

Original article

기후변화 환경에서의 낙엽성 참나무 6종의 발아와 초기 생장

정현모 · 김해란¹ · 유영한^{2,*}

국립생태원 기후변화연구팀, ¹국립생태원 환경영향평가팀, ²공주대학교 생명과학과

Impact of Germination and Initial Growth of Deciduous Six Oak Species under Climate Change Environment Condition. Heon Mo Jeong (0000-0003-4151-0659), Hae Ran Kim¹ (0000-0002-3443-9842) and Young Han You^{2,*} (0000-0002-9039-7595) (Team of Climate Change Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea; ¹Environmental Impact Assessment Team, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea; ²Department of Biology, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea)

Abstract The present study investigated the effect of global warming on germination and initial growth across six deciduous oak species (*Quercus mongolica*, *Q. variabilis*, *Q. serrata*, *Q. dentata*, *Q. aliena*, and *Q. acutissima*), which are the dominant tree species in Korea forest ecosystems. Seeds were sown in climate change treatments, with temperatures higher than those of the control (approximately 3.0°C higher), and CO₂ concentrations higher than those of the control (approximately 2-fold higher). Initial growth in each species was measured every two weeks. Initial growth was more rapid in all oak species at the time of root and shoot emergence under high temperature and CO₂ treatments than in the control group. Leaf emergence in *Q. mongolica*, *Q. variabilis*, and *Q. serrata* occurred earlier under the climate change treatments than under the control. Root length increased significantly in *Q. mongolica*, *Q. variabilis*, and *Q. dentata* under the climate change treatments when compared to under the control. However, *Q. aliena* and *Q. serrata* exhibited a contrasting trends, and no significant difference was observed between the species and *Q. acutissima*. Shoot length increased significantly in *Q. aliena* under climate change treatments when compared to under the control but decreased in *Q. aliena*. In addition, no significant difference was observed in shoot length among *Q. mongolica*, *Q. dentata*, and *Q. acutissima*. The results showed that climate change treatments facilitated early growth, rapid emergence from the ground, leaf development, and enhanced belowground growth in *Q. mongolica*. Conversely, *Q. aliena* exhibited the lowest aboveground and belowground growth under climate change treatments when compared to other oak species. Climate change treatments had the least impact on *Q. acutissima* considering the insignificant differences observed in initial growth rates under climate change treatment.

Key words: global warming, *Quercus*, phenology, environmental gradients

서 론

Manuscript received 8 November 2021, revised 12 December 2021,
revision accepted 13 December 2021
* Corresponding author: Tel: +82-41-850-8508, Fax: +82-41-850-8505
E-mail: youeco21@kongju.ac.kr

이산화탄소(CO₂)는 인간의 활동에 의해 발생하는 가장 중요한 온실가스이다. 전 세계 대기 CO₂ 농도 상승은 지속적인 화석연료 소모가 주된 원인이며, 토지이용 변화 역시

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

이에 기여하였다(IPCC, 2007). 온실효과에 의해 2019년 전지구적 평균기온은 산업화 이전 기준치(1850~1900년)에 비해 약 $1.1 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 더 높았고(World Meteorological Organization, 2020), 우리나라의 기온은 관측이 시작된 1912년부터 2017년까지(106년) 평균 $0.18^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 기온 변화율로 상승하였다(Ministry of Environment, 2020).

기온 상승은 다양한 환경 변화를 가져오고 식물 분포에 큰 영향을 미친다. 지구가 온난해지고 극한 기후가 찾아짐에 따라 다양한 식물들은 과거에는 경험하지 못했던 다양한 형태의 반응을 보이고 있는 것이다. 남한 전체 식물의 생육개시일은 빨라지고 생육종료일이 늦어져 총 생육 기간은 평균 4.2일/10년 늘어났고, 가야산 국립공원의 경우, 아고산 식물 5종의 개화시기가 일 최고 기온과 일 평균 기온에 영향을 받는다는 것이 보고되었다(Jung *et al.*, 2014; Sung and Kim, 2018). 또한 식물의 꽃과 잎의 생물계절이 달라지고, 사과 생산지가 바뀌고 있으며 산림의 경우 병충해로 인한 피해도 속출하고 있다(Seo, 2003; Seo *et al.*, 2005). 현재 큰 변화가 없는 것으로 보이는 우리나라의 참나무림은 지구온난화의 영향에 의해 변화가 발생할 수 있다. 우리나라 전역에서 자생하고 있는 참나무 속(Genus) 식물들은 산림을 형성하여 많은 야생생물들을 부양하고 환경학적 및 조림학적으로 중요성을 인정받고 있다(Lee, 2003). 우리나라에서 넓은 면적을 차지하고 있는 낙엽성 참나무 속(Genus *Quercus*)에는 상수리나무(*Quercus acutissima*), 굴참나무(*Q. variabilis*), 신갈나무(*Q. mongolica*), 갈참나무(*Q. aliena*), 졸참나무(*Q. serrata*), 떡갈나무(*Q. dentata*) 등 6분류군과 12분류군의 자연교잡종이 포함되어 있다(Lee, 2003). 이 참나무들은 종별 생태적 지위에 따라 사는 곳이 서로 다르다.

