0.07 \text{ g cm}^{-3}$ 의 순으로 침엽수림군락에서 높게 나타났다. 토양함수량은 세 조사지가 각각 다른 경향을 보였는데 낙엽활엽수림군락의 경우 지표면인 0~5cm 깊이에서  $20.08 \pm 0.01\%$ 에서 깊이 20cm  $13.09 \pm 0.01\%$ 로 깊이가 증가할수록 토양함수량이 낮게 나타났으며, 상록침엽수림군락의 경우는 그와는 반대로 깊이가 깊어질수록 높게 나타났다. 또한 나지인 구리한강시민공원의 경우 지표  $19.26 \pm 0.07\%$ 에서 5~10 cm에서  $12.81 \pm 0.03\%$ 로 급격한 감소를 보였다가 차츰 증가하는 추세를 나타냈다.

깊이에 따른 유기물 함량은 낙엽활엽수림군락, 상록침엽수림군락, 나지의 순서로 많이 측정되었으며 낙엽활엽수림군락은  $13.14 \pm 0.02\%$ 에서  $6.08 \pm 0.00\%$ 로 토심에 따라 감소하였으나, 침엽수림군락은 지표와 토심 20 cm에서 각각  $6.60 \pm 0.00\%$ 와  $5.58 \pm 0.00\%$ 를, 나지는  $6.77 \pm 0.00\%$ 와  $4.79 \pm 0.01\%$ 로 낙엽활엽수림군락과 토심에 따른 경향성은 같이 하였으나 그 변화폭은 적었다. 지표와 0~20 cm의 토양비율은 낙엽활엽수인 망우공원묘지와 침엽수림군락인 우미내는 깊이에 따라 증가하는 경향을 보이다가 15 cm 이후 다시 감소하였으며, 나지인 구리한강시민공원은 지표층 비율이 높을 뿐 깊이에 따른 변화가 거의 없었다. 최대용수량은 0~5 cm에서는 낙엽활엽수림군락이 다른 조사지점에 비해 20% 가량 월등히 높았으며, 나지와 함께 깊이에 따라 감소하는 추세를 보인 것과 달리 상록침엽수림군락의 경우 지표 부근과 토심 20 cm에서 각각  $40.44 \pm 0.80\%$ 와  $40.20 \pm 2.55\%$ 로 깊이에 따른 변화가 거의 나타나지 않았다.

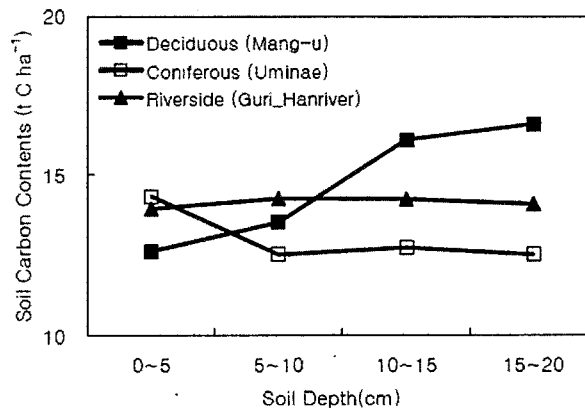
아차산 조사지의 유기물 함량은 낙엽활엽수림군락에서 6.08~13.14%, 상록침엽수림군락에서 5.58~6.60%로 이전의 조사보고서(광진구청, 2000)의 2.9%에 비해 월등히 높게 나타났다. 이것은 5년 정도의 측정시기의 차이와 2000년의 보고서가 광진구에 속해 있는 아차산의 전체 지역을 조사하였고, 본 조사에서는 두 개 지점만을 선정하여 조사한 것에서 그 차이가 발생한 것으로 보인다.

