

지구온난화와 환경요소인 광, 토양수분, 영양소가 상수리나무와 굴참나무의 생태 지위에 미치는 영향

조규태 · 장래하 · 이승혁 · 한영섭 · 유영한*

(공주대학교 생물학과)

Effects of Global Warming and Environmental Factors of Light, Soil Moisture, and Nutrient Level on Ecological Niche of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis*. Cho, Kyu-Tae, Rae-Ha Jang, Seung-Hyuk Lee, Young-Sub Han and Young-Han You* (Department of Biology, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea)

This study was conducted to determine the changes of the ecological niche breadth and niche overlap of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis* under elevated CO₂ concentrations and under elevated temperature conditions. We investigated the growth responses by environmental factor, CO₂ concentration, air temperature, light, soil moisture and nutrients. Rising CO₂ concentration was treated with 1.6 times than control (ambient) and increased temperature with 2.2°C above the control (ambient) in the glass greenhouse. Ecological niche breadth and niche overlap was calculated the two oak species (*Q. acutissima* and *Q. variabilis*), which were cultivated with light, soil moisture and nutrient gradients at four levels. As a result, the ecological niche breadth of *Quercus acutissima* was determined to be increased under the warming treatment, but decreased under soil moisture and nutrient environments. The ecological niche breadth of *Quercus variabilis* was increased under light, soil moisture and nutrients of the warming treatment than control. Ecological niche overlap between *Quercus acutissima*-*Quercus variabilis* was increased under light of the warming treatment than control, but decreased under soil moisture and nutrient environments. These results means that two oak species are more severe competition in light environments than soil moisture and nutrient environments. According to analyses of the Cluster and PCA, the two oak species were more sensitive react under light environment than to elevated CO₂ concentration or elevated temperature.

Key words : ecological niche breadth, ecological niche overlap, global warming treatment, environmental factor

서 론

인위적으로 발생하는 CO₂ 농도의 증가는 지구온난화

의 가장 큰 원인이다(Kobayashi, 2006). 최근에 지구는 CO₂ 농도가 급격히 증가하고 기온을 빠르게 상승시키고 있으며 (Korea Meterological Adminstration, 2008), 근년에 들어 상승이 가속화되고 있다 (IPCC, 2007). 현재와

* Corresponding author: Tel: +82-41-850-8508. Fax: +82-41-850-0957. E-mail: youeco21@kongju.ac.kr

같은 증가추세라면 2100년에는 대기중 CO₂ 농도가 800 ppm에 육박할 것이며 (Houghton *et al.*, 1990), CO₂ 농도가 2배가 되면 지구의 평균 표면온도가 2~3°C 증가한다고 예측하고 있다 (Enoch and Hurd, 1977). 국제에너지기구 (International Energy Agency)에 의하면 우리나라의 CO₂ 배출량은 세계 9위이며, 지속적인 경제성장과 에너지 다소비 산업구조로 인해 꾸준히 증가하고 있는 추세이다 (Ministry of Environment, 2012). 2006년에 CO₂ 농도는 388.9 ppm으로 보고되었고 (You, 2010), 서울 등 6개 도시의 평균기온은 1.7°C 상승률로 전 지구적인 온난화 추세보다 빠르게 나타났다 (Korea Meteorological Administration, 2008).

공기 중의 CO₂ 농도는 식물의 기본적인 생리활동인 광합성에 이용되는 원료이다. 공기 중의 CO₂ 농도가 높을수록 잎 속으로 CO₂ 확산속도가 커지고 이용이 높아져 광합성 속도가 증대된다 (Park, 2003). CO₂ 농도의 증가가 식물의 성장을 증진시킨다 (Park, 1993; Park, 2003). 그러나 CO₂ 농도가 증가함에 따라 성장량이 증가하는 경우 (Idso and Idso, 1994; Saxe *et al.*, 1998)도 있지만 변화가 없거나 (Garbutt and Bazzaz, 1984), 오히려 감소하는 반응을 보인다 (Idso and Kimball, 1997). 또한, 초본보다 목본에서 CO₂ 농도에 대한 생물량의 반응이 크다 (Marie-Anne *et al.*, 2006).

식물 생육에서 중요하게 생각되는 광, 수분 그리고 영양소 중에서 광은 기공의 개폐에 영향을 주어 광도가 높을수록 기공이 많이 열리게 하여 식물의 증산작용을 왕성하게 하고, 뿌리의 발달을 촉진시켜 식물의 생육에 큰 영향을 끼친다 (Beon, 2000). 임상의 광환경에서는 내음성이 낮은 수종은 엽록소함량이 감소하고 빛 흡수율과 광합성의 저하로 생장이 불량하게 된다 (Kim and Lee, 2001). 최적 분배모델 (Optimal partitioning model)에 의하면 식물은 환경요인의 변화에 반응하여 최적의 성장반응을 나타내기 위해 식물의 기관 또는 구조에 물질을 분배한다 (Beranacchi *et al.*, 2000). 일반적으로 CO₂ 농도와 온도가 증가하면 식물은 지상부보다 지하부의 물질분배에 더 투자한다 (Rogers and Runion, 1994; Crookshanks *et al.*, 1998). 또한, 비엽면적 (specific leaf area)과 광합성량을 증가시키며 (Onoda *et al.*, 2009), 수분이용효율 (Water Use Efficiency, WUE)을 향상시킨다. 식물마다 종 특이성을 갖고 있기 때문에 CO₂ 농도와 온도에 따른 식물의 성장특성의 영향은 다양하며 복합적으로 이루어진다 (Kim and Kang, 2003).

