

지구온난화 조건에서 광 처리에 따른 졸참나무와 갈참나무의 생육반응

조 규 태* / 김 해 란** / 정 현 모*** / 이 경 미**** / 김 태 규***** / 강 대 균***** / 유 영 한*****†

Effect of Light on the Growth Responses of *Quercus serrata* and *Q. aliena* to Elevated CO₂ and Temperature

Kyu-Tae Cho* / Hae-Ran Kim** / Heon-Mo Jeong*** / Kyung-Mi Lee****

Tae-Kyu Kim***** / Tay-Gyoon Kang***** / Young-Han You*****†

요지 : 우리나라 참나무 중 하천변 잠재자연식생인 졸참나무와 갈참나무가 CO₂농도와 온도상승 조건에서, 광 처리에 따른 생육반응의 변화를 알아보았다. 그 결과, 대조구(AC-AT)와 처리구(EC-ET)에서 두 종의 생육반응은 광에 의해 영향을 받았다. 졸참나무와 갈참나무의 지상부, 지하부, 식물체 생물량 그리고 지하부/지상부 비는 대조구와 처리구에서 광이 가장 많을 때 높았다. CO₂농도와 온도증가는 두 종의 식물체 생물량과 지하부/지상부 비에 영향을 미치지 않았다. 그러나 두 종의 지상부 생물량은 CO₂농도와 온도가 증가했을 때 감소하였다. 졸참나무의 지하부 생물량은 광 70% 이상에서 대조구보다 CO₂+ 온도상승구에서 낮았다. 이를 종합해보면, 두 종은 CO₂+ 온도상승구에서 광이 증가함에 따라 뿌리의 발달을 촉진시켰으며, CO₂농도와 온도가 증가하였을 때 지상부 생육에는 부정적인 영향을 미친 것으로 나타났다. 주성분분석 결과 두 종은 대조구와 CO₂+ 온도상승구에서 다소 배열 차이가 있었으나, 두 종간에서 더욱 명확히 구별되었다. 이러한 반응은 축1과 축2에 의존하는 모든 기능이 줄기와 지상부 길이를 제외하고는 식물체의 여러 다양한 형질이 종합적으로 관여하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 잠재자연식생, 생육반응, 생물량, CO₂농도, 주성분분석

Abstract : This study was conducted in order to determine changes in the growth responses of *Quercus serrata* and *Q. aliena* which are potential natural vegetation of riverine in Korea under four light gradients within ambient and elevated CO₂ concentration and temperature levels. As a result, growth responses of two species were affected by light factor. Aboveground, belowground, plant biomass and root:shoot ratio of two species grown under the control and treatment were increased in the highest light level. Plant biomass and root:shoot ratio of two oak species were not significantly affected by elevated CO₂ and temperature, while aboveground biomass of them was lower in the treatment than control. Belowground biomass of *Q. serrata* was lower in the treatment than control under the gradients that are more than 70% of light level. As light intensity increases, elevated CO₂ and temperature promoted root growth of two oak species but had a negative effect on aboveground growth. According to the principal component analysis(PCA), two oak species were discriminatively arranged based on factor 1 and 2. Also, the reactions towards the ambient and elevated CO₂ and temperature were slightly different. It is clearly visible that all features relied on axis 1 and axis II are highly correlated with most variables except for stem and shoot length.

keywords : potential natural vegetation, growth response, biomass, CO₂ concentration, principal component analysis(PCA)

† Corresponding author : youeco21@kongju.ac.kr

* 공주대학교 생물학과 Graduate School Dept. of Biology, Kongju National University
** 공주대학교 생물학과 Graduate School Dept. of Biology, Kongju National University
*** 공주대학교 생물학과 Graduate School Dept. of Biology, Kongju National University
**** 공주대학교 생물학과 Graduate School Dept. of Biology, Kongju National University
***** 국립환경과학원 자연평가연구팀 Ecosystem Assessment Team, National Institute of Environmental Reaserch
***** 공주대학교 생명공학연구소 Kongju National University
***** 공주대학교 생명과학과 Dept. of Biology, Kongju National University

1. 서 론

줄참나무(*Quercus serrata*)와 갈참나무(*Q. aliena*)는 지하수위보다 위쪽으로 뿌리를 뺀는 경목대에 생육하는 종으로서 우리나라 자연형 하천변에 높은 빈도로 분포하는 잠재자연식생이며(김성봉 2008, 김혜주 등 2008), 습한 저지대의 토양적 극상종이다(송민섭 2007, 이미정 2007). 또한 두 종은 광릉과 같은 숲에서는 우점군락으로 인접하여 함께 출현한다(유영한 등 1995).