내건성, 내한성 그리고 내음성이 강한 상수리나무는 양지바른 산기슭에 자생하는 활엽수의 대표적인 수종으로 인가 및 도로변 산지일대에서 쉽게 접할 수 있다(Song, 2007). 굴참나무는 햇볕을 많이 받는 척박하고 건조한 곳에서 번성하며, 생장이 빠르고 맹아력이 강하며(Lim, 1995), 한반도의 전 지역에서 분포하는 신갈나무는 산지의 중북부 이상의 습도가 높은 사면에서 서식하는(Kim and Kil, 2000) 낙엽성 교목으로 우리나라의 대표적인 산림형을 이룬다(Jang, 2007). 갈참나무는 해발 120~645 m 범위에서 발견되며 입지 평균 경사도는 18.4° ($5\sim 30^{\circ}$)이고, 떡갈나무는 평균해발 712 m, 평균경사 25.3° 로 거의 암석이 나타나지 않는 곳에 자리하고 있다. 떡갈나무 군락 내에는 물푸레나무, 당느릅나무, 굴참나무, 고로쇠가 교목층과 아교목층 그리고 관목층에 출현하고 있는 것으로 미루어 일부에서는 이들과 혼효하는 것으로 생각된다(Bae, 2005).

졸참나무는 주로 해발 30 m~480 m 내에서 발견되는데, 대부분의 졸참나무군집은 저지대 산지에서 자란다(Kim *et al.*, 2009).

우리나라 산림의 주요 우점수종인 참나무는 CO_2 농도 및 기온 상승에 의한 영향으로 그 서식 분포와 식생에 많은 영향을 받을 것으로 예측되고 있다. Choung *et al.* (2006)은 산림의 입지요인 및 종조성에 따라 굴참나무군락(*Q. variabilis* community), 소나무군락(*Pinus densiflora* community), 상수리나무군락(*Q. acutissima* community) 및 떡갈나무군락(*Q. dentata* community)은 졸참나무군락(*Q. serrata* community)이나 신갈나무군락(*Q. mongolica* community)으로 각각 천이가 진행될 것으로도 예측한 바 있다. 그러나 국내에서 참나무를 대상으로 CO_2 와 기온 상승에 의한 영향을 실험한 예는 많지 않으며, 연구 데이터와 분석 결과가 부족하여 지구온난화 환경에서의 참나무 반응을 예측하기 쉽지 않다. 본 연구는 지구온난화에 따른 낙엽성 참나무의 반응 및 변화를 예측하기 위하여, 상승된 CO_2 농도 및 기온의 환경에서 낙엽성 참나무 6종의 초기 성장 변화를 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 낙엽성 참나무 6종의 종자 수집과 배치

본 실험에서 사용된 도토리는 8월부터 9월에 서울의 관악산 일대의 야산에서 채집한 것으로, 우리나라 낙엽 활엽 참나무인 상수리나무(*Q. acutissima*), 굴참나무(*Q. variabilis*), 신갈나무(*Q. mongolica*), 갈참나무(*Q. aliena*), 졸참나무(*Q. serrata*) 그리고 떡갈나무(*Q. dentata*)의 종자이다. 채집된 도토리는 각 참나무 종별로 분류한 뒤 외관상 훼손되지 않고 크기가 비슷한 것을 선별하여 4°C 냉장고에 보관하였다.