Lee (1985)는 주어진 환경조건에서 경쟁력이 강하고 적응도가 높은 종들이 그 지역의 변화된 환경에 더 잘

적응하는 종, 즉 생태 지위가 더 알맞은 종들로 대체되어 생태계의 구조와 기능이 변화하는 것이 천이라고 하였다. 그리고 Tilman (1998)은 우연한 것임에도 불구하고 지역적으로 반복되는 과정이 천이라고 하였다. 생태 지위 (ecological niche, 또는 niche)라는 용어는 Grinnell (1917)에 의해 처음 사용되었고, 생태 지위는 생태계에서 한 생물이 차지하는 공간적 위치와 기능적 역할에 초점을 두어 공간지위 (spatial niche)라 하였다. 생태 지위는 생태 지위 폭 (ecological niche breadth)과 생태 지위 중복역 (ecological niche overlap)으로 구분되어 진다. 생태 지위폭은 종의 천이 계열을 밝히는데 이용되고, 생태 지위 중복역은 자원에 대한 경쟁의 정도를 가늠할 수 있는 척도로 이용할 수 있다 (Park, 2003). 생태 지위폭의 측정은 학자에 따라 형질이 다르게 나타날 수 있으며, 환경 구배에 따른 각 형질의 평균치를 가지고 계산되어질 수 있다 (Park, 2003). 생태 지위가 동일하면 자원에 대한 경쟁을 피할 수 없으며, 경쟁의 정도는 생태 지위 중복역의 너비를 통해 종내 또는 종간의 상대적 경쟁도를 비교할 수 있다 (Abrams, 1980).

국내에서 참나무의 생육에 관한 연구는 환경구배처리에 따른 상수리나무, 굴참나무와 신갈나무의 생육 차이 (Jeong *et al.*, 2009), 지구온난화에 따른 상수리나무와 굴참나무의 생육반응 (Jeong *et al.*, 2010), 광, 수분, 영양소에 따른 졸참나무와 갈참나무 유식물 (seedling)의 생육 차이 (Lim *et al.*, 2012), 환경구배처리에 따른 떡갈나무의 생육반응 (Lee *et al.*, 2010), 광도와 수분 구배에 따른 참나무류 치수의 발아 및 성장 (Beon, 2000) 등이 있고, 생태 지위에 관한 연구는 세 가지 환경구배에 따른 신갈나무의 생태적 지위폭과 상수리나무, 굴참나무와의 생태적 중복역 (Lee and You, 2009), 상수리나무와 굴참나무의 생태적 지위에 관한 연구 (Kim *et al.*, 2008), 환경요인 구배에 따라 졸참나무와 갈참나무의 생태적 지위의 의미와 생태적 분포에서의 의미 (Lee and You, 2012) 등이 있다. 이렇게 참나무류에 대한 생육반응과 생태 지위에 관한 연구는 진행된 바 있으나, 지구 온난화 조건에서 식물의 여러 가지 형질을 이용한 생태 지위에 관한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서, 본 연구는 한반도의 교목층에 높은 빈도로 분포하는 참나무 중에서 수분과 유기물이 많은 입지에 분포하는 상수리나무와 수분이나 양분이 적은 척박한 건조지에 분포하는 굴참나무의 분포적 특성이 다른 (Kim *et al.*, 2008) 두 종을 대상으로 대기 중의 CO₂ 농도와 기온이 상승하고 환경요소인 광, 토양수분, 영양소가 변화할 때 두 종의 생태 지위폭과 생태 지위 중복역에 가장 많

은 영향을 미치는 요소가 어떤 것인지 알아보고자 시도 하였다.

재료 및 방법

1. 종자 선정 및 파종

본 연구에 사용한 유식물은 상수리나무 (*Quercus acutissima*)와 굴참나무 (*Q. variabilis*)의 종자를 발아시켜 사용하였다. 종자는 충청남도 공주시 신관동 인근 야산에서 2009년 10월에 채집하여 4°C에 냉장 저장한 후 이듬해인 2010년 4월에 각 종별 크기가 유사한 종자를 선별하여 파종하였다. 파종은 지름 24 cm, 높이 23.5 cm인 화분을 이용하여 각 환경 구배당 2개의 화분에 3개체씩 파종하였고, 2010년 9월까지 공주대학교 자연과학대학 생물학과 유리온실에서 유식물을 180일 동안 생육시켜 수확 후 실험실에서 측정하였다.

2. 환경요인 처리

1) 지구온난화

통제가 가능한 유리온실 안에서 일반 대기조건인 대조구와 지구온난화의 핵심요인인 CO₂ 농도와 온도를 상승시킨 처리구로 구분하였다. CO₂ 농도 처리는 CO₂ 가스통 2개를 설치한 뒤, 각각 지름 0.2 mm인 호스를 연결하여 CO₂ 가스를 24시간 주입하였고, 처리구 내에 설치된 CO₂ 센서 (TEL-7001, Onset computer, USA)를 통해 농도변화를 모니터링한 뒤, Gas regulator로 조절하였다 (Fig. 1). 처리구의 CO₂ 농도는 최근 IPCC에서 지구온난화 시나리

오에 일반적으로 사용되는 B1 시나리오 (IPCC, 2007)인 대기중 CO₂ 농도의 약 2배 (690~770 ppm)로 설계하여 실제 대조구 CO₂ 농도 (386.9±6.1 ppm)의 약 1.6배 (평균 602.7±64.1 ppm)로 유지하였다 (Fig. 2).

온도측정은 디지털 데이터 온도계 (Thermo recorder TR-71U, Co., Japan)를 설치하여 30분 간격으로 자동 측정하였으며, 2100년대에 평균 기온이 2.2도 상승할 것으로 예측한 (IPCC, 2007) 것을 고려하여 대조구보다 온난화처리구의 온도를 평균 2.2°C 높게 유지하였다.

2) 광

광 처리는 온실에 입사되는 전 일광을 차광막의 두께를 조절하여 10% (L10, 76.8±2.16 μmol m⁻² s⁻¹), 30% (L30, 236.42±32.15 μmol m⁻² s⁻¹), 70% (L70, 539.21±54.66 μmol m⁻² s⁻¹), 100% (L100, 787.75±77.76 μmol m⁻² s⁻¹)로 처리하였다. 이때 광도는 광합성측정기 (LCI Ultra Compact Photosynthesis System, ADC 2005)로 측정하였다.

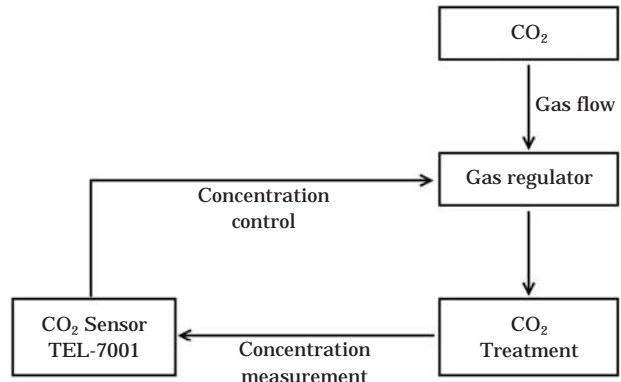


Fig. 1. Schematic diagram of CO₂ enrichment treatment.