최근에 지구는 CO₂농도가 급격히 증가하고 기온을 빠르게 상승시키고 있으며(Korea Meteorological Administration 2008), 근년에 들어 상승이 가속화되고 있다(IPCC 2007). 공기 중의 CO₂농도는 식물의 기본적인 생리활동인 광합성에 이용되는 원료이다. 공기 중의 CO₂농도가 높을수록 잎 속으로 CO₂ 확산속도가 커지고 이용이 높아져 광합성 속도가 증대된다(Park 2003). CO₂농도의 증가가 식물의 성장을 증진시키는 것을 CO₂시비효과(CO₂-fertilization effect)라 부른다(Park 1993, Park 2003). 그러나 CO₂농도가 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).

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(변무섭 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 CO₂농도와 온도가 증가하면 식물은 지상부보다 지하부의 물질분배에 더 투자한다(Rogers

and Runion 1994, Crookshanks *et al.* 1998). 또한, 비엽면적과 광합성량을 증가시키며(Onoda *et al.* 2009), 수분이용효율(Water Ues Efficiency, WUE)을 향상시킨다. 식물마다 종 특이성을 갖고 있기 때문에 CO₂농도와 온도에 따른 식물의 성장 특성의 영향은 다양하며 복합적으로 이루어진다(Kim and Kang 2003).

지구온난화에 따른 식물의 반응을 정확하게 예측하기 위해서는 CO₂농도와 온도뿐만 아니라 다른 환경요인들이 고려되어야 한다. 국내에서 환경구배 처리에 따른 참나무류의 생육에 관한 연구는 최근에 많이 진행되었으나(변무섭 2000, 이상경 2010, 임훈 2012, 정중규 2010, 정현모 2009), 지구온난화 조건인 CO₂농도와 온도 상승에 따른 생육반응에 관한 연구는 소수에 불과하여 여러 가지 환경요인에 의한 상호작용을 이해하는데 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구는 우리나라 참나무 중 잠재자연하천 식생의 고목층에 높은 빈도로 분포하는 줄참나무와 갈참나무를 대상으로 대기 중의 CO₂농도와 기온이 증가할 때 식물의 생육에 중요한 요소인 광 구배에 따른 상호작용에 의해 지하부와 지상부의 생육반응이 어떻게 일어나는지 알아보고자 시도하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 종자 선정 및 파종

실험에 사용한 유식물은 국내에서 자생하는 줄참나무(*Q. serrata*)와 갈참나무(*Q. aliena*) 종자를 받아서 사용하였다. 종자는 충남 공주시 신관동 인근 야산에서 2009년 10월에 채집하여 4℃ 냉장 보관 후, 2010년 4월에 크기가 유사한 종자를 선별하여 파종하였다. 파종은 지름 24cm, 높이 23.5cm인 화분을 사용하였다.

2.2. 환경요인 처리

지구온난화의 핵심 요소인 CO₂농도와 온도를 조합하여 유리온실 내에서 대조구(AC-AT, ambient

CO₂-ambient temperature)와 CO₂+ 온도상승구(EC-ET, elevated CO₂-elevated temperature)를 처리하였다. 대조구는 대기 중의 CO₂농도와 온도를 그대로 반영 하였으며, CO₂+ 온도상승구는 대조구보다 CO₂농도를 약 2배 높게 처리하였으며, 온도는 +2.5℃ 높았다.

이산화탄소농도 처리는 CO₂가스통 2개를 설치한 뒤, 각각 지름 0.2mm인 호스를 연결하여 CO₂ 가스를 24시간 주입하였고, 처리구 내 설치된 CO₂ 센서(TEL-7001, Onset computer, USA)를 통해 농도변화를 모니터링한 뒤, Gas regulator로 조절하여 대기 중 CO₂농도의 약 2배인 750~800ppm으로 유지시켰다. 온도는 대조구와 CO₂+ 온도상승구에 각각 데이터로거(TR-71U, T&D, Nagano, Japan)를 설치하여 30분 간격으로 자동

측정하였다.

