

CO₂ 농도 및 온도 상승에 의한 졸참나무의 생태적 지위 변화

조규태* · 정현모¹ · 한영섭² · 이승혁²

서원대학교 생물교육과, ¹국립생태원 생태적응연구팀, ²국립생태원 자연환경조사팀

Variation of Ecological Niche of *Quercus serrata* under Elevated CO₂ Concentration and Temperature

Kyu-Tae Cho*, Heon-Mo Jeong¹, Young-Sub Han² and Seung-Hyuk Lee²

Department of Biology Education, Seowon University, Cheongju 361-742, Korea

¹Ecological Adaptation Research Team, National Institute of Ecology, Seocheon 325-813, Korea

²Ecological Monitoring Research Team, National Institute of Ecology, Seocheon 325-813, Korea

Abstract - In order to investigate effects of elevated CO₂ concentration and temperature on the ecological niche of *Quercus serrata* in Korea. We divided experimental condition in the greenhouse that are control (ambient condition) and treatment with elevated CO₂ (approximately 1.6 above than control) and increased air temperature (approximately 2.2°C above than control). We measured twenty kind characters of seedlings and calculated the ecological niche breadth. As a result, the ecological niche breadth, treatment was widened in the light gradient than the control, was narrowed in the moisture and nutrient gradient. This is may be predicted when the global warming progress, *Q. serrata* is increases resistance to light environment, and decrease resistance to moisture and nutrient environment. According to the principal component analysis (PCA), control and treatment were arranged based on factor 1 and 2 in each environment gradients. Ecological response is involved variety characters. Among them, indicating that Characters of production is involved in many a parts.

Key words : ecological niche, CO₂ concentration, treatment, global warming

서 론

생태적 지위 (ecological niche)는 생물이 서식지를 차지하는 공간뿐만 아니라 군집 내에서 영위하는 고유한 기능, 즉 먹이사슬 상의 위치, 환경 구배 상의 기능을 말한다 (Odum 1969). 생태적 지위폭 (ecological niche breadth)은 한 종이 자연에서 차지하는 고유한 척도로서 최저와

최고 내성 한계 사이의 폭, 즉 내성의 범위를 말하는데 (Pianka 1983), 생물종 또는 환경요인에 따라 다르게 나타나며, 생태적 지위폭이 넓으면 그 환경요인에 대한 내성이 크고, 좁으면 내성이 작다 (Yeocheon Ecological Research Society 2005). 생태적 지위폭은 학자들마다 형질이 다르게 나타날 수 있고, 환경구배에 따른 각 형질의 평균치를 가지고 계산되어 질 수 있으며, 종의 천이계열을 밝히는 데 이용되고 있다 (Park 2003). 이러한 생태적 지위는 생물다양성 유지를 위해 중요하다 (Levine and HilleRisLambers 2009). 생태적 지위의 변화는 토양 함수

*Corresponding author: Kyu-Tae Cho, Tel. 043-299-8400, Fax. 043-299-8400, E-mail. gtcho@hanmail.net

량 구배에 따른 종간의 경쟁을 피하기 위해 생장 및 생식생장의 차이로 나타난다(Kim 1995).

공기 중의 CO₂ 농도는 식물의 기본적인 생리활동인 광합성에 이용되는 원료로써 CO₂ 농도가 높을수록 잎속으로 CO₂ 농도 확산속도가 커지고 이용률이 높아져 광합성 속도가 증대된다(Park 2003). 일반적으로 CO₂ 농도와 온도가 증가하면 식물은 비엽면적과 광합성량을 증가시키고 수분이용효율(water use efficiency, WUE)을 향상시킨다(Onoda *et al.* 2009). 또한 물질분배는 지상부보다 지하부에 더 많이 투자한다(Rogers and Runion 1994; Crookshanks *et al.* 1998). CO₂ 농도와 온도에 따른 식물의 영향은 식물마다 종 특이성을 갖고 있기 때문에 다양하고 복합적으로 이루어진다(Kim and Kang 2003).