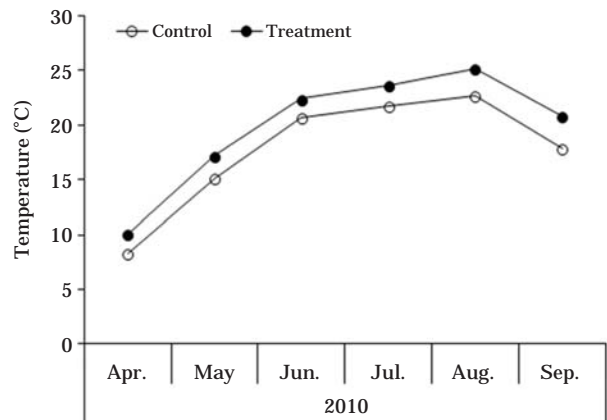
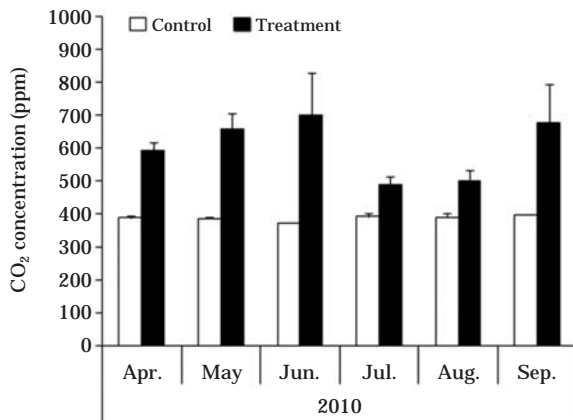


Fig. 2. Average CO₂ concentration and monthly mean temperature within each environment used in this experiment under control (ambient CO₂-ambient temperature) and treatment (elevated CO₂-elevated temperature) conditions.

3) 토양수분

토양수분 처리는 토양을 채운 화분에 물을 주면서 화분 밑으로 물이 새어나가기 직전까지의 물의 양인 포장용수량 (carrying water capacity) 700 mL (M700)를 최대값으로 하고, 이보다 적은 100 mL (M100), 300 mL (M300), 500 mL (M500)로 구분하여 물을 공급하였다. 토양수분의 공급주기는 증발이 빠른 여름철에는 3~4일 간격으로, 그 외 기간에는 7일 간격으로 공급하였다.

4) 영양소

토양의 영양소 처리는 동일 입자 크기 (2 mm 이하)의 건조한 모래 (100%)를 기준으로 하여 유기물의 비율을 0% (N0), 5% (N5), 10% (N10), 15% (N15)가 되도록 배합하였다. 이러한 기준은 참나무숲의 토양의 유기물함량이 약 5~10% (KLTER, 2012)라는 값을 기준으로 하였다. 처리는 유기물 함량이 46.7%인 유기질비료 (주, 효성오엔비)를 사용하였다.

3. 형태학적 형질

생태 지위 계산을 위하여 형태학적 형질은 총 20개 항목으로 잎폭길이 (cm), 잎몸길이 (cm), 잎몸무게 (g), 잎자루길이 (cm), 잎자루무게 (g), 엽면적 (cm²), 잎수 (ea), 전체 잎무게 (g), 줄기길이 (cm), 줄기직경 (cm), 줄기무게 (g), 지상부길이 (cm), 지상부무게 (g), 지하부길이 (cm), 지하부무게 (g), 식물체무게 (g)를 측정하였으며, 위 측정값을 이용하여 잎밀도, 비엽면적, 지하부/지상부 비, 광합성기관 투자비를 산출하였다.

여기서 잎밀도 (leaf density)는 잎이 가지에 모여 있는 정도로써 가지길이에 대한 잎수, 비엽면적 (specific leaf area)은 잎무게에 대한 엽면적의 비, 지하부/지상부 비 (root/shoot ratio)는 지상부에 대한 지하부의 비, 광합성기관 투자비 (photosynthetic investment)는 잎을 뺀 식물체무게에 대한 잎무게의 비를 말한다.

잎폭길이, 잎몸길이, 엽면적은 엽면적계 (SI700, Skye)를 이용하였다. 잎자루길이, 줄기길이, 줄기직경, 지상부길이, 지하부길이는 vernier calipers (CD-15CPX, Mitutoyo Corp.)를 이용하였고, 잎몸무게, 전체 잎무게, 줄기무게, 지상부무게, 지하부무게 등 건중량은 전자저울 (UX400H)을 이용하여 측정하였다.

4. 생태 지위

1) 생태 지위폭

생태 지위폭은 환경구배별 6개체에 대한 각 형질의 평

균치를 Levins (1968)의 식에 적용하여 계산하였다.

$$B=1/\sum (P_i^2) S$$

B : niche breadth (Levins' B)

P_i : relative response of a given species to the whole gradients that is realized in gradient i

S : total number of gradients

2) 생태 지위 중복역

두 종의 생태 지위 중복역은 환경구배별 각 형질의 평균치를 이용하여 Schoener (1970)의 방법에 따라 비례유사도 (proportional similarity)를 계산하였다. 생태 지위가 동일하면 즉 생태 지위가 완전히 중복되면 그 값은 1이고 전혀 다르다면 0이다.

$$PS=1-1/2\sum |P_{ij}-P_{ih}|$$

PS : Proportional similarity (niche overlap)

P_{ij} : relative response of species j in the i th gradient

P_{ih} : relative response of species h in the i th gradient

5. 통계처리

대조구와 온난화처리구간의 생태 지위의 변이를 조사하기 위해 각 형질의 생태 지위를 이용하여 일원분산분석 (one-way ANOVA)을 실시하였고, 환경요인에 의한 두 종의 생육적 반응의 경향성을 밝히기 위하여 환경요인에 따른 각 형질에 대한 반응의 평균치를 이용하여 유클리드거리 (euclidian distance)를 구한 후 비가중치 그룹쌍평균 (unweighted pair-group average, UPGA)으로 유집 (clustering)하였다. 또한 전체적인 분포상태를 밝히기 위해 형질의 평균치를 상관계수로 이용한 주성분분석 (PCA)으로 배열하였다. 위의 통계학적 분석은 Statistica 8 통계패키지 (Statsoft Co. 2008)를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 생태 지위폭

1) 상수리나무 (*Quercus acutissima*)

대조구의 생태 지위폭은 광 처리구 (0.895) < 토양수분 처리구 (0.977) < 영양소 처리구 (0.979) 순으로 나타났다.

