

## 기후변화 조건에서 수분구배 및 영양소 구배에 따른 굴참나무와 상수리나무 잎 형태적 특성의 생태지위 변화\*

박여빈<sup>1)</sup> · 김의주<sup>2)</sup> · 박재훈<sup>2)</sup> · 김윤서<sup>1)</sup> · 박지원<sup>1)</sup> · 이정민<sup>1)</sup> · 유영한<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 국립공주대학교 생명과학과 학생 · <sup>2)</sup> 국립공주대학교 생명과학과 연구원 ·

<sup>3)</sup> 국립공주대학교 생명과학과 교수

## Variations in Ecological Niche of *Quercus variabilis* and *Quercus acutissima* Leaf Morphological Characters in Response to Moisture and Nutrient Gradient Treatments under Climate Change Conditions\*

Park, Yeo-Bin<sup>1)</sup> · Kim, Eui-Joo<sup>2)</sup> · Park, Jae-Hoon<sup>2)</sup> · Kim, Yoon-Seo<sup>1)</sup> · Park, Ji-Won<sup>1)</sup> ·

Lee, Jung-Min<sup>1)</sup> and You, Young-Han<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Life Science, Kongju National University, Student,

<sup>2)</sup> Department of Life Science, Kongju National University, Researcher,

<sup>3)</sup> Department of Life Science, Kongju National University, Professor.

### ABSTRACT

This study attempted to elucidate the ecological niches and influencing environmental factors of *Quercus variabilis* and *Quercus acutissima*, which are representative deciduous broad-leaved trees in Korean forests, taxonomically close and genetically similar, under climate change conditions. Under climate change conditions induced by increased CO<sub>2</sub> and temperature, soil moisture and nutrient environments were manipulated in four gradients. At the end of the growing, plants were harvested to measure growth responses, calculate ecological niches, and compare them with those of the control. Experimental plants were grown for 180 days in a glass greenhouse designed with four gradients each for soil moisture and nutrient environments under climate change conditions induced by increased CO<sub>2</sub> and temperature. After harvesting, growth responses of leaf traits were measured, ecological niches were

\* 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음(2022003630003).

**First author** : Park, Yeo-Bin, Department of Life Science, Kongju National University, Student

Tel : +82-41-850-8508, E-mail : pyb1994@smail.kongju.ac.kr

**Corresponding author** : You, Young-Han, Department of Life Science, Kongju National University, Professor

Tel : +82-41-850-8508, E-mail : youeco21@kongju.ac.kr

**Received** : 1 February, 2024. **Revised** : 6 March, 2024. **Accepted** : 4 March, 2024

calculated, and these were compared with those of the control groups. Furthermore, the responses of the two species' populations were interpreted using principal component analysis(PCA) based on leaf trait measurements. As a result, under climate change conditions, the ecological niche breadth for moisture environment was broader for *Quercus variabilis* than *Quercus acutissima*, whereas for the nutrient environment, *Quercus acutissima* exhibited a broader niche breadth than *Quercus variabilis*. And the rate of change in ecological niche breadth due to climate change decreased for *Quercus variabilis* in both moisture and nutrient environments, while for *Quercus acutissima*, it increased in the moisture environment but decreased in the nutrient environment. Additionally, in terms of group responses, both *Quercus variabilis* and *Quercus acutissima* expanded their ecological niches under climate change conditions in both soil moisture and nutrient conditions, with *Quercus acutissima* exhibiting a broader niche than *Quercus variabilis* under nutrient conditions. These results indicate that the changes in leaf morphological characteristics and the responses of individuals reflecting them vary not only under climate change conditions but also depending on environmental factors.

**Key Words** : *Genetic similarity, Soil factor, Elevated CO<sub>2</sub>, Elevated temperature, PCA*

## I. 서론

생태지위(ecological niche)는 생태계 내의 물리적 공간뿐만 아니라 군집 내에서의 기능적 역할을 포함하는 생존을 위한 모든 환경요인에서 각 생물이 차지하는 위치를 말한다(Whittaker et al., 1973). Hutchinson(1957)은 생태지위를 모든 비생물 환경 인자가 고려된 개념인 기본지위(Fundamental niche)와 다른 생물과 경쟁을 통해 실제로 한 생물이 차지하고 있는 서식지를 의미하는 실현지위(Realized niche)로 나누어 정의하였다. 또한 먹이사슬에서의 위치, 온도, 빛, 수분 등 각각의 생물적 그리고 비생물적 환경 인자를 하나의 차원으로 보고, 생태지위는 다양한 환경 인자 즉, 다차원(multi-dimension)으로 이루어진 공간에 존재한다고 설명하였다. Odum(1969)은 생태지위를 생물의 구조적 적응, 생리적 반응 및 종의 행동 결과로 나타나는 생태계 내에서 그 종이 차지하는 위치와 신분이라고 정의하였다. 그는 서식처와 생태지위를 인간사회에 비유하여 서식처는 주소와 같고, 생태지위는 직업과 같다

며, 생물의 생활 장소뿐만 아니라 역할을 강조하였다.