Matsuda and McBride (1989)는 참나무 종자인 도토리의 발아 시기에 따라 10~11월에 발아하는 『Fast type』과 이듬해 1~2월에 발아하는 『Slow type』으로 구분하였으며, 이러한 구분에 따라 우리나라의 낙엽성 참나무 6종에 적용해 보면, 도토리가 떨어진 해 가을 발아를 시작하는 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무 그리고 떡갈나무는 『Fast type』으로, 도토리가 떨어진 이듬해 봄에 발아하는 상수리나무와 갈참나무는 『Slow type』이라고 할 수 있을 것이다. 본 연구에서 사용된 도토리는 채집 당시 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무 그리고 떡갈나무 종자는 이미 뿌리가 발아되고 있었으며 상수리나무와 갈참나무의 뿌리는 발아되지 않았다.

채집된 도토리는 채집한 그해 9월에 투명한 사각 플라

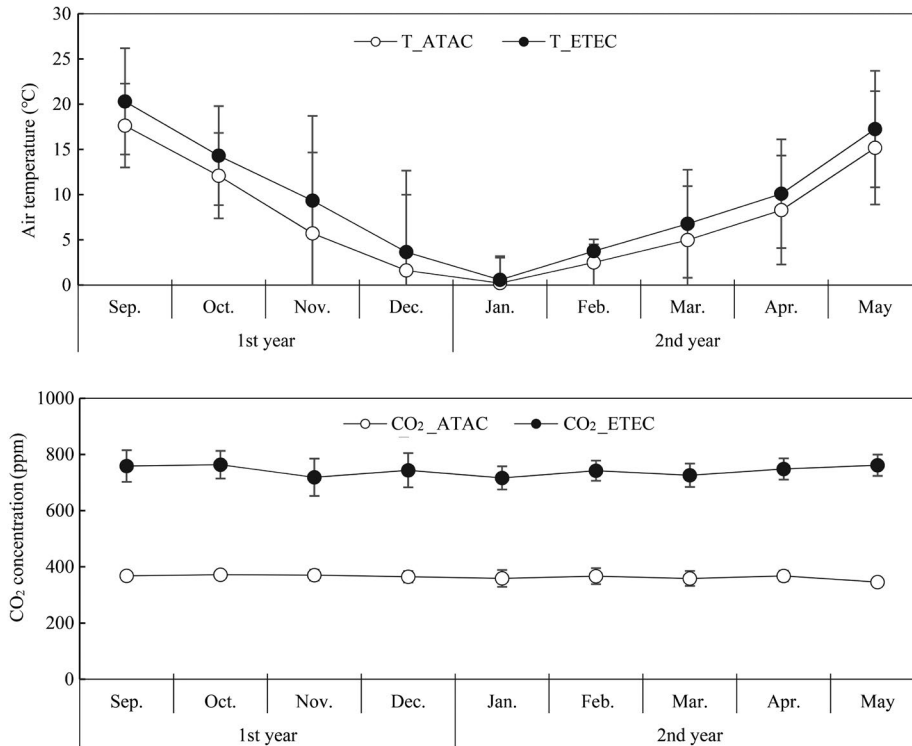


Fig. 1. Monthly mean air temperature (up) and CO₂ concentration (down) in ATAC (Ambient Temperature-Ambient CO₂) and ETEC (Elevated Temperature-Elevated CO₂) throughout the experimental period.

스틱 화분 (30 cm × 20 cm × 20 cm)에 파종하였으며 도토리의 뿌리가 외부에서 잘 보이도록 화분 벽면에 붙여서 파종하였다. 각 종당 12개체를 대조구(ATAC)와 CO₂ 농도와 기온이 상승된 기후변화처리구(ETEC)에 각각 배치하였다.

2. 기후변화 처리

본 실험은 온실 외부와 유리온실에서 수행되었으며 대조구(ATAC)는 야외의 일반 대기 조건이며, 기후변화처리구(ETEC)는 유리온실에 처리하였다. 기후변화처리구는 대조구보다 CO₂ 농도는 약 2배, 온도는 약 3.0°C 상승되어 처리되었다. 기후변화처리구와 대조구의 CO₂ 농도는 각각 370~400 ppm, 750~800 ppm으로 유지시켰다. 유리온실 내 CO₂ 농도와 기온은 CO₂ Concentration Analyzer (TEL 7001, Onset computer)와 대기온도 측정기(TR-71U, T&D corporation)를 설치하여 30분 간격으로 기록하였다(Fig. 1). 이러한 기후변화 처리는 IPCC (2007)의 B1 시나리오에서 예측하는 2100년의 대기환경을 참조하였다.