생태 지위폭의 평가는 이와 유 (2009)의 평가기준과 동일하게 최대값인 1을 기준으로 0.900 이상을 넓게 평가하였고, 0.900 이하를 좁게 평가하였다. 그 결과 광 처리구

Table 1. Comparison of niche breadth of *Quercus acutissima* along each environmental factor (light, soil moisture, nutrient) under control (ambient CO₂-ambient temperature) and treatment (elevated CO₂-elevated temperature) conditions.

Character	Control			Treatment		
	Light	Moisture	Nutrient	Light	Moisture	Nutrient
Leaf width length	0.977	0.997	0.996	0.996	0.991	0.988
Leaf lamina length	0.994	0.999	0.997	0.998	0.998	0.998
Leaf lamina weight	0.977	0.988	0.986	0.906	0.957	0.978
Leaf petiole length	0.979	0.979	0.948	0.964	0.963	0.987
Leaf petiole weight	0.960	0.985	0.976	0.935	0.949	0.945
Leaf area	0.969	0.998	0.996	0.995	0.985	0.994
No. of leaves	0.914	0.988	0.965	0.993	0.994	0.974
Leaves weight	0.830	0.976	0.959	0.859	0.989	0.960
Stem length	0.916	0.944	0.989	0.974	0.915	0.838
Stem diameter	0.938	0.995	0.966	0.969	0.987	0.974
Stem weight	0.990	0.971	0.965	0.964	0.960	0.933
Shoot length	0.977	0.993	0.995	0.986	0.998	0.976
Shoot weight	0.897	0.979	0.964	0.914	0.993	0.961
Root length	0.978	0.971	0.992	0.973	0.998	0.986
Root weight	0.525	0.942	0.991	0.586	0.978	0.979
Plant weight	0.637	0.958	0.989	0.686	0.990	0.978
Leaf density	0.882	0.863	0.997	0.932	0.978	0.965
Specific leaf area	0.925	0.989	0.994	0.920	0.988	0.996
Root/Shoot ratio	0.714	0.954	0.966	0.725	0.938	0.983
Photosynthetic investment	0.926	0.944	0.957	0.880	0.933	0.982
Mean (n=20)	0.895	0.977	0.979	0.908	0.974	0.969
S. D.	0.127	0.019	0.016	0.114	0.025	0.035

는 20가지 형질 중 14가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었고, 전체 잎무게, 지상부무게, 지하부무게, 식물체무게, 잎 밀도, 지하부/지상부 형질이 0.525~0.897로 다소 좁았다. 토양수분 처리구는 잎밀도 형질만이 0.863으로 다소 좁았고 나머지 19가지 형질은 0.900 이상으로 넓었다. 영양소 처리구는 모든 형질이 0.900 이상으로 넓었다 (Table 1).

온난화처리구의 생태 지위폭은 광 처리구 (0.908) < 영양소 처리구 (0.969) < 토양수분 처리구 (0.974) 순으로 나타났다.

광 처리구는 20가지 형질 중 15가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었고, 전체 잎무게, 지하부무게, 식물체무게, 지하부/지상부 비, 광합성기관투자비 형질은 0.586~0.880로 다소 좁았다. 토양수분 처리구는 모든 형질이 0.900 이상으로 넓었고, 영양소 처리구는 줄기길이 형질만이 0.838로 다소 좁았고 나머지 19가지 형질은 0.900 이상으로 넓었다 (Table 1).

상수리나무의 생태 지위폭은 토양수분과 영양소보다 광에서 좁게 나타났다. 이것은 상수리나무, 굴참나무 그리고 신갈나무의 다른 연구결과와 일치한다 (Kim *et al.*, 2008; Lee and You, 2009). 이는 상수리나무가 토양수분

과 영양소보다는 광에 대한 반응이 크다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 육상생태계에서 산림군락의 목본층에서 광이 다른 환경요인보다 결정적인 환경요인으로 알려져 있다 (Barbour *et al.*, 1987).

이를 종합해본 결과, 대조구에 비해 온난화처리구의 생태 지위폭은 통계학적인 차이는 없었으나, 광 처리구는 증가하였고 토양수분 처리구와 영양소 처리구는 감소한 것으로 나타났다. 이는 지구온난화가 진행됨에 따라 상수리나무는 광 환경변화에 잘 적응하여 지금보다 분포역이 넓어질 것으로 해석된다.

2) 굴참나무 (*Quercus variabilis*)

대조구의 생태 지위폭은 광 처리구 (0.926) < 토양수분 처리구 (0.977) < 영양소 처리구 (0.987) 순으로 나타났다.

광 처리구는 20가지 형질 중 14가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었고, 전체 잎무게, 지상부무게, 지하부무게, 식물체무게, 잎밀도, 지하부/지상부 형질이 0.600~0.895로 다소 좁았다. 토양수분 처리구와 영양소 처리구는 모든 형질이 0.900 이상으로 넓었다 (Table 2).

온난화처리구의 생태 지위폭은 광 처리구 (0.894) < 영

Table 2. Comparison of niche breadth of *Quercus variabilis* along each environmental factor (light, soil moisture, nutrient) under control (ambient CO₂-ambient temperature) and treatment (elevated CO₂-elevated temperature) conditions. ★ indicates a significant difference between control and treatment (Fisher's least significant difference, $p < 0.05$).