생태지위폭은 생물의 최저와 최고 내성한계 사이의 폭을 0에서 1까지의 값으로 표현한 것으로, 즉 내성의 범위이다(Pianka 1994). 생물은 그 내성의 범위 내에서 생존은 가능하지만, 그 범위 내에서도 이용도가 불균등하여 결국 자원은 정규분포 곡선을 이룬다. 생태지위폭은 종 또는 환경요인에 따라 다르다. 생태지위폭이 좁은 종은 특수한 서식처가 필요하므로 종의 분포역이 한정되고 개체수가 적으며, 반대로 넓은 종은 환경변화에 잘 적응할 수 있어서 분포역이 넓고 개체수도 많다(Pianka 1994; Lee 1985).

최근 10년간(2011~2020) 전 지구의 온도는 산업화 이전(1850~1900)에 비해 이미 1.09°C 상승했으며, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 지난 2000년부터 10년에 20ppm씩 증가하면서, 2019년에는 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도(410ppm)가 지난 2백만 년 중에 가장 높았다고 보고했다(IPCC, 2023). 이러한 온도의 증가는 식물의 개화기와 결실기를 앞당기기도 하고(Ho et al., 2006; Yun, 2006), 개엽기가

빨라져 생육기간이 길어지게 된다(Myneni et al., 1997; Schaber and Badeck, 2005). 또한 CO<sub>2</sub> 농도는 식물의 기본적인 생리 활동인 광합성의 원료로 사용되기 때문에, 공기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 높을수록 잎 속으로의 CO<sub>2</sub> 확산 속도가 빨라지고 이용이 높아져 광합성 속도가 증대되는 CO<sub>2</sub> 시비효과(CO<sub>2</sub> - fertilization effect)라 부른다(Park, 1993; Park, 2003). 그러나 CO<sub>2</sub> 농도가 증가함에 따라 식물 생산량이 증가하기도 하지만(Saxe et al., 1998; Idso and Idso, 1994) 변화가 없거나(Garbutt and Bazzaz, 1984), 오히려 감소하기도 한다(Idso and Kimball, 1997). 온도와 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 영향은 식물마다 종 특이성을 갖고 있기 때문에 복잡적이고 다양하게 이루어진다(Kim and Kang, 2003). 이러한 CO<sub>2</sub> 농도와 온도의 상승은 식물의 성장뿐만 아니라 개체군의 생태지위에도 영향을 주는 요인이 될 수 있다(Cho et al., 2014).

우리나라 산림의 낙엽활엽수림을 구성하는 대표적인 수종인 참나무속 중 상수리나무(*Quercus acutissima*)와 굴참나무(*Quercus variabilis*)는 다른 낙엽성 참나무 종들보다 분류학적으로 서로 가깝고 유전적 동일성이 높아(Park et al. 2005; Kim, Z. S et al., 1991), 서로 교배가 쉽게 되어 이들 사이의 잡종으로 알려진 정롱참나무(*Quercus acutissima* × *variabilis*)가 이미 보고된 바 있다(Lee 1961, Lee 1986).

굴참나무와 상수리나무는 우리나라 전역에 낮은 해발고도에 분포하며, 미소적으로 살펴보면 굴참나무는 상대적으로 경사가 심하고, 수분이나 유기물이 적은 척박한 건조지에 분포하지만(권순성, 2023; Ryou, 2005; Lee et al., 2002), 그에 비해 상수리나무는 민가 근처 저지대와 같은 수분과 양분이 많은 입지에 분포한다(Song, 2007).

이처럼 유전적으로 가깝지만, 분포 특성이 다른 두 종을 대상으로 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도와 기온이 상승하고 식물의 초기 정착에 핵심적인 환경요인인 토양 수분과 영양소 구배에서 온도와

CO<sub>2</sub> 변화에 밀접한 관련이 있는 잎의 생육 반응을 측정하였다. 그리고 이를 정량화하여 기후변화 조건에서 두 종의 잎의 형태적 특성의 생태지위 변화량을 비교함으로써 가장 많은 영향을 미치는 요소가 어떤 것인지 밝히고자 시도하였다.

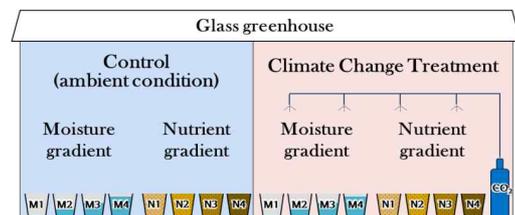
## II. 연구 방법

### 1. 종자 선정 및 파종

실험에는 국내에 자생하고 있는 충청남도 공주시 신관동의 굴참나무(*Q. variabilis*)와 상수리나무(*Q. acutissima*)의 종자를 사용하였다. 모식물의 영향을 최소화하기 위해 각각 하나의 모수에서 10월에 채집하였고, 이를 저온저장고(4°C, relative humidity 40%)에서 보관하였다가 이듬해 3월에 각 50립을 파종하였다. 지름 24cm, 높이 23.5cm인 화분에 파종 후 발아시켰으며, 크기가 유사한 각 40개체를 선발하여 180일간 재배하였다.