기후변화조건(ETEC)은 유리온실의 높이 약 2 m 지점에 10~20 cm 간격으로 구멍이 뚫린 호스가 고르게 지나가도록 설치하고 호스에 액화탄산가스 통(용량 4 kg)

을 연결하고, Gas regulator로 CO₂ 주입량을 조절하여 대조구(370~380 ppm)의 약 2배인 750~800 ppm을 유지되도록 만들었다. CO₂의 농도는 LCI Ultra Compact Photosynthesis System (ADC Co., UK, 2005)으로 실험기간 동안 하루 10~12차례 측정하였다. 대조구와 기후변화처리구의 광은 자연광으로, 수분은 토양이 마르는 정도를 확인하여 약 3~4일에 1회 식물에 동일한 양을 공급하여 유지하였고, 토양은 모래를 사용하였다. 토양의 유기물 함량(주, 효성오엔비)은 0.5% 정도로 처리하였다.

3. 측정 및 데이터 분석

각 대조구와 처리구의 6종의 참나무를 대상으로 2주 간격으로 지하부(뿌리), 지상부(줄기) 그리고 잎의 출현을 관찰하였으며 뿌리 및 줄기의 길이 생장과 식물체 잎 수를 측정하여 기록하였다. 잎의 출현은 잎자루가 보이는 시기로 하였다. 이때, 길이 측정에 따른 스트레스를 최소화하기 위하여 가능한 한 육안으로 측정하였고, 뿌리가 성장함에 따라 외부에서 보이지 않는 경우에만 뿌리가 끊어지지 않게 토양에서 조심스레 분리하여 확인 후 다시 화분에 이식하고 관수하였다.

측정된 데이터는 Excel 프로그램 (Microsoft CO. 2013)을 이용하여 정리하였으며 측정된 연도의 날짜별로 평균 및 표준편차를 산출하였다. 이것을 토대로 참나무의 각 환경구배별 생장반응(기관별 출현 시기 및 길이 생장)을 그래프와 표로 표현하였다.

지하부 및 지상부의 길이와 잎 수는 마지막 관측값을 기준으로 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였고, 대조구와 처리구의 생장량의 유의성을 검정하였다. 구배별 유의성은 포스트-훅(Post-hoc) 검정에 의해 피셔의 최소유역차범위(Fisher LSD)를 계산하였다. ANOVA 분석은 R 프로그램(ver. 3.5.2, www.r-project.org)을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 6종 참나무의 지상부, 지하부 및 잎 출현시기

상수리나무의 지하부 출현시기는 기후변화처리구 (ETEC, 1월 23일)에서 대조구(ATAC, 3월 27일)보다 63일 더 빨랐다(Table 1). 지상부의 출현시기는 기후변화처리구(2월 27일)에서 ATAC(3월 27일)보다 28일 더 빨라 지하부와 지상부의 출현시기는 모두 증가된 CO₂ 농도와 온도 환경에서 빨랐다. 잎 출현시기는 3월 13일로 ETEC와 ATAC 모두 같았다. 굴참나무의 지상부 출현시기는 기후변화처리구(2월 27일)에서 ATAC(4월 18일)보다 52일 더 빨랐다. 잎 출현시기는 기후변화처리구(3월 13일)에서 ATAC(4월 18일)보다 36일 더 빨랐다. 신갈나무의 지상부 출현시기는 기후변화처리구(2월 27일)에서 ATAC(4월 18일)보다 50일 더 빨랐다. 잎 출현시기는 기후변화처리구(3월 13일)에서 ATAC(4월 18일)보다 29일 더 빨랐다. 갈참나무의 지하부 출현시기는 기후변화처리구(2월 27일)에서 ATAC(3월 13일)보다 14일 더 빨랐다. 지상부의 출현시기는 기후변화처리구(3월 13일)에서 ATAC(3월 27일)보다 14일 더 빨랐다. 잎 출현시기는 3월 27일로 기후변화처리구와 대조구 모두 같았다. 졸참나무의 지상부 출현시기는 기후변화처리구(3월 27일)에서 대조구(4월 18일)보다 22일 더 빨랐다. 잎 출현시기는 기후변화처리구(3월 27일)에서 대조구(4월 18일)보다 23일 더 빨랐다. 떡갈나무의 지상부 출현시기는 기후변화처리구(2월 27일)에서 대조구(3월 13일)보다 14일 더 빨랐다. 잎 출현시기는 3월 27일로 기후변화처리구와 대조구 모두 같았다. 위의 결과는 증가된 CO₂ 농도 및 온도 환경에서 낙엽성 참나무 6종의 지상부 출현시기와 상수리나무 및 갈참나무의 지하부 출현시기가 더 빨라짐을 나타냈다. 그리고 굴참나무, 신갈나무 그리고 졸참나무의 잎 출현시기 역시 증가된 CO₂ 농도 및 온

Table 1. Variations in the appearance period of above- and below-ground, leaf under ETEC (“-” means appearance faster than ATAC, “0” means no difference).