광 구배는 온실에 입사되는 전 일광을 차광막의 두께를 조절하여 10%(L1, 76.8±2.16 μmol m⁻²s⁻¹), 30%(L2, 236.42±32.15 μmol m⁻²s⁻¹), 70%(L3, 539.21±54.66 μmol m⁻²s⁻¹), 100%(L4, 787.75±77.76 μmol m⁻²s⁻¹)로 각각 대조구와 CO₂+ 온도상승구에 처리하였으며, 이때 광도는 광합성측정기(LCI Ultra Compact Photosynthesis System. ADC 2005)로 측정하였다. 나머지 환경요인인 수분과 유기물은 모두 동일하게 처리하였다. 수분공급은 3~4일 간격으로 처리하였다. 이때 사용할 물은 수돗물을 받아서 안정화 시킨 후 사용하였다. 토양은 동일 입자크기의 모래를 사용하였고, 유기물은 토양무게의 0.5%로 처리하였다.

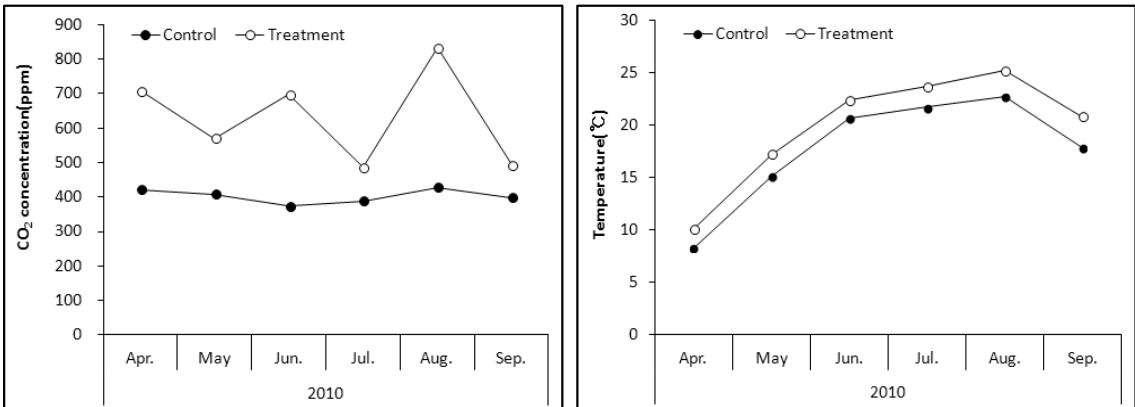


Fig. 1. Average monthly CO₂ concentration and temperature in control(AC-AT, ambient CO₂-ambient temperature) and treatment(EC-ET, elevated CO₂-elevated temperature).

2.3. 수확 및 측정

각 유식물은 2010년 4월에 파종한 뒤 180일 이후인 9월에 수확하였다. 유식물의 지하부는 화분에서 꺼낸 후 물로 세척하여 흙을 완전히 제거하였으며, 70℃ 건조기에서 48시간 건조시켜 전자저울(UX400H)을 이용하여 건조량을 측정하였다. 측정항목은 지상부(줄기+가지+잎) 무게(g), 지하부(뿌리) 무게(g), 식물체(지상부+지하부) 무게(g)로 하였다.

2.4. 통계 분석

각 환경 구배에 따른 줄참나무와 갈참나무 생육반응의 종내 변이를 조사하기 위해 각 형질별 일원분산분석(one-way ANOVA)을 실시하여 포스트 후 검정에 의해 평균치의 피서 최소 유의차 범위를 계산하여 구배 별 차이의 유의성을 검정하였다. 그리고 두 종의 생육반응에 대한 CO₂ 농도 증가와 온도상승 및 광 그리고 그들의 상호작용의 영향을 알아보기 위해 다변량분산분석(MANOVA)

을 실시하였다.

환경요인에 따른 두 종의 전체적인 분포상태를 밝히기 위해 형질의 평균치를 상관계수로 이용하여 주성분분석(PCA)으로 배열하였다. 이상의 통계학적 분석은 Statistica 8 통계패키지(Statsoft Co. 2008)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

졸참나무와 갈참나무의 생육반응은 광에 의해 영향을 받았다(Table 1). 대조구에서 졸참나무의 지상부생물량은 L4에서 가장 높았으며, L3 이하에서는 구배 간 차이가 없었다. 반면, CO₂+ 온도 상승구에서는 L4에서 가장 높았으며, L1에서 가장 낮았다. 갈참나무의 지상부 생물량은 대조구와 CO₂+ 온도상승구에서 모두 광이 높아질수록 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2a).