### 2. 환경요인 처리

기후변화처리는 기후변화 처리구(climate change treatment, treatment)와 대조구(ambient condition, control)의 2개 공간으로 나누어진 유리로 된 폐쇄형 온실(12m × 7.8 m × 5m)에서 진행하였으며, 연평균 기온이 현재 대비 21세기 말에 평균온도 2.1°C 상승(CO<sub>2</sub> 농도 540ppm) 할 것으로 예측하는 RCP 4.5 시나리오(IPCC, 2014)를 기반으로 하였다(Figure 1).



**Figure 1.** Schematic diagram of environmental condition treatments: Climate change treatments and soil moisture and nutrient gradient within a glass greenhouse.

기후변화 처리구에서의 온도와 CO<sub>2</sub>는 통합환경시스템(LCS environment measure system - LCSEM S-002, Parus Co., Korea)으로 조절 및 유지하였으며, 두 곳에 식물이 수관층이 주로 분포하는 위치에 온도 데이터 로거(TR-71U, T&D, Nagano, Japan)와 CO<sub>2</sub> 센서(TEL-7001, Onset computer, USA)를 설치하여 10분 간격으로 모니터링하였다. 온도는 환풍기를 이용하여 대조구보다 약 2°C(2.0 ± 0.3°C) 차이가 나도록 조절하였으며, CO<sub>2</sub> 농도는 2개의 액화탄산가스(Carbon dioxide extra dry 99.9% min(N30), SPECIALGAS, Korea)의 regulator에 플라스틱 호스(직경 0.2 mm)를 연결하여 지상 2m에서 분사하여 상승시켰으며, 대조구보다 처리구에서 약 2배(536.7 ± 14.9 ppm) 더 높았다.

토양 수분과 영양소의 두 가지 환경요인은 각각 4개의 구배로 처리하였다(Figure 1). 수분구배는 건조된 토양(2kg)을 화분(지름 24cm, 높이 23.5cm)에 채워 물을 공급하여 화분 아래로 물이 빠져나가기 직전까지의 양인 포장 용수량(800ml)을 기준으로, M1(100ml), M2(300ml), M3(500ml), M4(700ml)로 구분하였으며, 관수 주기는 증발산량이 높은 여름철에는 3~4일이었으며, 그 외 기간에는 6~7일로 처리하였다. 영양소 구배는 참나무 숲의 일반적인 유기물 함량인 5%(KLTER, 2012)를 기준으로, 모래의 부피(100%)를 기준으로 유기물(≡)효성오엔비, Korea)의 비율을 N1(0%), N2(5%), N3(10%), N4(15%)로 구분하여 처리하였다. 토양은 유사한 입자 크기(2mm 이하)의 표준사(K.S.L 5100, ≡ 주문진규사, Korea)를 사용하였다.

### 3. 수확 및 잎 형태적 특성 측정

발아한 굴참나무와 상수리나무는 유리온실에서 180일간 생육하였으며, 잎의 생태지위를 계산하기 위하여 10가지 형태적 특성을 측정하였다; 전체 잎 수(ea), 엽면적(cm<sup>2</sup>), 잎 폭(cm), 잎 길이(cm), 잎몸 길이(cm), 잎자루 길이(cm), 전체 잎 무게(g), 잎 무게(g), 잎몸 무게(g), 잎자루 무게(g).

묘목을 수확할 때 각 개체의 전체 잎 수(ea)를 세고, 각 개체의 윗부분에 있는 잎 3개를 채취하여 각 잎에서 잎 폭(cm), 잎 길이(cm), 잎몸 길이(cm), 잎자루 길이(cm)를 측정하고, 엽면적계(SI700, Skye)를 사용하여 엽면적(cm<sup>2</sup>)을 측정하였다. 전체 잎 무게(g), 잎몸 무게(g), 잎자루 무게(g) 등 건조량은 묘목을 물로 씻어 흠을 완전히 제거하고 70°C에서 48시간 동안 건조한 후 전자저울(UX400H)을 이용하여 묘목의 건조중량을 측정하였다.

### 4. 생태지위폭 측정과 변화율

굴참나무와 상수리나무의 생태지위폭은 기후변화 조건의 각 환경 구배에서 나타난 10가지 잎 형태적 특성 측정값의 평균치를 Levins(1968)의 공식을 적용하여 계산하였다. 생태지위폭의 평가는 최댓값인 1을 기준으로 0.900 이상을 넓게 평가하였고, 0.900 이하를 좁게 평가하였다(Lee and You, 2009).

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

B : niche breadth(Levins' B)

P<sub>i</sub> : relative response of a given species to the whole gradients that is realized in gradient *i*

S : total number of gradients

기후변화에 따른 생태지위폭의 변화율은 기후변화 조건의 생태지위폭의 값에서 대조구 생태지위폭의 값을 뺀 값을 대조구의 것으로 나눈 변화율(%)을 계산하여 각 잎 형태적 특성 반응을 분석하였다.