토양 유기물 함량으로부터 Wang *et al.* (2002)의 방법을 이용하여 토양의 탄소 축적량을 계산하면 Fig. 6과 같다. 낙엽활엽수림인 망우공원묘지의 탄소 축적량이 가장 높게 나타났으며, 토양의 깊이에

**Table 2.** Comparison of soil properties between coniferous and deciduous forests

Depth(cm)	Density(g cm <sup>-3</sup> )	W.C.(%)	S.R.(%)	O.M.C(%)	M.S.W.C (%)	
Deciduous (Mang-u)	0~ 5	1.00±0.07	20.08±0.01	75.40±1.84	13.14±0.02	60.80±2.31
	5~10	1.17±0.03	14.85±0.01	75.73±3.06	8.29±0.00	43.06±0.89
	10~15	1.25±0.08	13.00±0.02	82.32±0.90	6.22±0.00	36.91±2.30
	15~20	1.36±0.11	13.09±0.01	79.73±1.45	6.08±0.00	34.83±2.36
Coniferous (Uminae)	0~ 5	1.30±0.05	11.98±0.02	56.85±10.21	6.60±0.00	40.44±0.80
	5~10	1.38±0.09	12.15±0.02	57.91± 6.68	6.17±0.00	39.55±1.25
	10~15	1.40±0.09	14.21±0.02	62.86± 3.75	5.52±0.00	41.99±1.93
	15~20	1.40±0.10	14.99±0.02	62.25± 3.83	5.58±0.00	40.20±2.55
Riverside (Guri_Hanriver)	0~ 5	1.17±0.08	19.26±0.07	71.29±1.95	6.77±0.00	41.48±3.84
	5~10	1.45±0.10	12.81±0.03	64.22±4.97	5.14±0.00	41.15±6.04
	10~15	1.42±0.05	15.13±0.01	63.79±5.83	4.57±0.01	36.21±4.45
	15~20	1.41±0.03	15.36±0.02	65.05±5.98	4.79±0.01	34.34±2.35

\* W.C.:Water contents, S.R.: Soil relative rate, O.M.C.: Organic matter content, M.S.W.C.: Maximum soil water capacity.



**Fig. 6.** Variations of soil carbon contents in each site.

따라 증가하는 양상을 보였다. 다음은 나지로 깊이에 따른 탄소 축적량의 차이는 거의 나타나지 않았으며, 상록침엽수림군락의 경우 지표 부근인 0~5 cm는 나지나 낙엽활엽수림군락보다 높게 나타났으나, 깊이에 따라 탄소축적량이 감소하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 토양 내 탄소 함량은 표토층에서 가장 높으며 깊이가 증가함에 따라 감소하는 것으로 알려져 있다. 탄소 함량이 표토층에서 가장 높게 나타나는 것은 지상부로부터의 리터 공급량이 많고 이 깊이에 세근(fine root)이 집중적으로 분포되어 그로 인해 발생하는 유기물의 공급이 많은 것에 기인하는 것으로 알려져 있다(Armson, 1977).

조사지별 탄소축적량은 상록침엽수림군락과 나지의 0~5 cm에서 각각  $14.3 \text{ t C ha}^{-1}$ ,  $13.9 \text{ t C ha}^{-1}$  을 나타냈으며, 15~20 cm에서 상록침엽수림군락은  $12.5 \text{ t C ha}^{-1}$ , 나지는  $14.1 \text{ t C ha}^{-1}$  를 나타내어 상록침엽수림군락은 깊이에 따른 감소를 나타냈고 전반적으로 깊이별로 약간의 감소를 보이지만 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 낙엽활엽수림군락의 경우 0~5 cm에서  $12.6 \text{ t C ha}^{-1}$ , 15~20 cm에서  $16.6 \text{ t C ha}^{-1}$ 로 깊이에 따라 오히려 증가하는 경향을 보였다. 이러한 낙엽활엽수림과 상록침엽수림 군락의 토양 탄소의 축적 패턴의 차이는 각각의 군락이 생산해 내는 리터의 C/N 비의 차이에 기인하는 것으로 추측된다. 일반적으로 C/N 비는 침엽수성 리터가 낙엽활엽수성 리터보다 높으며, 그에 의해 미생물에 의한 분해속도도 느린 것으로 보고되어 있다(진 등, 2002). 이러한 결과들과 관련지어 볼 때 낙엽활엽수림(망우산공원묘지)에서 토심이 증가할수록 탄소 축적량이 증가하는 원인은 낙엽활엽수의 리터가 낮은 C/N 비로 분해가 활발하게 일어나고, 분해된 미세 유기물 입자 등은 강수에 의해 토심이 깊은 쪽으로 빠르게 용탈되어 일정 토심에서 축적되는 과정이 지속적으로 반복된 결과일 것으로 생각된다. 반대로 상록침엽수림(우미내)의 경우 C/N 비가 높기 때문에 유기물의 분해가 잘 이루어지지 않으므로 지표 부근에 상대적으로 많은 양의 탄소가 축적되어 있게 되고, 한강시민공원의 경우 리터의 공급원이 없고 또한 인간에 의한 토양의 상하 교란의 결과로 깊이에 따른 차이가 거의 나타나지 않은 형태를 보인 것을 생각한다. 0~20 cm까지의 탄소 축적량을 합하면 낙엽활엽수림군락이  $58.9 \text{ t C ha}^{-1}$ , 상록침엽수림군락이  $52.2 \text{ t C ha}^{-1}$  나지가  $56.5 \text{ t C ha}^{-1}$ 으로 낙엽활엽수림인 망우공원 묘지에서 가장 높게 나타났다.