두 종의 지하부와 식물체생물량은 대조구와 CO₂+ 온도상승구에서 모두 광이 높아질수록 증가하였다(Fig. 2b, 2c). 대조구에서 졸참나무의 지하부와 식물체생물량은 L4에서 가장 높았고, L1에서 가장 낮았다. 반면, CO₂+ 온도상승구에서는 L4에서 높았으며, L3 이하에서는 구배 간 차이가 없었다. 갈참나무의 경우, 대조구에서 지하부와 식물체생물량은 L4에서 가장 높았으며, L3 이하

에서는 차이가 없었다. 그러나 처리구에서는 L4에서 가장 높았고, L2와 L1에서 가장 낮았다.

대조구에서 졸참나무의 지하부:지상부 비는 L4에서 4.58±2.08로 가장 높았으며, L1에서 1.46±0.55로 가장 낮았다(Fig. 2d). 반면, CO₂+ 온도상승구에서는 L4에서 4.37±1.37로 가장 높았고, L3 이하 구배에서는 차이가 없었다. 갈참나무의 경우, 대조구에서 지하부:지상부 비는 L4에서 3.56±0.69로 높았고, L3 이하에서는 구배 간 차이가 없었다. 그리고 처리구에서는 L4에서 가장 높은 반면, L2와 L1에서 가장 낮았다.

CO₂농도와 온도 상승 조건에서 광에 따른 두 종의 생육반응을 비교한 결과, 두 종의 지상부생물량은 광 뿐만 아니라 CO₂농도와 온도 상승 및 그 들의 상호작용에 의해 영향을 받았다(Table 1, 2). 졸참나무는 L2를 제외하고, 나머지 광 구배에서 CO₂농도와 온도가 증가함에 따라 지상부 생물량이 감소하였고, 갈참나무는 모든 구배에서 CO₂농도와 온도 상승에 의해 지상부 생물량이 감소하였다(Fig. 2a). 이러한 감소량은 광이 높을수록 더 큰 차이를 보였다. 광이 가장 낮은 L1에서 갈참나무의 지상부생물량은 CO₂농도와 온도상승에 의해 39.7% 감소한 반면, 광이 가장 높은 L4에서는 50.9% 크게 감소하였다. 이는 졸참나무의 경우에도 같은 반응을 보였다.

Table 1. Results of MANOVA in effects of shoot biomass, root biomass, total biomass and root:shoot ratio of *Quercus serrata* and *Q. aliena* by elevated CO₂+T, light and their interactions. Probabilities less than 0.05 are statistically significant.

Factors	Shoot biomass		Root biomass		Plant biomass		R:S ratio	
	F	P	F	P	F	P	F	P
<i>Q. serrata</i>								
CO ₂ + T(C)	35.319	< 0.000	8.524	< 0.005	3.555	ns	0.237	ns
Light(L)	11.104	< 0.000	24.419	< 0.000	25.789	< 0.000	12.109	< 0.000
C*L	3.125	< 0.034	4.401	< 0.008	3.986	< 0.013	0.575	ns
<i>Q. aliena</i>								
CO ₂ + T(C)	38.530	< 0.000	4.024	ns	3.242	ns	60.688	< 0.000
Light(L)	8.634	< 0.000	47.570	< 0.000	43.409	< 0.000	36.198	< 0.000
C*L	1.800	ns	0.820	ns	0.727	ns	8.926	< 0.000