### 5. 두 종의 개체군 반응 분석

대조구와 기후변화 처리구 간에서 두 종의 개체군의 반응을 분석하기 위해 각 환경구배에 따른 굴참나무와 상수리나무 잎의 형태적 특성 측정값을 주성분 분석(principal component analysis, PCA)으로 배열하였으며(No and Jeong, 2002), 개체들이 2차원 좌표평면에서 차지하는

공간적 위치와 그 점으로부터 연결한 다각형의 면적 값으로 기후변화에 따른 두 종의 개체군의 반응 정도를 해석하였다(Chun et al., 2007). 이상의 통계학적 분석은 Statistica 8 통계패키지(Statsoft Co. 2008)를 이용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 기후변화 조건에서 수분 조건에 따른 두 종의 생태지위폭

기후변화 조건에서 굴참나무와 상수리나무의 토양 수분 조건에 따른 10가지 잎 형태적 특성의 생태지위폭은 두 종 모두 0.90 이상으로 비교적 넓게 나타났으며, 굴참나무( $0.983 \pm 0.016$ )가 상수리나무( $0.978 \pm 0.019$ )보다 약간 더 넓었다(Table 1).

10가지 잎 형태적 특성의 생태지위폭은 굴참나무에서 모두 0.9 이상으로 넓게 나타났으며, 잎 폭, 잎 길이, 잎몸 길이, 엽면적, 잎 무게, 잎몸 무게, 잎자루 무게, 잎자루 길이, 전체 잎 수, 전체 잎 무게 순이었다(Table 1). 상수리나무도 마찬가지로 모두 0.9 이상으로 넓게 나타났으며,

잎 길이, 잎몸 길이, 전체 잎 수, 잎 폭, 전체 잎 무게, 엽면적, 잎자루 길이, 잎 무게, 잎몸 무게, 잎자루 무게 순이었다(Table 1).

이처럼 값이 0.9 이상으로 높은 것은 두 종 모두 토양 수분에 잘 적응할 것을 의미하며, 굴참나무의 것이 상수리나무의 것보다 약간 높아서 동일한 수분 조건이라면 전자가 더 유리할 것으로 판단된다.