CO₂ 농도는 지구온난화의 가장 큰 원인으로(Kobayashi 2006), 근년에 들어 CO₂ 농도와 기온이 빠르게 가속화되고 있다(IPCC 2007). 우리나라는 2006년에 CO₂ 농도가 388.9 ppm으로 보고되었고(You 2010), 서울 등 6개 도시의 지난 97년간(1912~2009) 평균 기온 상승률은 1.7°C로 전 지구적인 온난화 추세보다 빠르게 나타났다(Korea Meteorological Administration 2008). 이러한 CO₂ 농도와 온도의 상승은 식물의 생장뿐만 아니라 생태적 지위에도 영향을 주는 요인이라 생각된다.

생태적 지위에 관한 연구는 외국의 경우 1980년대에 최고조에 달했고, 최근에는 감소하는 추세이다(Chase and Leibold 2003), 그러나, 국내에는 생태적 지위에 관한 연구가 소수에 불과하며, 특히 CO₂ 농도와 온도의 상승에 따른 생태적 지위의 변화에 관한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서, 본 연구는 한반도의 남부지방에서 숲 천이의 극상종으로 인식되고(Song 2008), 뿌리가 지하수위보다 위쪽으로 뻗는 경목대에 생육하는 하천변 잠재자연식생이며(Kim 2008; Kim *et al.* 2008), 주요 우점종에 해당되

는 낙엽성 참나무인 졸참나무(*Quercus serrata*)를 대상으로 지구온난화의 핵심 요소인 CO₂ 농도와 온도를 상승시켰을 때 광, 수분 그리고 영양소 구배에서 생태적 지위가 어떻게 변화하는지 알아보고자 시도하였다.

재료 및 방법

1. 종자 선정 및 파종

실험에 사용한 유식물은 졸참나무(*Quercus serrata*) 종자를 받아서 사용하였다. 종자는 충청남도 공주시 신관동 인근 야산에서 2009년 10월에 채집하여 4°C에 냉장 저장한 후 이듬해인 2010년 4월에 크기가 유사한 종자를 선별하여 각 환경 구배당 4개 화분(지름 24 cm, 높이가 23.5 cm)에 각각 3개체씩 파종하였다.

2. 환경요인 처리

통제가 가능한 유리온실 내에서 대기 중의 CO₂ 농도(평균 386.9±6.1 ppm)를 그대로 반영한 대조구(control)와 지구온난화의 핵심 요소인 CO₂ 농도와 온도를 대조구의 약 1.6배(평균 602.7±64.1 ppm)로 상승시킨 온난화처리구(treatment)로 구분하였다(Fig. 1).

CO₂ 농도 처리는 CO₂ 가스통 2개를 설치한 뒤, 각각 지름 0.2 mm인 호스를 연결하여 CO₂ 가스를 24시간 주입하였고, 온난화처리구 내 설치된 CO₂ 센서(TEL-7001, Onset computer, USA)를 통해 농도변화를 모니터링한 뒤, Gas regulator로 조절하였다.

온도측정은 디지털 데이터 온도계(Thermo recorder TR-71U, Co., Japan)를 설치 후 30분 간격으로 자동 측정하였고, 월별 평균기온을 대조구보다 평균 2.2°C 높게 유지하였다.

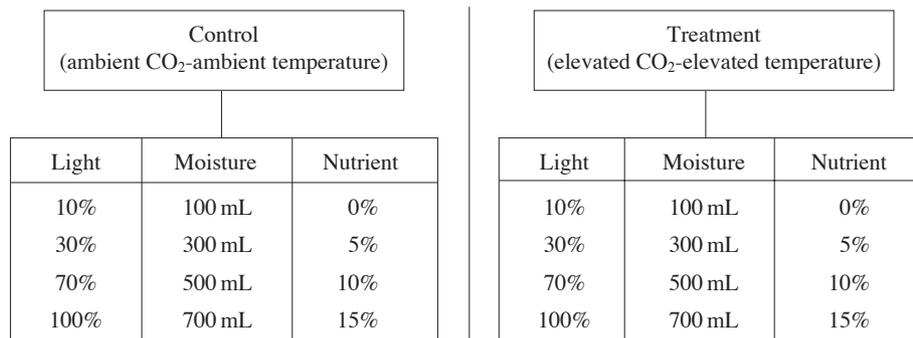


Fig. 1. Designed for the treatment of environmental factors.