김 등(2001)이 경기도 광릉 임업시험장 내 리기다소나무 임분을 대상으로 추정한 토양 내 탄소축적량이 0~15 cm에서  $24.4 \text{ t C ha}^{-1}$  이고, 15~30cm에서  $19.0 \text{ t C ha}^{-1}$  인 것과 비교해 리기다소나무가 우점하는 우미내의 경우 0~20 cm의 평균 탄소축적량이  $13.0 \text{ t C ha}^{-1}$  으로 낮게 나타났다. 토양 내 유기물 함량과 탄소 축적량은 지역에 따라 차이가 있으며(Wang *et al.*, 2002), 김 등(2001)의 토양 내 탄소 추정방법(Alban and Peralá, 1992)이 본 조사의 토양 내 탄소 추정방법과 다르고 특히 본 조사에서는 일반적인 토양 탄소 측정의 과다 측정을 최소화하기 위해 토양비율을 계상하였기 때문에 탄소 축적량이 기존의 연구 결과보다 적게 나온 것으로 사료된다.

본 조사의 결과에 의해, 동일보고서 내의 식생연구보고서의 면적낙엽활엽수림인 망우공원묘지를 참나무군락의 대표 값으로, 침엽수림인 우미내를 리기다소나무군락과 소나무(*Pinus densiflora*)의 대표 값으로 하여 아차산의 토양 내 0~20 cm까지의 탄소 축적량을 계상하면 Table 3과 같다.

## 5. 토양 호흡량 측정

Table 3. Soil carbon contents of deciduous (Mang-u) and coniferous (Uminae) forests in Mt. Acha

Community	Area (ha)	Soil carbon contents (t C)
Deciduous (Mang-u)	394.6 (35.0%)	23,223
Coniferous (Uminae)	363.1 (32.2%)	18,939

조사지 중 산림인 낙엽활엽수림군락(망우공원묘지)과 상록침엽수림군락(우미내)의 토양을 실내에서 습도의 변화를 주어 Wang *et al.* (2003)의 방법을 이용하여 조사한 호흡량 결과는 Fig. 7과 같다.

일반적으로 토양 호흡은 토양 함수량이 60%일 때 가장 높은 호흡량을 보인다(Wang *et al.*, 2003). 본 조사에서도 조사지 두 곳 모두 60%에서 이산화탄소의 방출이 가장 높게 나타났다. 60% 다음으로 80%가 40%보다 모두 높게 나타났는데 이는 실내 실험을 수행하는 과정에서 기체의 추출 시기에 약간씩 습도가 낮아지는 것에 영향을 받은 것으로 보인다. Fig. 7과 같이 토양 수분량이 60%일 때 지표 근처인 0~5 cm에서 낙엽활엽수림군락의 토양 호흡량이  $4.3 \text{ mg CO}_2 \text{ d.w. soil g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 로 상록침엽수림군락의  $1.3 \text{ mg CO}_2 \text{ d.w. soil g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 에 비해 약 3.5배 더 많은  $3.0 \text{ mg CO}_2 \text{ d.w. soil g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 의 이산화탄소가 더 발생하였다. 이러한 결과는 낙엽활엽수림군락의 C/N 비가 상록침엽수림군락에 비해 높고 지표 부근에 상대적으로 많은 양의 유기물이 축적되어 있는 것이 그 원인으로 생각되며, Fig. 5의 호흡 경향과도 일치하는 결과이다. 온대낙엽수림의 토양 호흡이  $4.8\sim 8.3 \text{ t C ha}^{-1}$  (Kosugi *et al.*, 2005), 온대 침엽수림이  $1.1\sim 7.4 \text{ t C ha}^{-1}$  (Maier *et al.*, 2004; Lee, 2003)로 침엽수림에서 토양호흡량이 적게 나타나는 것과 유사한 결과이다.