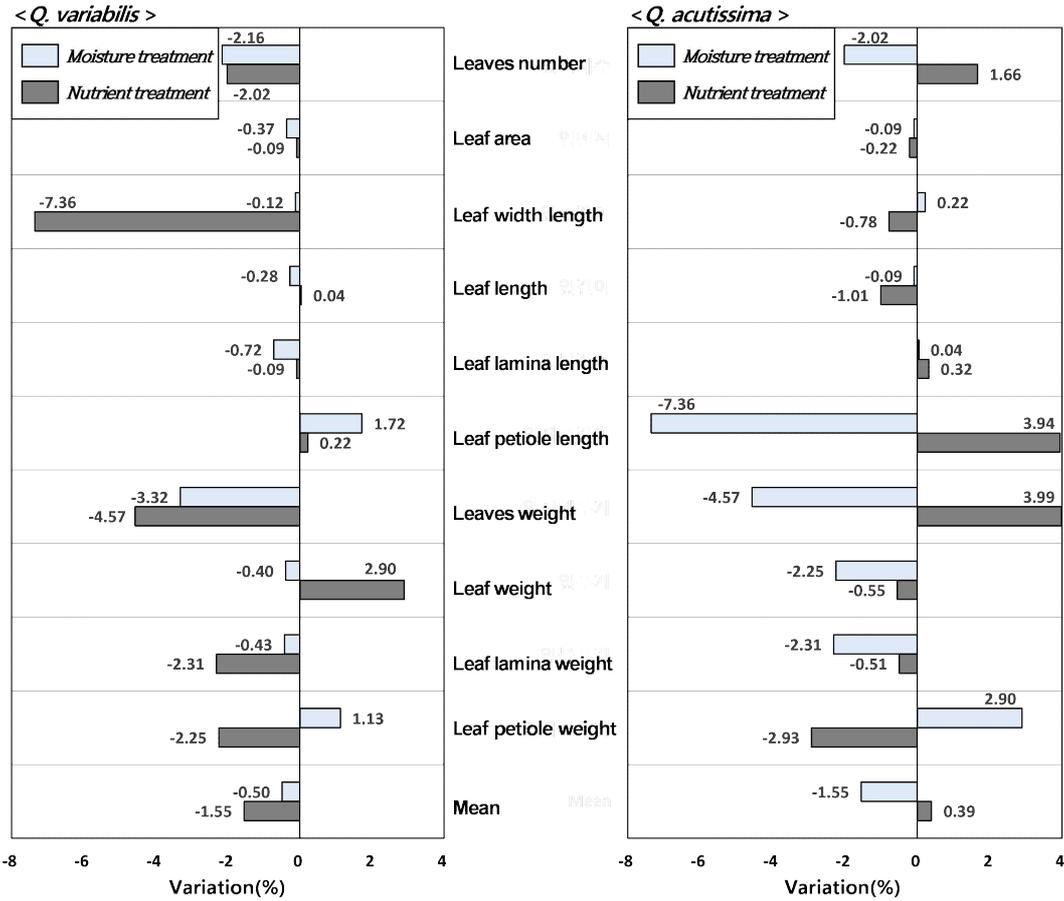
#### 2. 기후변화 조건에서 영양소 조건에 따른 두 종의 생태지위폭

기후변화 조건에서 굴참나무와 상수리나무의 영양소 조건에 따른 10가지 잎 형태적 특성의 생태지위폭은 두 종 모두 0.90 이상으로 비교적 넓게 나타났으며(굴참나무,  $0.969 \pm 0.034$ ; 상수리나무,  $0.979 \pm 0.016$ ), 상수리나무가 굴참나무보다 더 넓었다(Table 1).

10가지 형태적 특성의 생태지위폭은 굴참나무에서 잎자루 길이(0.884)를 제외하고는 0.9 이상으로 넓게 나타났으며, 잎 폭, 잎몸 길이, 잎 길이, 엽면적, 잎자루 무게, 전체 잎 수, 잎 무게, 잎몸 무게, 잎자루 길이 순이었다(Table 1). 상수

**Table 1.** Ecological niche breadth of *Q. variabilis*(*Q.v*) and *Q. acutissima*(*Q.a*) under climate change treatment(elevated CO<sub>2</sub> - elevated temperature, treatment) by moisture and nutrient environment

Character	Treatment			
	Moisture		Nutrient	
	<i>Q.v</i>	<i>Q.a</i>	<i>Q.v</i>	<i>Q.a</i>
Leaves number	0.973	0.994	0.967	0.974
Leaf area	0.990	0.985	0.984	0.994
Petiole length	0.981	0.963	0.884	0.987
Lamina length	0.990	0.998	0.997	0.998
Leaf length	0.995	0.998	0.996	0.989
Leaf width	0.997	0.991	0.998	0.988
Petiole weight	0.986	0.949	0.982	0.945
Lamina weight	0.986	0.957	0.966	0.978
Leaf weight	0.987	0.957	0.967	0.978
Leaves weight	0.943	0.989	0.945	0.960
Mean	0.983	0.978	0.969	0.979
S. D.	0.016	0.019	0.034	0.016



**Figure 2.** Variation(%) in the ecological niche breadth of 8 leaf traits of *Q. variabilis* and *Q. acutissima* under climate change treatment in soil moisture and nutrient environment to ambient atmosphere condition(control). Negative numbers indicate a decrease and positive numbers indicate an increase compared to the control.

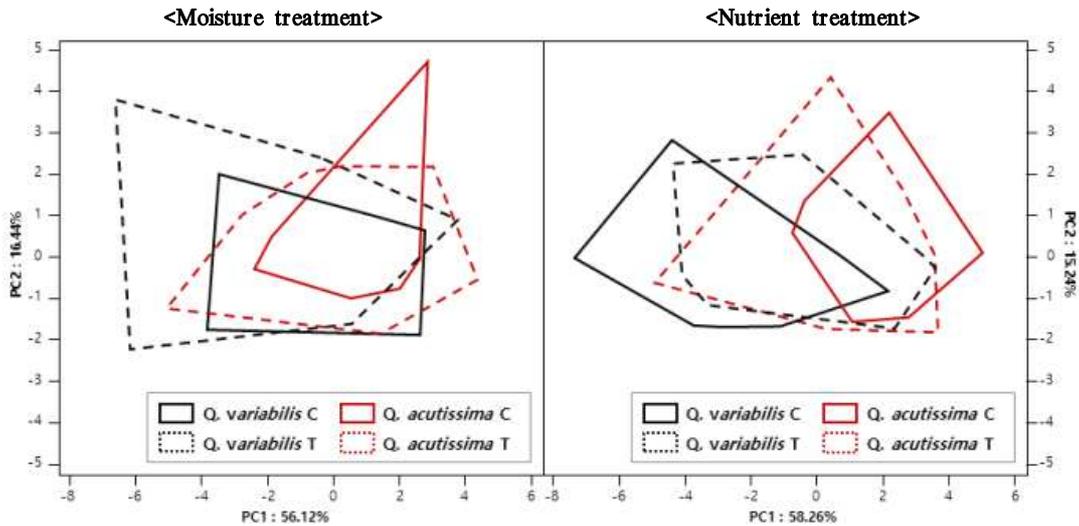
리나무는 잎몸 길이, 엽면적, 잎 길이, 잎 폭, 잎 자루 길이, 잎몸 무게, 잎 무게, 전체 잎 수, 전체 잎 무게, 잎자루 무게 순으로, 모두 0.9 이상으로 비교적 넓게 나타났다(Table 1).

이처럼 값이 0.9 이상으로 높은 것은 두 종 모두 토양 수분에 잘 적응할 것을 의미하며, 굴참나무보다 상수리나무의 것이 높아서 같은 수분 조건이라면 후자가 더 유리할 것으로 판단된다. 또한 이는 비교적 척박하고 건조한 입지를 선호하는 굴참나무가 영양소 조건에 대하여 민감하게 반응한 결과로 보인다.