1) 광

광 처리는 온실에 입사되는 전 일광을 차광막의 두께를 조절하여 10% (L1, $76.8 \pm 2.16 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 30% (L2, $236.42 \pm 32.15 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 70% (L3, $539.21 \pm 54.66 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 100% (L4, $787.75 \pm 77.76 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)로 처리하였다.

2) 수분

수분 처리는 토양을 채운 화분에 물을 주면서 화분 밑으로 물이 새어나가기 직전까지의 물의 양인 포장용수량 (carrying water capacity) 700 mL (M4)를 최댓값으로 하고, 이보다 적은 100 mL (M1), 300 mL (M2), 500 mL (M3)로 구분하여 물을 공급하였다.

3) 영양소

토양은 동일 입자 크기 (2 mm 이하)의 모래를 사용하였고, 토양의 영양소 처리는 건조한 모래 (100%)를 기준으로 하여 유기물의 비율을 0% (N1), 5% (N2), 10% (N3), 15% (N4)가 되도록 배합하였다.

3. 형질 측정

유식물은 2010년 4월에 파종한 뒤 180일 이후인 9월에 화분에서 꺼낸 후 지하부는 물로 세척하여 흙을 완전히 제거하였으며, 70°C 건조기에서 48시간 건조시켰다.

형질은 총 20개 항목으로 잎 수 (ea), 잎폭 길이 (cm), 잎몸 길이 (cm), 잎자루 길이 (cm), 엽면적 (cm^2), 줄기 길이 (cm), 줄기 직경 (mm), 지상부 길이 (cm), 지하부 길이 (cm), 잎몸 무게 (g), 잎자루 무게 (g), 전체 잎 무게 (g), 줄기 무게 (g), 지상부 무게 (g), 지하부 무게 (g), 식물체 무게 (g)를 측정하였으며 (Fig. 2), 위의 측정값을 이용하여 잎 밀도, 비엽면적, 지하부/지상부 비, 광합성기관 투자비를 산출하였다. 잎폭 길이, 잎몸 길이, 엽면적은 엽면적계 (SI700, Skye)를 이용하였고, 건중량은 전자저울 (UX400H)을 이용하였으며, 길이는 vernier calipers (CD-15CPX, Mitutoyo Corp.)를 이용하여 측정하였다.

4. 생태적 지위폭 계산

생태적 지위폭은 대조구와 온난화처리구의 각 환경구배에서 나타난 20가지 형질의 평균치를 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 gra-

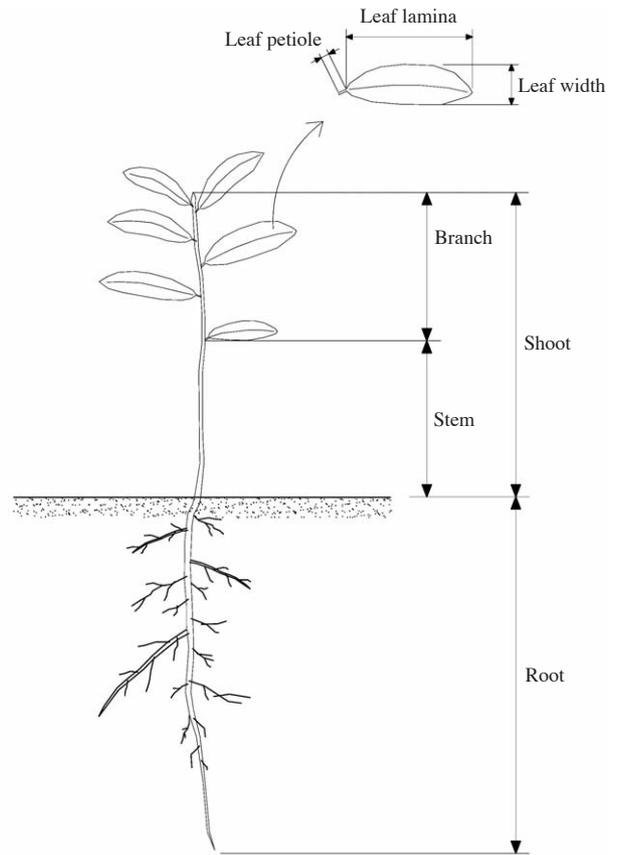


Fig. 2. Schematic diagram for classification of ecological and morphological character.

dients that is realized in gradient i

S: total number of gradients

5. 통계처리

대조구와 온난화처리구간의 생태적 지위폭의 변이를 조사하기 위해 Statistica 8 통계패키지 (Statsoft Co. 2008)를 이용하여 형질의 측정치를 상관계수로 이용한 주성분분석 (PCA)으로 배열하였다.