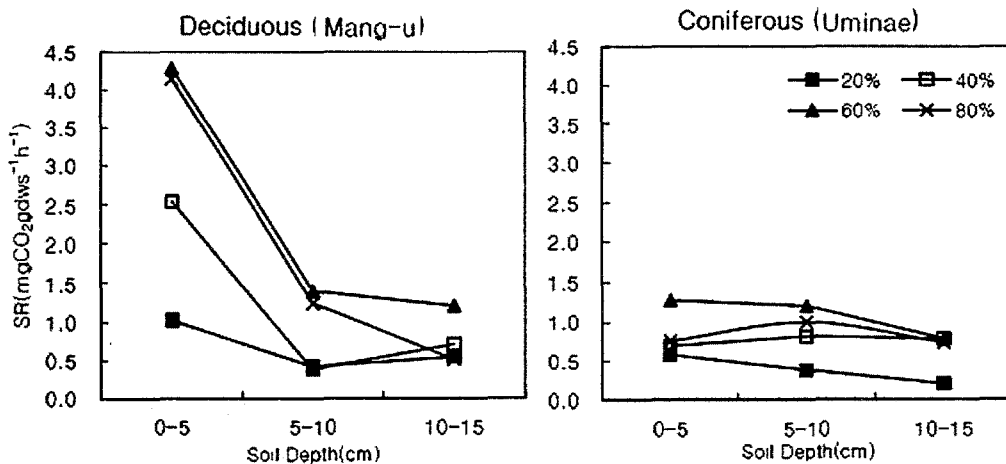


Fig. 7. Potential soil respiration rates of deciduous (Mang-u) and coniferous (Uminae) forests.

## 인용문헌

- 김춘식, 정진현. 2001. 경기도 광릉 리기다소나무임분의 지상부 탄소저장량 변화. 한국임학회지 90(6): 774-780.
- 김춘식, 임종환, 신준환. 2003. 광릉 천연활엽수림의 낙엽낙지와 낙엽분해에 따른 양분 동태. 한국농림기상학회지 5(2): 87-93.
- 박관수. 1997. 버드나무(*Salix spp.*) 조림지내 시비와 클론이 지상부 및 토양중 탄소축적에 미치는 영향. 한국임학회지 86(2): 177-185.
- 박관수. 1999. 충주지역의 신갈나무와 굴참나무 천연림 생태계의 지상부 및 토양 중 탄소고정에 관한

- 연구. 한국임학회지 88(1): 93-100.
- 손요환, 이숙희. 2001. 토지 이용 형태의 변화와 토양 내 탄소와 질소의 관계. 한국임학회지 90(3): 242-248.
- 서상욱, 민윤경, 이재석. 2005. 온대 낙엽활엽수림과 상록침엽수림내의 미기후 및 토양 환경 특성. 한국자연보존연구지 3(3): 247-259.
- 서울특별시 광진구청. 2000. 아차산 산림생태 조사분석 및 관리방안 연구보고서.
- 임종환, 신준환, 김광택, 천정화, 오정수. 2003. 광릉 활엽수천연림의 산림식생구조, 입지환경 및 탄소 저장량. 한국농림기상학회지 5(2): 101-109.
- 진현오, 이명중, 신영오, 김정제, 김상근. 2002. 삼림토양학. 향문사.
- 표재훈, 김세욱, 문형태. 2003. 잣나무 조림지의 탄소수지에 관한 연구. 한국생태학회지 26(3): 129-134.
- Alban, D. H. and D. A. Perala. 1992. Carbon storage in Lake States aspen ecosystems. Can. J. For. Res. 22: 1107-1110.
- Armson. K. A. 1997. Forest soils: Properties and processes. University of Toronto Press, Canada.
- IPCC, 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge. Cambridge University Press.
- IPCC. 1995. WMO/UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report. Climate Change 1995. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jin, F., H. Yang, and Zhao, Q. 2000. Progress in the research of organic carbon storage. Soil 32(1): 11-17.
- Kosugi, Y., H. Tanaka, S. Takanashi, N. Matsuo, N. Ohte, S. Shibata, and M. Tani. 2005. Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest. Agricultural and Forest Meteorology 132(3/4): 329-343.
- Lee, M. S. 2003. Review : Method for assessing forest carbon sinks by ecological process-based approach - A case study for Takayama Station, Japan, Korean J. Ecol. 26(5): 289-296.
- Maier, C. A., T. J. Albaugh, H. L. Allen and P. M. Dougherty. 2004. Respiratory carbon use and carbon storage in mid-rotation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations: the effect of site resources on the stand carbon balance. Global Change Biology 10(8): 1335-1350.
- Raich, J. W. and W. H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus 44B: 81-99.
- Wang G., J. Qian, G. Cheng and Y. Lai. 2002. Soil organic carbon pool of grassland on the Qinghai-Tibetan plateau and its global implication. Sci. Total Environ. 291: 207-217.
- Wang, Z. P. and P. Ineson. 2003. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. Soil Biology & Biochemistry 35(3): 427-433.