### 3. 기후변화에 따른 두 종 생태지위폭의 변화율

기후변화 조건에서 토양 수분 및 영양소 조건에 대한 굴참나무의 생태지위폭은 모두 감소하였으나, 반면에 상수리나무의 생태지위폭은 수분 조건에서는 감소하였고 영양소 조건에서는 증가하였다(Figure 2).

굴참나무의 수분 조건에 대한 생태지위폭은 기후변화 처리구에서 평균  $-0.50 \pm 1.44\%$  감소하였으며, 2개 형태적 특성(잎자루 길이, 잎자루 무게)을 제외하고는 8개 형태적 특성에서 감소하였다(Figure 2). 또한 영양소 조건에 대한 굴참나무의 생태지위폭은 기후변화 처리구에서 평균 -



**Figure 3.** Principal component analysis(PCA) ordination of 8 leaf traits of *Q. variabilis* and *Q. acutissima* under control(ambient CO<sub>2</sub>-ambient temperature, C) and climatic change treatment(elevated CO<sub>2</sub>-elevated temperature, T) by soil moisture and nutrient environment.

1.55±2.86%, 3개 형태적 특성(잎자루 무게, 잎 폭, 잎몸 길이)을 제외하고 7개 형태적 특성에서 감소하였다(Figure 2).

상수리나무의 수분 조건에 대한 생태지위폭은 대조구에 비하여 평균  $-0.65 \pm 3.01\%$  감소하였으며, 3개 형태적 특성(전체 잎 수, 전체 잎 무게, 잎몸 길이)을 제외하고 7개 형태적 특성에서 감소하였다(Figure 2). 또한 영양소 조건에 대한 상수리나무 생태지위폭은 대조구에 비하여 평균  $0.39 \pm 2.20\%$  증가하였으며, 4개 형태적 특성(전체 잎 무게, 잎자루 길이, 전체 잎 수, 잎몸 길이)에서 증가하였으며, 6개 형태적 특성에서 감소하였다(Figure 2).

기후변화 조건에서 굴참나무의 생태지위는 수분과 영양소에 대하여 모두 대조구에 비하여 감소한다. 반면에 상수리나무는 수분에 대해서는 감소하였지만, 영양소에 대해서는 증가하였다.

이처럼 두 종이 기후변화에 완전히 다르게 반응한다는 것은 현재 분류생태학적으로 가깝고 유전적으로 유사한 종이라고 하더라도 기온이 상승하면 현재와는 전혀 다른 생태 반응을 보인다는 것을 의미한다. 또한 Norby et al. (2004)에

의하면 높은 CO<sub>2</sub> 환경에서는 식물의 공변세포가 반응하여 기공이 닫히면, 증산량이 감소하고 수분이용효율이 높아진다고 하였다. 즉 일정한 물로 유기물을 만드는 비율이 높아져 토양이 천천히 건조되고 수분함량이 높게 유지된다는 것이다. 반면에 Son and Kim(1998)은 온도가 높아질수록 증산량이 많아져서 28°C에서 가장 높다고 하였다. 이처럼 온도와 CO<sub>2</sub>에 의한 생태지위 변화는 여러 생리작용이 복합적으로 반응하며, 더 나아가 기후변화가 되면 식물군락의 천이나 개체군의 동태를 예측하기가 현재보다 더 어려울 것으로 판단된다.

#### 4. 기후변화 조건과 잎 형질의 상관관계 분석

굴참나무와 상수리나무의 10가지 잎의 형태적 특성을 이용한 주성분 분석(PCA)에서 PC1과 요인 2에 의해 두 종은 대조구(Control, C)와 비교했을 때, 기후변화 처리구(Climatic Change Treatment, T)에서 모두 면적이 증가하였다(Figure 3).

수분 조건에 대하여 굴참나무는 기후변화 처리구에서 면적이 약 1.97배 증가하였으며, 상수

**Table 2.** Correlation matrix of 8 variables treated with the moisture and nutrient gradient with the PC1 and PC2 scores of the principal component analysis(PCA).

Trait	Moisture		Nutrient	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Total leaves number	0.022	0.936	0.310	0.872
Leaf area	-0.850	-0.278	-0.906	0.060
Petiole length	-0.426	0.231	-0.494	-0.227
Lamina length	-0.863	-0.089	-0.838	-0.080
Leaf length	-0.875	-0.075	-0.850	-0.091
Width length	-0.867	-0.209	-0.887	-0.081
Petiole weight	-0.639	0.027	-0.651	-0.078
Lamina weight	-0.930	0.022	-0.945	0.106
Leaf weight	-0.931	0.024	-0.947	0.103
Total leaves weight	-0.554	0.761	-0.489	0.812
Variance explained [%]	56.12	16.44	58.26	15.24

\* Statistically significant traits( $r > 0.5$ ) are shown in red.