Character	Control			Treatment		
	Light	Moisture	Nutrient	Light	Moisture	Nutrient
Leaf width length	0.993	0.998	0.996	0.982	0.997	0.998
Leaf lamina length	0.995	0.998	0.996	0.990	0.988	0.997
Leaf lamina weight	0.977	0.991	0.989	0.870	0.986	0.966
Leaf petiole length	0.986	0.964	0.955	0.981	0.981	0.884
Leaf petiole weight	0.985	0.975	0.954	0.994	0.986	0.982
Leaf area	0.986	0.994	0.982	0.957	0.974	0.991
No. of leaves	0.973	0.995	0.987	0.968	0.981	0.967
Leaves weight	0.881	0.975	0.990	0.750	0.924	0.962
Stem length	0.984	0.983	0.989	0.982	0.982	0.961
Stem diameter	0.978	0.995	0.998	0.958	0.991	0.996
Stem weight	0.937	0.953	0.989	0.910	0.975	0.964
Shoot length	0.995	0.971	0.994	0.985	0.992	0.991
Shoot weight	0.895	0.967	0.996	0.823	0.938	0.963
Root length	0.997	0.989	0.999	0.927	0.986	0.999
Root weight	0.600	0.935	0.986	0.590	0.942	0.938
Plant weight	0.705	0.946	0.991	0.660	0.943	0.947
Leaf density	0.629	0.949	0.972	0.906	0.946	0.938
Specific leaf area	0.963	0.993	0.996	0.925	0.987	0.981
Root/Shoot ratio	0.778	0.987	0.990	0.830	0.988	0.978
Photosynthetic investment	0.959	0.993	0.984	0.884	0.999	0.983
Mean (n=20)	0.926	0.977	0.987	0.894	0.974	0.969*
S. D.	0.109	0.020	0.013	0.113	0.022	0.028

양소 처리구 (0.969) < 토양수분 처리구 (0.974) 순으로 나타났다.

광 처리구는 20가지 형질 중 13가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었고, 잎몸무게, 전체 잎무게, 지상부무게, 지하부무게, 식물체무게, 지하부/지상부 비, 광합성기관투자비 형질은 0.590~0.884로 다소 좁았다. 토양수분 처리구는 모든 형질이 0.900 이상으로 넓었고, 영양소 처리구는 잎자루길이 형질만이 0.884로 다소 좁았고 나머지 19가지 형질은 0.900 이상으로 넓었다 (Table 2).

굴참나무의 생태 지위폭은 토양수분과 영양소보다 광에서 좁게 나타났다. 이것은 상수리나무와 동일하게 토양수분과 영양소보다는 광에 대한 반응이 크다는 것을 알 수 있다.

이를 종합해본 결과, 대조구에 비해 온난화처리구의 생태 지위폭은 영양소 처리구에서 감소하였고, 광 처리구와 토양수분 처리구는 통계학적인 차이는 없었으나 감소한 것으로 나타났다. 이는 지구온난화가 진행됨에 따라 굴참나무는 광, 토양수분, 영양소의 환경변화에 반응하여 지금보다 분포역이 좁아질 것으로 해석된다.

2. 생태 지위 중복역

상수리나무와 굴참나무에 대한 대조구의 생태 지위 중복역은 광 처리구 (0.912) < 영양소 처리구 (0.925) < 토양수분 처리구 (0.941) 순으로 나타났다.

광 처리구는 20가지 형질 중 13가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었고, 잎수, 전체 잎무게, 줄기길이, 줄기무게, 지상부무게, 식물체무게, 잎밀도 형질이 0.723~0.897로 다소 좁았다. 토양수분 처리구는 20가지 형질 중 잎몸무게, 줄기길이, 잎밀도, 광합성기관 투자비 형질이 0.865~0.898로 다소 좁았고, 나머지 16가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었다. 영양소 처리구는 잎몸무게, 잎자루무게, 줄기무게 형질에서 0.836~0.879로 다소 좁았고, 나머지 17가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었다 (Table 3).

온난화처리구의 생태 지위 중복역은 영양소 처리구 (0.888) < 토양수분 처리구 (0.902) < 광 처리구 (0.922) 순으로 나타났다.

광 처리구는 20가지 형질 중 18가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었고, 잎몸무게, 잎자루무게, 전체 잎무게, 잎밀도 형질은 0.840~0.897로 다소 좁았다. 토양수분 처리

Table 3. Comparison of niche overlap between *Quercus acutissima* and *Q. variabilis* within environmental conditions under control (ambient CO₂-ambient temperature) and treatment (elevated CO₂-elevated temperature) conditions. ★ indicates a significant difference between control and treatment (Fisher's least significant difference, p<0.05).

Character	Control			Treatment		
	Light	Moisture	Nutrient	Light	Moisture	Nutrient
Leaf width length	0.939	0.960	0.987	0.949	0.941	0.938
Leaf lamina length	0.965	0.977	0.949	0.950	0.945	0.974
Leaf lamina weight	0.969	0.865	0.857	0.897	0.894	0.852
Leaf petiole length	0.941	0.939	0.917	0.930	0.871	0.877
Leaf petiole weight	0.949	0.909	0.836	0.897	0.834	0.871
Leaf area	0.935	0.954	0.929	0.920	0.888	0.945
No. of leaves	0.879	0.944	0.953	0.908	0.911	0.855
Leaves weight	0.873	0.936	0.900	0.892	0.821	0.838
Stem length	0.875	0.898	0.931	0.928	0.866	0.850
Stem diameter	0.946	0.988	0.910	0.957	0.912	0.911
Stem weight	0.889	0.970	0.879	0.928	0.881	0.907
Shoot length	0.918	0.961	0.951	0.949	0.960	0.882
Shoot weight	0.878	0.952	0.911	0.902	0.844	0.835
Root length	0.938	0.912	0.962	0.901	0.938	0.939
Root weight	0.909	0.984	0.922	0.934	0.948	0.824
Plant weight	0.897	0.976	0.921	0.939	0.936	0.828
Leaf density	0.723	0.872	0.908	0.840	0.946	0.851
Specific leaf area	0.955	0.987	0.989	0.973	0.966	0.925
Root/Shoot ratio	0.956	0.944	0.948	0.912	0.872	0.927
Photosynthetic investment	0.906	0.895	0.948	0.938	0.867	0.935
Mean (n=20)	0.912	0.941	0.925	0.922	0.902*	0.888*
S. D.	0.055	0.038	0.039	0.030	0.044	0.046

구는 20가지 형질 중 잎몸무게, 잎자루길이, 잎자루무게, 엽면적, 전체 잎무게, 줄기길이, 줄기무게, 지상부무게, 지하부/지상부 비, 광합성기관 투자비 형질이 0.821~0.894로 다소 좁았고, 나머지 10가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었다. 영양소 처리구는 잎몸무게, 잎자루길이, 잎자루무게, 잎수, 전체 잎무게, 줄기길이, 지상부길이, 지상부무게, 지하부무게, 식물체무게, 잎밀도 형질에서 0.824~0.882로 다소 좁았고, 나머지 9가지 형질에서 0.900 이상으로 넓었다(Table 3).