## 요 약

도심에 위치하는 아차산에서 낙엽활엽수인 상수리나무 등 참나무가 우점하고 있는 망우공원묘지

와 침엽수인 리기다소나무가 우점하고 있는 우미내, 임관이 전혀 형성되지 않은 채 일부 초본류만으로 이루어진 나지(구리한강시민공원)을 함께 비교하였다. 일사량의 일 적산 평균은 낙엽활엽수림군락과 우미내, 구리한강시민공원에서 일사량이 각각  $1.2 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ,  $15.1 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$  이고 광량자밀도(PPFD)는 일평균  $15.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $12.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $192.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 으로 산림과 나지가 큰 차이를 나타냈으며 산림 내 두 조사지의 차이는 LAI가 낙엽활엽수림군락에서 1.91, 우미내가 2.53으로 엽면적지수가 더 큰 것에 의한다. 세 조사지의 토양 기온의 일변화는 구리한강시민공원의 경우 기온의 변화가 가장 컸으며, 지표부터 토심이 깊어질수록 일 변화가 점차 줄어드는 전형적인 패턴을 나타냈으나, 낙엽활엽수림군락과 상록침엽수림군락의 경우 기온은 일 변화가 확실히 나타난 반면, 지표부터 20 cm까지의 차이가 그리 크지 않게 나타났다. 낙엽활엽수림군락과 상록침엽수림군락에서 추정된 리터의 양은 각각  $139.96 \pm 16.54 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ,  $279.48 \pm 52.72 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  이었고 낙엽분해율은 낙엽활엽수림군락에서  $1245.48 \pm 273.63 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 상록침엽수림군락이  $7,852.72 \pm 1,633.42 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  였다. 토양 특성으로 추정된 토양 탄소 축적량은 깊이에 따라 차이가 있으나 0~20 cm의 총량은 낙엽활엽수림군락이  $58.9 \text{ t C ha}^{-1}$ , 상록침엽수림군락은  $52.2 \text{ t C ha}^{-1}$ , 나지가  $56.5 \text{ t C ha}^{-1}$  이고 측정된 결과에 의해 아차산 전체 지역 토양의 탄소축적량을 계상하면 35.0%를 차지하고 있는 낙엽활엽수림에서 약  $23,223 \text{ t C ha}^{-1}$ 을, 32.2%를 차지하고 있는 침엽수림에서 약  $18,939 \text{ t C ha}^{-1}$ 의 탄소를 축적하고 있는 것으로 추정된다. 또한 토양을 채취하여 실내에서 이산화탄소 발생량을 조사한 결과 토양 함수량이 60%일 때 가장 높은 발생량을 보였으며 토양 함수량이 60%일 때 유기물의 분해가 활발한 낙엽활엽수림(망우공원묘지)의 지표 부근의 토양에서 상록침엽수림(우미내)보다 3.5배 더 많은 이산화탄소가 발생하였다.

검색어 : 아차산, 토양탄소축적, 토양호흡, 토양환경