Species	Organization	ECET
<i>Q. acutissima</i>	Above-ground	-28
	Below-ground	-63
	Leaf	0
<i>Q. variabilis</i>	Above-ground	-52
	Below-ground	-9
	Leaf	-36
<i>Q. mongolica</i>	Above-ground	-50
	Below-ground	-3
	Leaf	-29
<i>Q. aliena</i>	Above-ground	-14
	Below-ground	-14
	Leaf	0
<i>Q. serrata</i>	Above-ground	-22
	Below-ground	-5
	Leaf	-23
<i>Q. dentata</i>	Above-ground	-14
	Below-ground	-2
	Leaf	0

도 환경에서 더 빨랐다.

위의 결과는 지구온난화 환경에서 낙엽성 참나무 6종의 지하부 및 지상부의 출현시기가 빨라짐을 의미하는 것으로, 고도가 높아짐에 따라 기온이 하강하여 도토리, 신갈나무 및 지하부 출현시기가 늦어지는 연구와 맥을 같이 하였다(Matsuda and McBride, 1989). 또한 신갈나무와 졸참나무가 온난화 환경에서 발아시기가 빨라진다는 기존 연구와도 같았다(Park *et al.*, 2019). 한편 떡갈나무의 경우 지구온난화 환경에서 지상부의 출현은 빨라지나 지하부의 발아율이 낮아질 것으로 연구된 바 있어(Jung *et al.*, 2017) 지하부와 지상부의 반응이 서로 상충되는 것으로 판단된다. 잎의 출현시기는 종마다 차이가 있어 온난화 환경에서 굴참나무, 신갈나무 그리고 졸참나무는 개엽이 빨라지고 나머지에서는 출현시기에 차이가 없었다. 이는 굴참나무, 신갈나무와 졸참나무는 온난화 환경에서 더 민감하게 반응하여 생육기간이 늘어날 수 있는 가능성을 보여주는 것으로, 지구온난화 환경에서 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무의 개엽에서 낙엽시기까지 생육기가 각각 175일, 159일 그리고 201일 연장된 연구 결과와 유사하였다(Hong *et al.*, 2018).