이를 종합해본 결과, 대조구에 비해 온난화처리구의 생태 지위 중복역은 토양수분 처리구와 영양소 처리구는 감소하였다. 반면, 광 처리구는 통계학적인 차이는 없으나 증가한 것으로 나타났다. 이는 지구온난화가 진행됨에 따라 상수리나무와 굴참나무는 토양수분과 영양소 환경에 의한 경쟁이 약해질 것으로 해석된다.

3. 통계분석 결과

1) CLUSTER 분석결과

상수리나무는 환경 처리에 따라 크게 세 그룹으로 구

분되었다. 그룹I은 대조구와 온난화처리구의 구분 없이 전일광인 C-L100와 T-L100를 포함한 토양수분과 영양소 집단이고, 그룹II와 그룹III은 대조구와 온난화처리구의 구분 없이 적은 광 집단으로 구분되었다(Fig. 3a). 굴참나무는 환경 처리에 따라 크게 두 그룹으로 구분되었다. 그룹I은 대조구와 온난화처리구의 구분없이 전일광인 C-L100와 T-L100를 포함한 토양수분과 영양소 집단이고, 그룹II는 대조구와 온난화처리구의 구분 없이 적은 광 집단으로 구분되었다(Fig. 3b).

두 종의 형질은 Phare (1971)와 Auguspurgur (1984)의 결과와 동일하게 토양수분이나 영양소의 조건보다 낮은 광 조건하에서 유사한 반응을 보이는 것은 상수리나무와 굴참나무가 낮은 광의 피음조건에서 온난화처리와 상관 없이 내음성 기작을 유지하기 때문으로 해석된다.

2) PCA 분석결과

두 종은 CLUSTER 분석결과와 유사하게 구별되었다. 상수리나무는 요인 1 (53.61%)과 요인 2 (13.88%)에 의해, 굴참나무는 요인 1 (49.00%)과 요인 2 (22.89%)에 의해 토양수분과 영양소 집단(I)과 적은 광 집단(II)으로

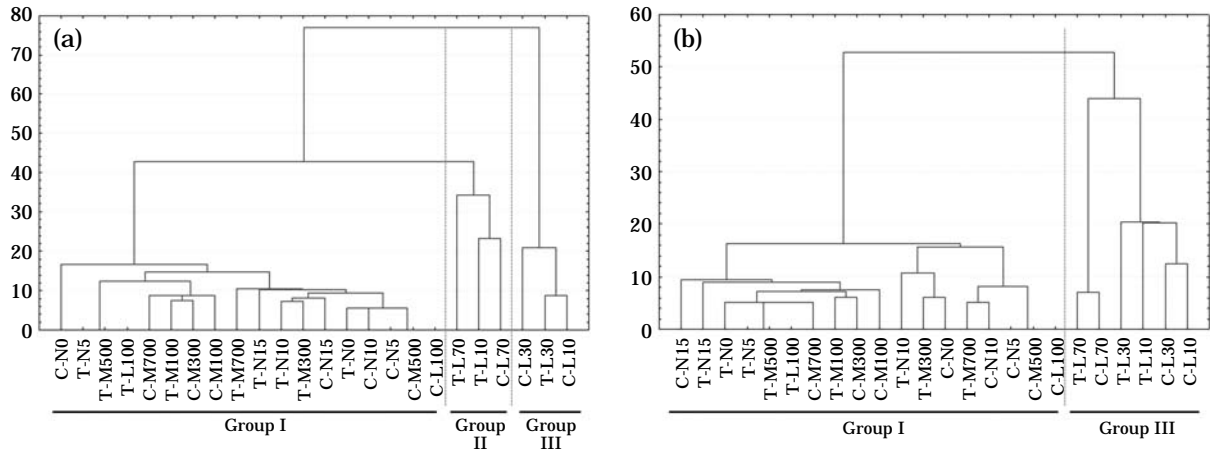


Fig. 3. Unweighted pair-group average clustering of reaction of (a) *Quercus acutissima* and (b) *Q. variabilis* to environmental conditions (C: ambient CO₂-ambient temperature, T: elevated CO₂-elevated temperature). Numeral indicates treatment gradients in each environmental factor (L: light, M: moisture, N: nutrient).

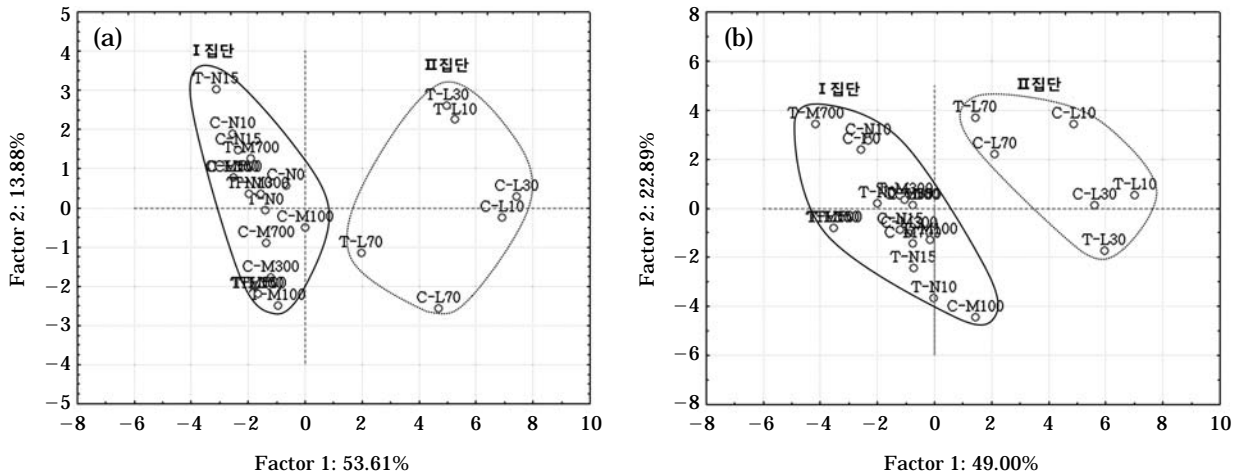


Fig. 4. PCA ordination of 24 individuals of (a) *Quercus acutissima* and (b) *Q. variabilis* using 20 ecological and morphological variables treated to environmental factors (C: ambient CO₂-ambient temperature, T: elevated CO₂-elevated temperature, L: light, M: moisture, N: nutrient). Numeral indicates treatment gradients in each environmental factor.