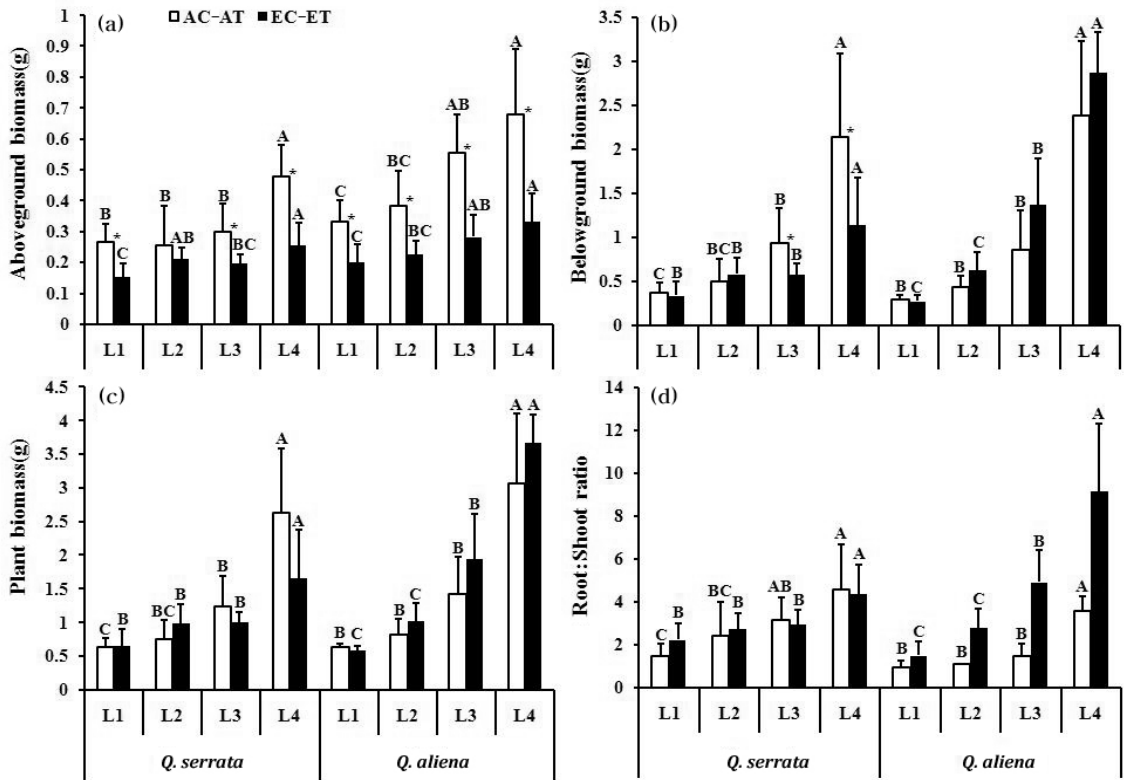


Fig. 2. Aboveground biomass(a), belowground biomass(b), plant biomass(c) and root:shoot ratio(d) of *Quercus serrata* and *Q. aliena* grown in four light gradients under AC-AT(ambient CO₂-ambient temperature) and EC-ET(elevated CO₂-elevated temperature) conditions. Alphabets on the bars mean significantly different between light gradients and star(★) mean significantly different between AC-AT and EC-ET(Fisher's least significant difference, p<0.05).

졸참나무는 광 70% 이상에서 CO₂농도와 온도 상승에 의해 지하부생물량이 감소하였으나, 광 30% 이하에서는 대조구와 CO₂+ 온도상승구 간 차이가 없었다(Fig. 2b). 반면에 모든 광 구배에서 갈참나무의 지하부 생물량은 CO₂농도와 온도증가에 의해 영향을 받지 않았다(Fig. 2b, Table 1). 그리고 두 종의 식물체 생물량 역시 대조구와 CO₂농도+ 온도상승구 간 차이가 없었다(Fig. 2c, Table 1).

졸참나무의 지하부:지상부 비는 광이 가장 낮은 L1에서 CO₂농도와 온도상승에 따라 증가한 반면, 광 30% 이상인 구배에서는 대조구와 CO₂+ 온도

상승구 간 차이가 없었다. 갈참나무의 경우, 지하부:지상부 비는 L1을 제외하고, 나머지 광 구배에서 CO₂농도와 온도상승에 따라 크게 증가하였다.

종합해보면, 두 종은 대조구와 CO₂+ 온도상승구에서 광이 증가함에 따라 식물체와 뿌리의 발달을 촉진시켰다. 이는 광이 높을 때 졸참나무와 갈참나무 유식물의 식물체와 지하부 생물량이 높고(임훈 2012), 뿌리의 발달이 광도에 비례하며(변무섭 2000), 지구온난화조건에서 목본의 지하부 길이와 무게가 증가한(Crookshanks *et al.* 1998) 결과와 같았다. 그러나 CO₂농도와 온도가 증가하였을 때 지상부 생육에는 부정적인 영향을 미친