결과 및 고찰

1. 생태적 지위폭

줄참나무의 20가지 형질에 대한 생태적 지위폭의 평균값은 대조구에서 영양소 구배 (0.979) > 수분 구배 (0.977) > 광 구배 (0.895) 순으로 나타났고, 온난화처리구에서도 영양소 구배 (0.982) > 수분 구배 (0.970) > 광 구배 (0.965)

Table 1. Comparison of ecological niche breadth of *Quercus serrata* by each environment (light, moisture, nutrient) under control (ambient CO₂-ambient temperature) and treatment (elevated CO₂-elevated temperature) conditions

Group	Character	Control			Treatment		
		Light	Moisture	Nutrient	Light	Moisture	Nutrient
Vegetative	Leaves number	0.989	0.987	0.994	0.996	0.917	0.976
	Leaf width length	0.999	0.994	0.992	0.995	0.995	0.988
	Leaf lamina length	0.997	0.998	0.998	0.998	0.993	0.997
	Leaf petiole length	0.979	0.987	0.970	0.968	0.974	0.982
	Leaf area	0.996	0.986	0.986	0.988	0.983	0.969
	Leaf density	0.905	0.951	0.979	0.992	0.977	0.976
Leaf feature	Specific leaf area	0.942	0.968	0.999	0.980	0.996	0.994
	Stem length	0.982	0.998	0.994	0.993	0.998	0.994
	Stem diameter	0.955	0.994	0.968	0.971	0.981	0.995
	Shoot length	0.977	0.996	0.993	0.993	0.993	0.997
	Root length	0.989	0.999	0.993	0.995	0.999	0.983
	Root/Shoot ratio	0.862	0.955	0.976	0.921	0.965	0.979
Plant architecture	Photosynthetic investment	0.934	0.977	0.981	0.958	0.927	0.966
	Leaf lamina weight	0.929	0.975	0.993	0.954	0.995	0.954
	Leaf petiole weight	0.993	0.965	0.988	0.992	0.984	0.974
	Leaves weight	0.915	0.964	0.977	0.967	0.907	0.994
	Stem weight	0.927	0.966	0.996	0.965	0.951	0.992
	Shoot weight	0.921	0.976	0.977	0.968	0.951	0.991
Production	Root weight	0.651	0.979	0.972	0.812	0.952	0.965
	Plant weight	0.746	0.985	0.977	0.884	0.959	0.976
	Mean	0.929	0.980	0.985	0.965	0.970	0.982
	S.D.	0.089	0.015	0.010	0.046	0.028	0.012

순으로 나타났다. 생태적 지위폭은 최대값 1을 기준으로 평가한 결과, 대조구에서는 지하부/지상부 비(0.862), 지하부 무게(0.651), 식물체 무게(0.862)를 제외하고 모든 형질이 0.900 이상으로 넓었고, 온난화처리구에서는 지하부 무게(0.812)와 식물체 무게(0.884)를 제외한 모든 형질이 0.900 이상으로 넓었다(Table 1).

졸참나무의 생태적 지위폭은 대조구보다 온난화처리구가 광 구배에서 넓어졌고, 수분과 영양소 구배에서는 좁아졌다. 광 구배에서는 잎 밀도, 지하부/지상부 비, 전체 잎 무게, 지상부 무게, 지하부 무게, 식물체 무게가 5% 이상 넓어졌고, 수분 구배에서는 잎 수, 광합성기관 투자비, 전체 잎 무게가 5% 이상 좁아졌으며, 영양소 구배에서는 모든 형질이 5% 미만으로 변화가 크지 않았다(Fig. 3). 이것은 지구온난화 진행 시 졸참나무는 광 환경에 대한 내성이 증가되어 환경변화에 잘 적응할 수 있어 분포역이 넓고 개체수가 많이 나타날 것이며, 수분과 영양소 환경에 대한 내성이 감소되어 특수한 서식지가 필요하므로 종의 분포역이 한정되고 개체수가 적게 나타날 것으로 예측할 수 있다. 이는 선행된 연구(Cho *et al.* 2013)의 결과에서 CO₂ 농도와 온도 상승 시 상수리나무의 생태적 지위폭이 광 구배에서 증가하고, 수분과 영양소 구