명확히 구별되었다. PCA 배열법 상으로 전일광인 L100을 포함한 토양수분과 영양소 집단은 대조구와 온난화처리구의 구분 없이 서로 가깝게 배열하였고, 적은 광 집단은 온난화처리와 광 구배에 따라 서로 멀리 배열하였다 (Fig. 4).

변 (2000)에 의하면 환경요소인 광, 토양수분, 영양소 중에서 광은 식물의 증산작용을 왕성하게 하고 뿌리의 발달을 촉진시켜 식물의 생육에 큰 영향을 끼친다. 그렇기 때문에 본 연구 결과에서도 두 종은 지구온난화보다 광 환경에 따라 민감하게 반응한 것으로 판단된다.

이러한 두 종의 배열법 상의 분포유형에 미치는 식물체의 형질은 상수리나무가 잎자루길이, 잎자루무게, 줄기무게, 잎밀도 ($r < 0.5$)를 제외한 16가지이고, 굴참나무가 잎폭길이, 잎몸길이, 잎자루길이, 잎자루무게, 엽면적, 줄기길이, 지상부길이, 잎밀도 ($r < 0.5$)를 제외한 12가지로 다양하다 (Table 4). 이것은 두 종의 생태학적 반응이 식물체의 다양한 형질이 종합적으로 관여하고 있음을 의미하며, 굴참나무가 상수리나무보다는 적은 형질에 의해 반응할 가능성이 있다.

Table 4. Correlation matrix of 20 variables with the first and two principle component scores of PCA analysis of *Quercus acutissima* and *Q. variabilis*.

Character	Factor of <i>Q. acutissima</i>		Factor of <i>Q. variabilis</i>	
	I	II	I	II
Leaf width length	0.813817	-0.426938	0.010126	0.857016
Leaf lamina length	0.671577	-0.158565	-0.132963	0.943366
Leaf lamina weight	-0.529715	-0.711032	-0.900729	0.219058
Leaf petiole length	0.328193	-0.709276	0.305573	0.599780
Leaf petiole weight	-0.084858	-0.921570	-0.389068	0.498995
Leaf area	0.815530	-0.318331	-0.092466	0.943635
Leaves number	-0.760938	0.389703	-0.557652	-0.188114
Leaves weight	-0.868181	-0.017946	-0.937489	0.155912
Stem length	0.867719	-0.162411	0.468511	0.648435
Stem diameter	-0.794844	0.034214	-0.897951	-0.053119
Stem weight	-0.203211	-0.126288	-0.817655	0.409894
Shoot length	0.700587	0.354057	0.485195	0.660756
Shoot weight	-0.840901	0.044672	-0.920557	0.217007
Root length	-0.603006	-0.204776	-0.799569	-0.131594
Root weight	-0.947581	-0.004234	-0.960111	0.124896
Plant weight	-0.952161	0.003922	-0.966472	0.144821
Leaf density	-0.492201	-0.391517	-0.207160	-0.324543
Specific leaf area	0.921281	0.276276	0.875667	0.319587
Root/Shoot ratio	-0.837763	-0.101820	-0.861777	-0.059055
Photosynthetic investment	0.793886	0.060615	0.838144	0.087051
Variance explained (%)	53.61	13.88	49.00	22.89

적 요

한반도의 참나무 중 수분과 유기물이 많은 입지에 분포하는 상수리나무와 수분이나 양분이 적은 척박한 건조지에 분포하는 굴참나무를 대상으로 대기 중의 CO₂ 농도와 기온이 상승하고 환경요소인 광, 토양수분, 영양소가 변화할 때 두 종의 생태 지위폭과 생태 지위 중복역에 가장 많은 영향을 미치는 요소가 어떤 것인지 알아보고자 하였다. 유리온실 내에서 대기 중의 CO₂ 농도를 그대로 반영한 대조구와 이보다 CO₂ 농도는 약 1.6배와 온도는 2.2°C 상승시킨 온난화처리구에서 유식물에 주요 환경요인 중 광, 토양수분과 영양소를 각각 4구배로 처리하여 두 종의 생태 지위폭과 생태 지위 중복역을 계산하였다. 그 결과, 상수리나무의 생태 지위폭은 대조구와 온난화처리구간에 통계적인 차이는 없었고, 굴참나무의 생태 지위폭은 대조구에 비해 온난화처리구의 영양소 처리구에서 감소하였다. 상수리나무와 굴참나무의 생태 지위 중복역은 대조구에 비해 온난화처리구의 토양수분과 영양소 처리구에서 감소하였다. 이러한 결과는 유식물을 대상으로 실험한 결과로 성숙목에 적용하는 것은 한계가 있으나, 지구온난화가 진행됨에 따라 상수리나무와 굴참나무는 토양수분과 영양소 환경에 의한 경쟁이 약해질 것

으로 유추할 수 있다. Cluster 분석과 PCA 분석 결과, 두 종은 CO₂ 농도 및 온도 증가에 의한 반응보다 광 환경에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 환경부의 국가장기생태연구사업(2012)에 의하여 지원되었다.