것으로 나타났다. 이는 소나무(*Pinus densiflora*) 묘목의 지상부 길이가 2배 높은 CO₂ 처리구(CO₂ 농도 760ppm)에서 생장률이 30% 이상 크게 감소한 김성현 등(2006)의 결과와 같았다. 반면 미국의 Duke forest에서 장기적으로 CO₂ 농도를 높게 처리했을 때 침엽성 종들과 낙엽성 종들의 지상부 생장량이 증가한 Saxe *et al.*(1998)의 결과와는 상반되었다. CO₂+ 온도상승구에서 졸참나무는 광이 높은 환경에서 갈참나무보다 지하부 생육

이 낮은 것으로 나타났다. 졸참나무는 갈참나무보다 내음성이 커 광이 부족한 환경에서 생장에 유리하다(임훈 2012). 김선희 등(2008)에 의하면 굴참나무, 신갈나무, 상수리나무의 탄소고정율은 전광처리구보다 피음처리구에서 낮고, 졸참나무의 탄소고정율은 전광처리구보다 피음처리구(70%)에서 1.7배 높게 나타난 바 있다. 결과적으로 졸참나무가 광이 높은 환경에서 수분 및 영양소 등 자원획득 경쟁에서 불리해질 것으로 판단된다.

Table 2. Results of MANOVA in effects of shoot biomass, root biomass, total biomass and root:shoot ratio of *Quercus serrata* and *Q. aliena* by elevated CO₂+T, light, species and their interactions. Probabilities less than 0.05 are statistically significant.

Factors	Shoot biomass		Root biomass		Plant biomass		R:S ratio	
	F	P	F	P	F	P	F	P
CO ₂ + T(C)	80.384	< 0.000	0.041	ns	0.158	ns	37.566	< 0.000
Light(L)	19.188	< 0.000	73.689	< 0.000	73.310	< 0.000	45.521	< 0.000
Species(S)	61.653	< 0.000	12.096	< 0.001	17.804	< 0.000	0.659	ns
C × L	4.096	< 0.009	0.837	ns	0.651	ns	3.262	< 0.026
C × S	7.531	< 0.007	11.666	< 0.001	6.961	< 0.010	30.218	< 0.000
L × S	2.148	ns	6.618	< 0.000	7.056	< 0.000	5.441	< 0.002
C × L × S	0.778	ns	3.487	< 0.019	3.107	< 0.031	7.236	< 0.000

졸참나무와 갈참나무의 15가지 생육형질을 이용한 주성분분석(PCA)에서 요인 1과 요인 2에 의해 두 종은 대조구(AC-AT)와 CO₂+ 온도상승구(EC-ET)에서 다소 배열차이가 있었으나, 두 종간에서 더욱 명확히 구별되었다(Fig. 3). 이는 다변량 분산분석(MANOVA) 결과(Table 1, 2)와 같이 졸참나무와 갈참나무가 CO₂농도 증가 및 온도상승보다 광에 의한 생육반응이 크다는 것을 반영한다.

이러한 졸참나무와 갈참나무의 배열법 상의 분포유형에 미치는 식물체의 형질은 줄기 길이와 지상부 길이(r<0.5)를 제외한 잎 폭, 잎 길이, 잎자루 길이, 잎 넓이, 줄기 직경, 뿌리 길이, 잎 무게, 잎자루 무게, 잎 무게, 줄기 무게, 지상부 무게, 뿌리 무게와 식물체 무게의 총 13가지로 다양하

였다(Table 3). 이 결과는 김해란 등(2008)과 정중규 등(2010)의 연구결과와 마찬가지로 실험 중 및 생육환경에 따라 배열법 상의 분포유형에 미치는 식물체의 형질에는 다소 차이가 있으나, 두 종의 생태학적 반응이 어떤 핵심적인 소수의 형질에 의한 것이 아니라 식물체의 여러 다양한 형질이 종합적으로 관여하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 지구온난화 진행시 광 구배에 따른 생육반응을 연구하였으나, 수목의 생육에 결정적인 역할을 하는 요인은 광, 온도, 수분, 영양소, 이산화탄소 등이 있으므로(Larcher 1994) 광뿐만 아니라 다른 환경요인들을 복합적으로 고려한 연구가 장기적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