리나무는 약 1.66배 증가하였다. 또한 수분 조건에서 굴참나무와 상수리나무의 면적을 비교했을 때, 대조구와 처리구에서 모두 굴참나무가 각 1.30배, 1.54배 더 넓었다(굴참나무 대조구, 23.96; 굴참나무 기후변화 처리구, 47.17; 상수리나무 대조구, 18.44; 상수리나무 처리구, 30.62)(Figure 3).

영양소 조건에 대하여 굴참나무는 기후변화 처리구에서 면적이 약 1.05배 증가하였으며, 상수리나무는 1.76배 증가하였다, 또한 영양소 조건에서 두 종의 면적을 비교했을 때, 대조구에서는 굴참나무가 1.34배 넓었지만, 처리구에서는 상수리나무가 1.25배 더 넓었다(굴참나무 대조구, 26.68; 굴참나무 기후변화 처리구, 28.01; 상수리나무 대조구, 19.91; 상수리나무 처리구, 35.03)(Figure 3).

이는 기후변화 조건에서 굴참나무와 상수리나무의 생태지위폭 결과와 일치하였으며, 마찬가지로 동일한 환경 조건에서 두 종의 토양 수분 조건에 대한 생태지위가 겹치는 경우, 굴참나무의 잎 형태적 특성이 더 유리하며, 토양 영양소 조건에 대해서는 상수리나무가 더 유리함을 의

미한다. 또한 토양 수분 조건과 영양소 조건 모두 기후변화 처리구서 두 종이 겹치는 영역의 면적이 증가하였다.

이러한 결과는 잎의 형태적 특성들의 변화(Figure 2)와 그것을 반영한 개체들의 반응(Figure 3), 특히 상수리나무에서 환경요인에 따라 서로 다른 양상으로 반응함을 의미하는 것이다. 또한 두 종의 토양 수분과 영양소에 대한 생태적 반응은 개체들의 총합적인 것이기 때문에 어느 소수의 잎 형태적 특성이 관여하는 것이 아니라 여러 잎 형태적 특성이 동시에 관련되어 있다는 것을 의미한다.

## V. 결론

굴참나무는 상대적으로 경사가 급하고 척박한 곳에 서식하지만, 상수리나무는 토양 조건이 양호한 곳에서 분포한다. 이처럼 분류학적으로 서로 가깝고 유전적 동일성이 높은 굴참나무와 상수리나무가 기후변화 조건이 되면 그들의 잎 형태적 특성의 생태지위와 종간 관계가 어떻게 변하는지 알아보기 위하여 대기 중 온도와 CO<sub>2</sub> 농

도를 상승시켜 토양 수분과 토양 영양소를 각 4개의 구배로 처리하여 나타나는 10가지 잎 형질의 생육 반응으로 생태지위폭을 계산하였다. 또한 기후변화 처리에 따른 생태지위폭 변화율(%)을 가지고 형태적 특성의 반응을 분석하였다. 또한 개체군의 반응은 잎 형태적 특성값을 이용하여 주성분 분석(PCA)으로 배열하여 반응 정도를 해석하였다.

그 결과 기후변화 처리구에서 두 종의 생태지위폭은 모두 0.9 이상으로 넓었으며, 수분 조건에서는 굴참나무가 상수리나무보다 더 넓으나, 영양소 조건에서는 상수리나무가 굴참나무가 더 넓었다. 또한 기후변화로 인한 생태지위폭의 변화율은 굴참나무에서 수분과 영양소 조건 모두 감소하였으나, 상수리나무 수분 조건에서 생태지위폭은 증가하였고, 영양소 조건에서는 감소하였다. 이처럼 두 종이 완전히 상이하게 반응한다는 것은 분류학적으로 유사한 종이라고 하더라도 기온이 상승하면 전혀 다른 반응을 보인다는 것을 의미한다.

그리고 두 종의 각 개체들의 반응 정도는 기후변화 처리구가 대조구보다 토양 수분과 영양소 조건에서 모두 증가하였다. 또한 두 종을 비교하였을 때, 대조구에서 토양 수분과 토양 영양소 조건 모두 굴참나무가 더 넓었으나, 영양소 조건에서는 기후변화영향으로 상수리나무가 넓어졌다. 이러한 결과는 잎의 형태적 특성들의 변화와 그것을 반영한 개체들의 반응이 기후변화 조건 뿐만 아니라 환경요인에 따라서도 다른 양상으로 반응함을 의미하는 것이다.