인 용 문 헌

Abrams, P. 1980. Some comments on measuring niche overlap. *Ecology* **61**: 44-49.
 Augustspurgur, C.K. 1984. Light requirements of neotropical tree seedlings: a comparative study of growth and survival. *Journal of Ecology* **72**: 777-795.
 Barbour, M.G., J.H. Burk and W.D. Pitts. 1987. Terrestrial plant ecology. 2nd ed. The Benjamin/Cummings Publishing Company. Inc. California, 634pp.
 Beon, M.S. 2000. Germination and growth of Oaks (*Quercus serrata*, *Q. mongolica*, *Q. variabilis*) seedlings by

- gradient of light intensity and soil moisture. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**(4): 183-189. [Korean Literature]
- Beranacchi, C.J., J.S. Coleman, F.A. Bazzaz and K.D.M. McConnaughay. 2000. Biomass allocation in old-field annual species grown in elevated CO₂ environments: no evidence for optimal partitioning. *Global Change Biology* **6**: 855-863.
- Crookshanks, M., G. Taylor and M. Broadmeadow. 1998. Elevated CO₂ and tree root growth: contrasting responses in *Fraxinus excelsior*, *Quercus petraea* and *pinus sylvestris*. *New Phytologist* **138**: 241-250.
- Enoch, H.Z. and R.G. Hurd. 1977. Effect of light intensity carbon dioxide concentration and leaf temperature on gas exchange of spray caenation plants. *Journal of Experimental Botany* **28**: 84-95.
- Garbutt, K. and F.A. Bazzaz. 1984. The effects of elevated CO₂ on plant. III. Flower, fruit and seed production and abortion. *New Phytologist* **98**(4): 433-446.
- Grinnell, J. 1917. The niche relationships of the California thrasher. *The Auk* **34**(4): 427-433.
- Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums. 1990. Climate change: the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Great Britain, pp. 364.
- Idso, K.E. and S.B. Idso. 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years. *Agricultural and Forest Meteorology* **69**: 153-203.
- Idso, S.B. and B.A. Kimball. 1997. Effects of long-term atmospheric CO₂ enrichment on the growth and fruit production of sour orange trees. *Global Change Biology* **3**: 89-96.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: Mitigation of climate change. Contribution working group III contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge university press, Cambridge, New York, U.S.A., 176pp.
- Jeong, H.M., H.R. Kim and Y.H. You. 2009. Growth difference among saplings of *Quercus acutissima*, *Q. variabilis* and *Q. mongolica* under the environmental gradients treatment. *Korean Journal of Environmental Biology* **27**(1): 82-87. [Korean Literature]
- Jeong, J.K., H.R. Kim and Y.H. You. 2010. Effects of elevated CO₂ concentration and temperature on growth response of *Quercus acutissima* and *Q. variabilis*1a. *Korean Journal of Environment and Ecology* **24**(6): 648-656. [Korean Literature]
- Kim, H.R., H.M. Jeong, H.J. Kim and Y.H. You. 2008. Ecological Niche of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis*. *Korean Journal of Environmental Biology* **26**(4): 385-391. [Korean Literature]
- Kim, Y.S. and H.J. Kang. 2003. Effects of elevated atmospheric CO₂ on wetland plants: a review. *Korean Journal of Limnological Society* **36**(4): 391-402.
- Kim, P.G. and E.J. Lee. 2001. Ecophysiology of photosynthesis 2: Adaptation of photosynthetic apparatus to changing environment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Moteorology* **3**(3): 171-176. [Korean Literature]
- KLTER. 2012. Annual Report of Korean National Long-term Ecological Research. NIER. Seoul, Korea. 1477pp. [Korean Literature]
- Korea Meterological Adminstration. 2008. Report of Global Atmosphere Watch 2008. Seoul, Korea. 177pp. [Korean Literature]
- Kobayashi, N. 2006. Global Warming and Forest Business (3th ed.). Bomoondang, Seoul. 268pp.
- Lee, H.J. and Y.H. You. 2009. Ecological niche breadth of *Q. mongolica* and overlap with *Q. acutissima* and *Q. variabilis* along with three environment Gradients. *Korean Journal of Environmental Biology* **27**(2): 191-197. [Korean Literature]
- Lee, H.S. 1985. Studies on the Niche of several plant species along the Environmental Gradient. Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea. 144pp. [Korean Literature]
- Lee, S.H. and Y.H. You. 2012. Measurement of ecological niche of *Quercus aliena* and *Q. serrata* under environmental factors treatments and its meaning to ecological distribution. *Journal of Ecology and Field Biology* **35**(3): 227-234. [Korean Literature]
- Lee, S.K., Y.H. You and H.B. Yi. 2010. The growth response of *Quercus dentata* sapling to the environmental gradients treatment. *Korean Journal of Life Science* **20**(4): 597-601. [Korean Literature]
- Levins, R. 1968. Evolution in Changing Environments, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Lim, H., H.R. Kim and Y.H. You. 2012. Growth difference between th seedlings of *Quercus serrata* and *Q. aliena* under light, moisture and nutrient gradients. *Journal of Wetlands Research* **14**(2): 237-242. [Korean Literature]
- Marie-Anne de, G., G. Kees-Janvan, S. Johan, H. Bruce and Chris van K. 2005. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: a meta-analysis. *Global Change Biology* **12**: 2077-2091.
- Ministry of Environment. 2012. 2012 White Paper of Environment, 58-59pp. [Korean Literature]
- Onoda, Y., T. Hirose and K. Hikosaka. 2009. Does leaf photosynthesis adapt to CO₂-enriched environments? An

- experiment on plants originating from three natural CO₂ springs. *New Phytologist* **182**: 698-709.
- Park, B.H. 2003. Studies on the Niche of Four Herbal Species along the Environmental Gradient. Master's Thesis, Seowon University, Cheongju, Korea. 1-4pp. [Korean Literature]
- Park, H.R. 2003. Global warming and its effects and preventive, Uyoug, Seoul, 285pp. [Korean Literature]
- Park, W.K. 1993. Increasing atmospheric carbon dioxide and growth trends of korean subalpine conifers. *Journal of Korean Forestry Society* **82**(1): 17-25. [Korean Literature]
- Phare, E.R. 1997. Growth of red oak (*Quercus rubra* L.) seedling in relation to light and nutrients. *Ecology* **52**: 669-672.
- Rogers, H.H. and G.B. Runion. 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. *Environmental Pollution* **83**: 155-189.
- Saxe, H., D.S. Ellsworth and J. Heath. 1998. Tansley review No.98 Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytologist* **139**: 359-436.
- Schoener, T.W. 1970. Nonsynchronous spatial overlap of lizards in patchy habitats. *Ecology* **51**: 408-418.
- Tilman, D. 1998. Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities. Princeton University Press. 227-254pp.
- You, K.B. 2010. Geography: a portal to green growth. *Journal of Korean Geographical Society* **45**(1): 11-25. [Korean Literature]

(Manuscript received 23 August 2013,
 Revised 2 September 2013
 Revision accepted 10 September 2013)