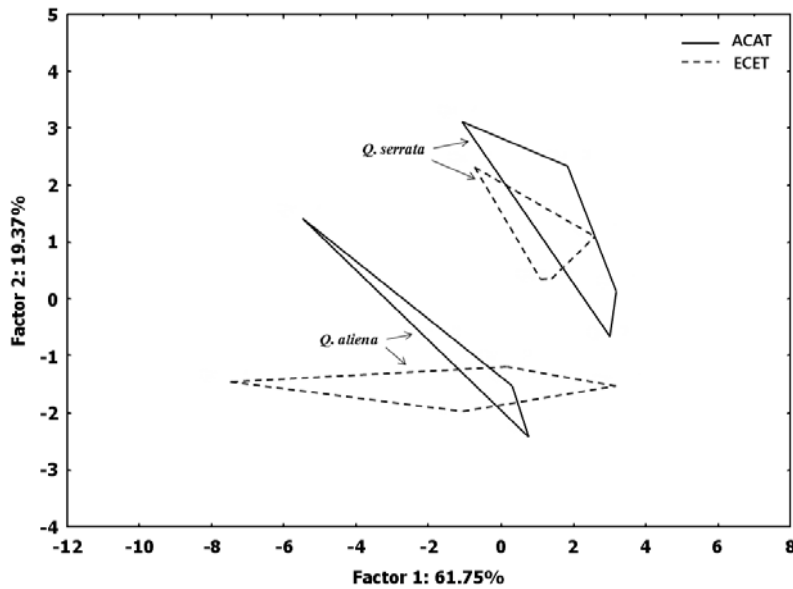


Fig. 3. PCA ordination of 18 individuals of *Quercus serrata* and *Q. aliena* using 15 variables under AC-AT(ambient CO₂-ambient temperature) and EC-ET(elevated CO₂-elevated temperature) conditions.

Table 3. Correlation matrix of 15 variables with the first two principal component scores of PCA analysis.

Variables	Factor	
	I	II
Leaf width length	-0.788	-0.530
Lamina length	-0.786	-0.431
Petiole length	-0.576	-0.466
Leaf area	-0.844	-0.472
Stem diameter	-0.828	0.151
Stem length	0.428	-0.801
Shoot length	0.423	-0.858
Root length	-0.595	0.572
Lamina weight	-0.953	-0.101
Petiole weight	-0.915	-0.231
Leaves weight	-0.972	0.097
Stem weight	-0.926	-0.143
Shoot weight	-0.631	0.181
Root weight	-0.887	0.288
Total weight	-0.919	0.248
Variance explained(%)	61.75	19.37

감사의 글

본 논문은 환경부의 국가장기생태연구사업 (2009-2012)에 의하여 수행되었음에 감사를 드립니다.

참고 문헌

김선희, 성주한, 김영걸, 김판기. 2008. 광환경 변화에 대한 참나무 수종의 광합성 반응. 한국농림기상학회지 10(4): 141-148.

김성봉. 2008. 습지와 환경자원. 월인출판사. pp 61-83.

김성현, 홍선화, 강호정, 류희옥, 이상돈, 조경숙, 이인숙. 2006. 소나무 묘목의 생장에 미치는 납과 CO₂의 영향. 한국생태학회지 29(6): 559-563.