배에서 감소한 결과와 같았고, 굴참나무의 생태적 지위폭이 광, 수분 그리고 영양소 구배에서 감소된 결과와는 차이가 있었다. 또한, 대조구에서 졸참나무의 생태적 지위폭은 상수리나무의 광(0.887)과 영양소(0.969) 구배보다 넓었고, 수분(0.996) 구배보다 좁았으며, 굴참나무의 광(0.831), 수분(0.970) 그리고 영양소(0.942) 구배보다 넓었다(Kim *et al.* 2008).

2. PCA 분석

졸참나무의 20가지 형질을 이용한 주성분분석(PCA) 결과, 대조구와 온난화처리구는 광 구배에서 요인 1(28.81%)과 요인 2(21.44%)에 의해 구별되었고, 수분 구배에서는 요인 1(34.39%)과 요인 2(15.89%)에 의해 구별되었으며, 영양소 구배에서는 요인 1(29.88%)과 요인 2(16.87%)에 의해 구별되었다(Fig. 4). 이는 졸참나무가 대조구와 온난화처리구에 의해 생태적 지위의 차이가 나타난다는 것을 의미한다.

졸참나무의 각 환경 구배별 분포 유형에 미치는 $r > 0.5$ 인 형질은 광 구배에서 비엽면적, 줄기 직경, 지하부 길이, 지하부/지상부 비, 잎몸 무게, 전체 잎 무게, 줄기 무

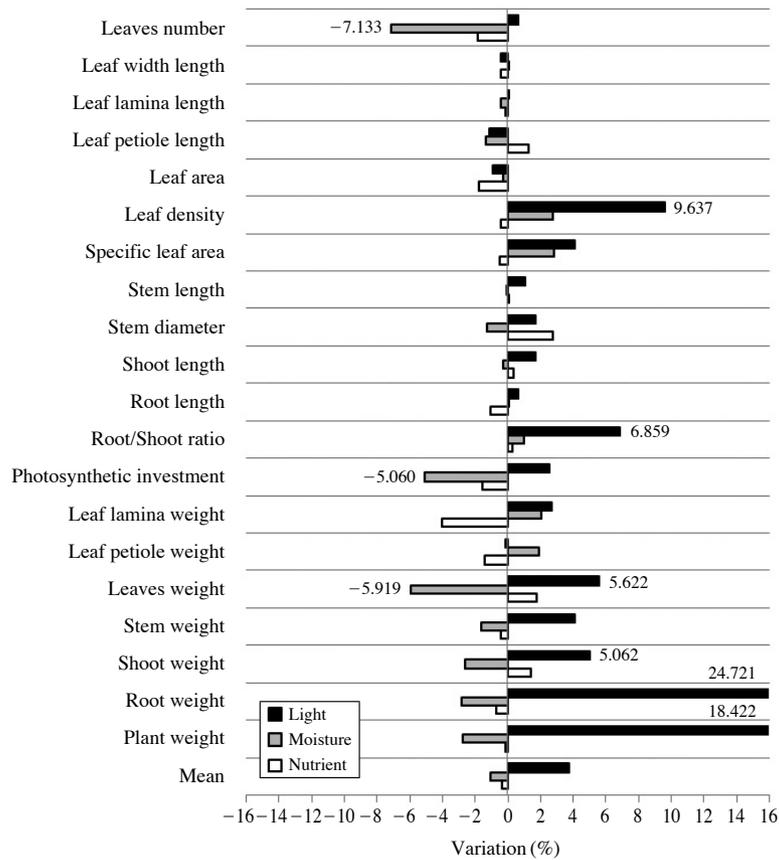


Fig. 3. Variation of treatment on the ecological niche breadth of 20 characters of *Quercus serrata* under each environment (light, moisture, nutrient).