## References

- IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34.
- IPCC. 2014. Climate change 2014 synthesis report. IPCC: Geneva, Switzerland, pp.1059-1072.
- KLTER. 2012. Annual Report of Korean National Longterm Ecological Research. NIER. Seoul, Korea. 1477pp. (Korean Literature)
- Lee, T. B. 1961. Taxonomic Study of Korean *Quercus* Genus(2). Seoul National University Journal 10(D): 87-108. (in Korean)
- Lee, T. B. 1986. New Manuscript Arboriculture. Hyangmun Publishing Company. pp. 148-157. (in Korean)
- No, H. J., and Jeong, H. Y. 2002. Easy Statistics Analysis with STATISTICA. Hyungseong Publishing Company. (in Korean)
- Cho, K. T., Jang, R. H., Lee, S. H., Han, Y. S., You, Y. H. 2013. Effects of global warming and environmental factors of light, soil moisture, and nutrient level on ecological niche of *Quercus acutissima* and *Quercus variabilis*. Korean Journal of Ecology and Environment, 46(3), 429-439. (in Korean)
- Cho, K. T., Jeong, H. M., Han, Y. S., Lee, S. H. 2014. Variation of Ecological Niche of *Quercus serrata* under Elevated CO<sub>2</sub> Concentration and Temperature. Korean Journal of Environmental Biology, 32(2), 95-101. (in Korean)
- Chun, Y. J., Collyer, M. L., Moloney, K. A., Nason, J. D. 2007. Phenotypic plasticity of native vs. invasive purple loosestrife: a two state multivariate approach. Ecology, 88(6), 1499-1512. (in Korean)
- Ho, C. H., Lee, E. J., Lee, I., Jeong, S. J. 2006. Earlier spring in seoul, Korea. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 26(14), 2117-2127. (in Korean)

- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. In Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology(Vol. 22, pp. 415-427). Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Garbutt, K., Bazzaz, F. A. 1984. The effects of elevated CO<sub>2</sub> on plants: III. Flower, fruit and seed production and abortion. *New Phytologist*, 98(3), 433-446.
- Idso, K. E., Idso, S. B. 1994. Plant responses to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years' research. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69(3-4), 153-203.
- Idso, S., Kimball, B. 1997. Effects of long term atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the growth and fruit production of sour orange trees. *Global Change Biology*, 3(2), 89-96.
- Kim, S. Y., Kang, H. J. 2003. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on wetland plants: a review. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 36(4), 391-402. (in Korean)
- Kim, Z. S., Lee, S. W., Lim, J. H. 1991. Biosystematics of deciduous oaks in Korea based on allozyme variation. *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 21(2), 95-103. (in Korean)
- Lee H. J., You Y. H. 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. (in Korean)
- Lee, M. J., Yee, S., Kim, H. J., Ji, Y. U., Song, H. K. 2002. Vegetation Structures and Ecological Niche of *Quercus variabilis* Community. *JOURNAL - KOREAN FORESTRY SOCIETY*, 91(4), 429-438. (in Korean)
- Lee, S. H., You, Y. H. 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 Environment*, 35(3), 227-234. (in Korean)
- Levins, R. 1968. Evolution in changing environments: some theoretical explorations. Princeton University Press.
- McNaughton, S. J., Wolf, L. L. 1970. Dominance and the Niche in Ecological Systems: Dominance is an expression of ecological inequalities arising out of different exploitation strategies. *Science*, 167(3915), 131-139.
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., Nemani, R. R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626), 698-702.
- Norby, R. J., Ledford, J., Reilly, C. D., Miller, N. E., O'Neill, E. G. 2004. Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 101(26), 9689-9693.
- Odum, E. P. 1969. The Strategy of Ecosystem Development: An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. *science*, 164(3877), 262-270.
- Park, J. H., Chung, M. G., Sun, B. Y., Kim, K. J., Park, J. H., Park, C. W. 2005). Numerical analysis of *Quercus* L. subgenus *Quercus*(Fagaceae) in Korea. *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 35(1), 57-80. (in Korean)
- Park, W. K. 1993). Increasing atmospheric carbon dioxide and growth trends of Korean subalpine conifers - Dendrochronological

- analysis. Journal of Korean Society of Forest Science, 82(1), 17-25. (in Korean)
- Pianka E. R. 1994). Evolutionary ecology. 5th ed. Harper and Row New York 482.
- Ryou S. H. 2005. Forest vegetation of the Korean Peninsula(4): *Quercus variabilis* community. Forest and Culture, 14(4), 6-9. (in Korean)
- Saxe, H., Ellsworth, D. S., Heath, J. 1998. Tansley Review No. 98. Tree and forest functioning in an enriched CO<sub>2</sub> atmosphere. New Phytologist(United Kingdom), 139(3).
- Schaber, J. and Badeck, F. W. 2005. Plant phenology in Germany over the 20th century. Regional Environmental Change, 5, 37-46.
- Whittaker RH · Levin SA · Root RB. 1973. Niche habitat and ecotope. The American Naturalist 107(955): 321-338.
- Yun, J. I. 2006. Climate change impact on the flowering season of Japanese cherry(*Prunus serrulata* var. *spontanea*) in Korea during 1941-2100. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 8(2), 68-76. (in Korean)
- Kwon, S. S. 2023. Phytosociological Study on the *Quercus variabilis* Forest in Korea. Doctor's Thesis. Jeonbuk National University. (in Korean with English summary)
- Park, B. H. 2003. Studies on the niche of four herbal species along the environmental gradient. Master's Thesis. Seowon University. (in Korean with English abstract).
- Song, M. S. 2007. Analysis of distribution and association structure on the sawtooth oak(*Quercus acutissima*) forest in Korea. Doctor's Thesis. Changwon: University of Chanwon. (in Korean with English summary)