김해란, 유영한. 2010. CO₂농도와 온도증가에 따른 한국특산식물 섬자리공과 귀화식물 미국자리공의 발아, 식물계절 및 잎의 형태학적 반응

- 연구. 한국환경생태학회지 24(1): 62-68.
- 김해란, 정현모, 김혜주, 유영한. 2008. 상수리나무와 굴참나무의 생태적 지위에 관한 연구. 환경생물학회지 26(4): 385-391.
- 김혜주, 신범균, 유영한, 김창환. 2008. 홍수터복원을 위한 국내 현재잠재자연하천 식생에 관한 연구. 한국환경생태학회지 22(5): 564-594.
- 박병현. 2003. 환경구배에 따른 초본 4종의 생태적 지위에 관한 연구. 석사학위논문, 서원대학교. pp 1-13.
- 변무섭. 2000. 광도와 토양수분 구배에 따른 참나무류 치수의 발아 및 성장. 한국농림기상학회지 2(4): 183-189.
- 신동훈, 김해란, 유영한. 2012. CO₂농도 및 온도 증가가 한국특산식물 섬자리공의 식물계절학 및 번식생태학적 특성 변화에 미치는 영향. 한국습지학회지 14(1): 1-9.
- 송민섭. 2007. 한국 상수리나무(*Quercus acutissima*)림의 분포와 군집구조 분석. 박사학위논문, 창원대학교. pp 105-110.
- 이미정. 2007. 우리나라 주요 참나무림의 군락구조분석 및 생태적 식재모델연구. 박사학위논문, 충남대학교. pp 188.
- 이상경, 유영한, 이훈복. 2010. 환경구배 처리에 따른 떡갈나무의 생육 반응. 생명과학회지 20(4): 597-601.
- 이호종, 유영한. 2009. 세가지 환경구배에 따른 신갈나무의 생태적 지위폭과 상수리나무, 굴참나무와의 생태적 중복역. 환경생물학회지 27(2): 191-197.
- 임훈, 김해란, 유영한. 2012. 광, 수분, 영양소에 따른 졸참나무와 갈참나무 유식물의 생육 차이. 한국습지학회지 14(2): 237-242.
- 유영한, 지광재, 한동욱, 광영세, 김준호. 1995. 광릉내 용암산 식물군집의 천이와 이질성. 한국생태학회지 18(1):89-97.
- 정중규, 김해란, 유영한. 2010. 지구온난화에 따른 상수리나무와 굴참나무의 생육반응에 관한 연구. 한국환경생태학회지 24(6): 648-656.
- 정현모, 김해란, 유영한. 2009. 환경구배치리에 따른 상수리나무, 굴참나무와 신갈나무의 생육차이. 환경생물학회지 27(1): 82-87.
- 한영섭, 김해란, 유영한. 2012. CO₂농도와 온도 상승이 멸종위기식물 단양쭈부쟁이의 종생태적 반응에 미치는 영향. 한국습지학회지 14(2): 169-180.
- Beranacchi CJ, Coleman JS, Bazzaz FA, McConnaughay KDM. 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, Taylor G, Broadmeadow M. 1998. Elevated CO₂ and tree root growth: contrasting responses in *Fraxinus escelsior*, *Quercus petraea* and *pinus sylvestris*. New Phytol 138: 241-250.
- Garbutt K, Bazzaz FA. 1984. The effects of elevated CO₂ on plant. III. Flower, fruit and seed production and abortion. New Phytologist 98(4): 433-446.
- Idso KE, Idso SB. 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 SB, Kimball BA. 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. pp 176.
- Kim CM, Kwon KW, Moon HK. 1985. Variation of leaf form of leaf vaibilities

- of natural population of *Quercus* spp. Korean J. For. Soc. 71: 82-89.
- Kim HR and You YH. 2010. Effects of elevated CO₂ concentration and increased temperature on leaf related-physiological responses of *Phytolacca insularis*(native species) and *Phytolacca americana*(invasive species). The Ecological Society of Korea 33(3): 195-204.
- Kim PG, Lee EJ. 2001. Ecophysiology of photosynthesis 2: Adaptation of photosynthetic apparatus to changing environment. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 3(3): 171-176.
- Kim YS, Kang HJ. 2003. Effects of elevated atmospheric CO₂ on wetland plants: a review. Korean J. Limnol 36(4): 391-402.(in Korean with English abstract)
- Kobayashi N. 2006. Global Warming and Forest Business(3th ed.). Bomoondang, Seoul. pp 268.
- Korea Meterological Adminstration. 2008. Report of Global Atmosphere Watch 2008. Seoul, Korea. pp 177 (in Korean).
- Larcher W. 1994. Ökophysiologie der Pflanzen. Verlag, Ulmer, Stuttgart. pp 393
- Lee SH, You YH. 2012. Measurement of ecological niche of *Quercus aliena* and *Q. serrata* under environmental factors treatments and its meaning to ecological distribution. The Ecological Society of Korea 35(3): 227-234.
- Onoda Y, Hirose T, Hikosaka K. 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 HR. 2003. Global warming and its effects and preventive. Uyoug, Seoul, pp 285.
- Park WK. 1993. Increasing atmospheric carbon dioxide and growth trends of korean subalpine conifers Jour. Korean For. Soc. 82(1): 17-25.
- Rogers HH, Runion GB. 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. Environmental Pollution 83: 155-189.
- Saxe H, Ellsworth DS, Heath J. 1998. Tansley review No.98 Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. New Phytol 139: 359-436.

- 논문접수일 : 2012년 08월 21일
- 심사의뢰일 : 2012년 08월 26일
- 심사완료일 : 2012년 10월 31일