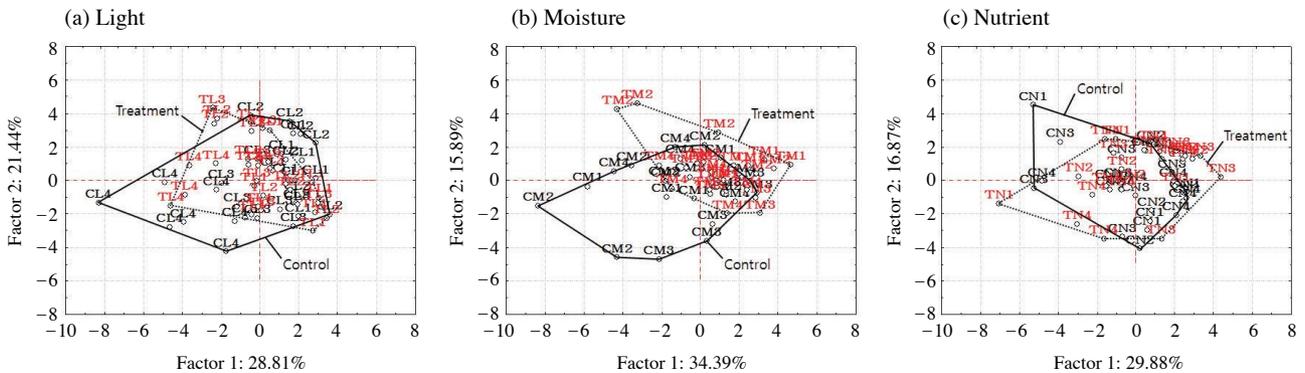


Fig. 4. Principal component analysis ordination of *Quercus serrata* using 20 variables under environmental conditions (a) light, (b) moisture, (c) nutrient.

계, 지상부 무게, 지하부 무게, 식물체 무게 등 10가지 형질이고, 수분 구배에서는 잎폭 길이, 잎몸 길이, 엽면적, 줄기 길이, 지상부 길이, 잎몸 무게, 전체 잎 무게, 줄기 무게, 지상부 무게, 지하부 무게, 식물체 무게 등 11가지

형질이며, 영양소 구배에서는 잎폭 길이, 잎몸 길이, 엽면적, 지상부 길이, 잎몸 무게, 전체 잎 무게, 줄기 무게, 지상부 무게, 지하부 무게, 식물체 무게 등 10가지 형질로 다양하다 (Table 2). 이것으로 볼 때 줄참나무의 생태학적

Table 2. Correlation matrix of 20 variables with the first two principal component scores of PCA analysis of each environmental conditions (light, moisture, nutrient)

Group	Character	Factor					
		Light		Moisture		Nutrient	
		I	II	I	II	I	II
Vegetative	Leaves number	-0.111	-0.128	-0.025	0.641	-0.195	-0.050
Leaf feature	Leaf width length	-0.255	0.727	-0.718	-0.186	-0.606	-0.484
	Leaf lamina length	-0.344	0.821	-0.805	0.082	-0.853	-0.331
	Leaf petiole length	0.046	0.292	-0.205	-0.141	-0.240	-0.547
	Leaf area	-0.331	0.850	-0.835	-0.120	-0.746	-0.478
	Leaf density	-0.230	-0.092	-0.037	-0.452	0.205	-0.121
	Specific leaf area	0.603	0.351	0.225	-0.265	0.180	0.277
Plant architecture	Stem length	0.145	0.703	-0.563	0.271	-0.352	0.357
	Stem diameter	-0.659	-0.078	-0.363	-0.024	-0.247	0.055
	Shoot length	0.213	0.694	-0.527	0.580	-0.612	0.526
	Root length	-0.519	0.100	-0.192	-0.452	-0.077	-0.167
	Root/Shoot ratio	-0.578	0.511	-0.135	-0.774	0.053	0.508
	Photosynthetic investment	0.274	0.474	0.198	0.754	0.061	-0.675
Production	Leaf lamina weight	-0.721	0.531	-0.865	-0.063	-0.734	-0.528
	Leaf petiole weight	-0.177	0.154	-0.482	0.006	-0.429	-0.396
	Leaves weight	-0.776	0.121	-0.660	0.540	-0.836	-0.074
	Stem weight	-0.715	0.324	-0.811	0.122	-0.662	0.435
	Shoot weight	-0.830	0.032	-0.850	0.233	-0.784	0.215
	Root weight	-0.847	-0.366	-0.768	-0.437	-0.695	0.565
	Plant weight	-0.887	-0.299	-0.846	-0.282	-0.791	0.512
	Variance explained (%)	22.81	21.44	34.39	15.89	29.88	16.87

반응은 다양한 형질이 종합적으로 관여하고 있음을 의미하며, 그 중에서 식물의 생산량을 나타내는 형질이 많은 부분 관여하고 있는 것으로 판단된다.

나타내는 형질이 많은 부분 관여하는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 국가장기생태연구사업(2012)에 의하여 지원되었다.

적 요

한반도의 낙엽성 참나무인 졸참나무(*Quercus serrata*)의 생태적 지위폭이 CO₂ 농도와 온도가 상승하였을 때 광, 수분 그리고 영양소 구배에서 어떻게 변화하는지 알아보고자 유리온실에서 대조구와 온난화처리구로 구분하여 재배한 후, 유식물의 20가지 형질을 측정하고 생태적 지위폭을 계산하였다. 그 결과, 생태적 지위폭은 광 구배에서 대조구보다 온난화처리구가 넓어졌고, 수분과 영양소 구배에서는 대조구보다 온난화처리구가 좁아졌다. 이것은 지구온난화 진행 시 졸참나무는 광 환경에 대한 내성이 증가되고, 수분과 영양소 환경에 대한 내성이 감소될 것으로 예측할 수 있다. 주성분분석(PCA) 결과, 각 환경 구배에서 요인 1과 요인 2에 의해 대조구와 온난화처리구가 구분되었다. 생태학적 반응은 다양한 형질이 종합적으로 관여하며, 그 중에서 식물의 생산량을

REFERENCES

- Chase JM and MA Leibold. 2003. Ecological Niches: linking classical and contemporary approaches. The University of Chicago Press, Chicago. pp.2-10.
- Cho KT, RH Jang, SH Lee, YS Han and YH You. 2013. Effects of Elevated CO₂ and Temperature on the Changes of the Ecological Niche of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis*. Korean J. Ecol. Environ. 46:429-439. (in Korean)
- 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.
- 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. pp.176.
- Kim HJ, BK Shin, YH You and CH Kim. 2008. A Study on the Vegetation of the Present-day Potential Natural State of Water for Flood Plain Restoration in South Korea. Korean J. Environ. Ecol. 22:564-594. (in Korean)
- Kim HR, HM Jeong, HJ Kim and YH You. 2008. Ecological Niche of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis*. Korean J. Environ. Biol. 26:385-391.
- Kim JH. 1995. High ecology. Kyomunsa, Seoul. pp.317-384. (in Korean)
- Kim SB. 2008. Wetlands and Environment Resources. Worin Publisher. pp.61-83. (Korean Literature)
- Kim YS and HJ Kang. 2003. Effects of elevated atmospheric CO₂ on wetland plants: a review. Korean J. Limnol. 36:391-402. (in Korean)
- Kobayashi N. 2006. Global Warming and Forest Business (3th ed). Bomoondang, Seoul. pp.268.
- Korea Meterological Administration. 2008. Report of Global Atmosphere Watch 2008. Seoul, Korea. pp.177.
- Levine JM and J HilleRisLambers. 2009. The importance of niches for the maintenance of species diversity. Nature 461: 254-258.
- Levins R. 1968. Evolution in changing environments. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- Odum EP. 1969. The strategy of ecosystem development. Science 164:262-270.
- 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 HR. 2003. Global warming and its effects and preventive. Uyoug, Seoul. pp.285. (Korean Literature)
- Pianka ER. 1983. Evolutionary ecology (3rd ed.). Harper & Row, New york. pp.253.
- Rogers HH and GB Runion. 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. Environ. Pollut. 83:155-189.
- Song MS. 2008. Analysis of distribution and association structure on the Sawtooth Oak (*Quercus acutissima*) Forest in Korea. Ph. D. Dissertation, Changwon National University, pp.105-110 (in Korean)
- Yeocheon Ecological Research Society. 2005. Modern ecological experiments. Kyomunsa, Seoul. pp.239-243 (in Korean)
- You KB. 2010. Geography: a portal to green growth. J. Korean Geo. Soci. 45:11-25. (in Korean).

Received: 25 March 2014

Revised: 3 April 2014

Revision accepted: 14 April 2014