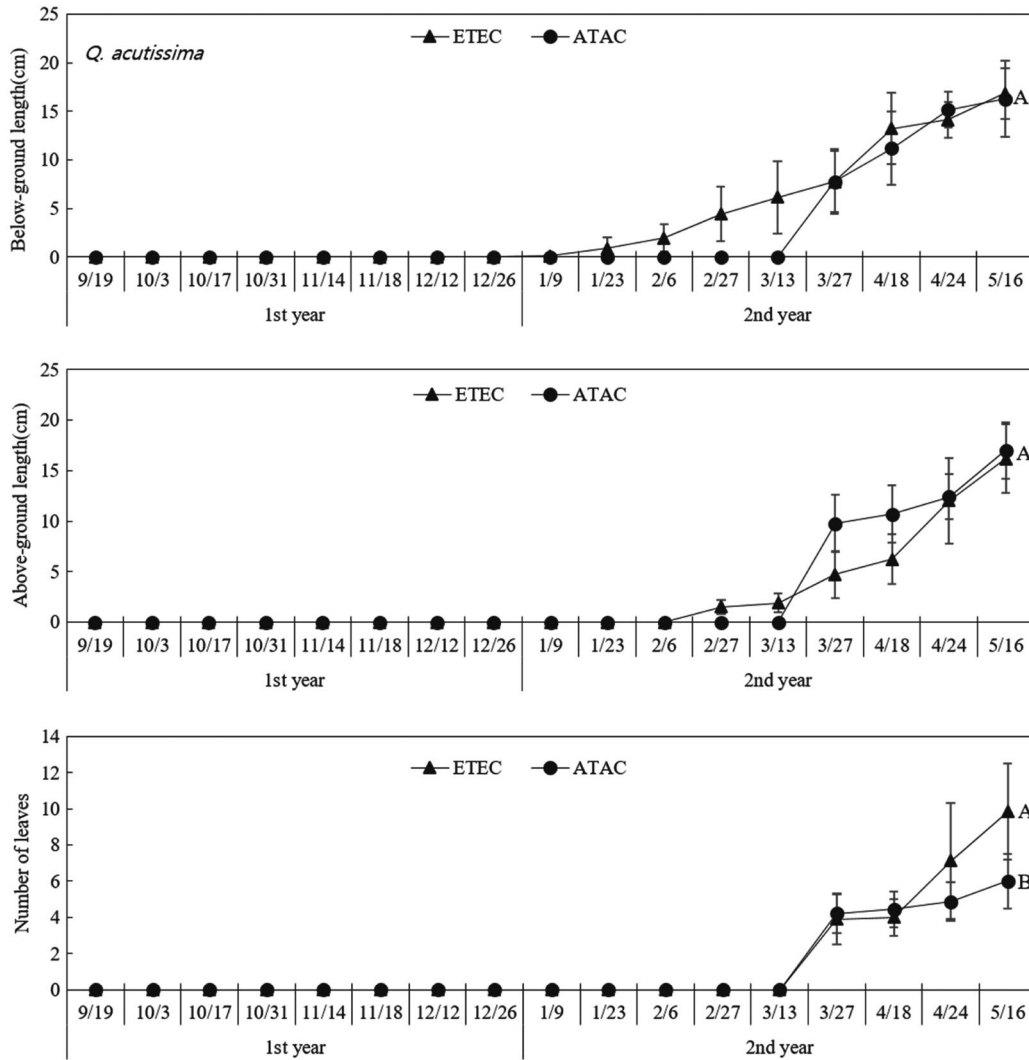


Fig. 2. Initial growth increment (below-ground, above-ground and number of leaves) of *Q. acutissima* seedlings under ETEC and ATAC (The alphabets mean significantly different between ETAC and ATAC, $p < 0.05$).

2. 환경처리에 따른 식물체 길이 및 잎 수 비교

상수리나무의 지하부 생장은 실험이 끝나는 5월 16일을 기준으로 기후변화처리구 (ETEC)와 대조구 (ATAC)에서 약 16cm로 생장의 차이가 없었다 (Fig. 2). 상수리나무의 지상부 생장은 16~17 cm로 기후변화처리구와 대조구 간 차이가 없었다. 잎 수는 기후변화처리구에서 대조구보다 약 3장 이상 더 많았다 ($p < 0.05$). 굴참나무의 지하부 생장은 기후변화처리구 (24.1 cm)에서 대조구 (10.4 cm)보다 잘 자랐다 ($p < 0.05$, Fig. 3). 지상부 생장은 대조구 (19.7 cm)에서 기후변화처리구 (15.8 cm)보다 잘 자라 ($p < 0.05$) 지하부와 지상부 생장은 서로 대조되는 결과를 나타냈다. 잎 수는 7~9장으로 구배 간 차이가 없었다. 신갈나무의 지하부

생장은 기후변화처리구 (22.3 cm)에서 대조구 (15.7 cm)보다 잘 자랐다 ($p < 0.05$, Fig. 4). 지상부 생장은 9.6~10.0 cm로 구배 간 차이가 없었다. 그리고 신갈나무의 잎 수는 약 5장으로 구배 간 차이가 없었다. 갈참나무의 지하부 생장은 대조구 (17.5 cm)에서 기후변화처리구 (12.5 cm)보다 잘 자랐다 ($p < 0.05$, Fig. 5). 지상부 생장은 대조구 (13.0 cm)에서 기후변화처리구 (11.8 cm)보다 잘 자랐다 ($p < 0.05$). 갈참나무의 잎 수는 4~5장으로 구배 간 차이가 없었다. 졸참나무의 지하부 생장은 대조구 (16.9 cm)에서 기후변화처리구 (12.6 cm)보다 잘 자랐다 ($p < 0.05$, Fig. 6). 지상부 생장은 기후변화처리구 (13.9 cm)에서 대조구 (11.8 cm)보다 잘 자라 ($p < 0.05$) 지하부와 대조적이었다. 졸참나무의 잎 수는 4~5장으로 구배 간 차이가 없었다. 떡갈나무의 지하부

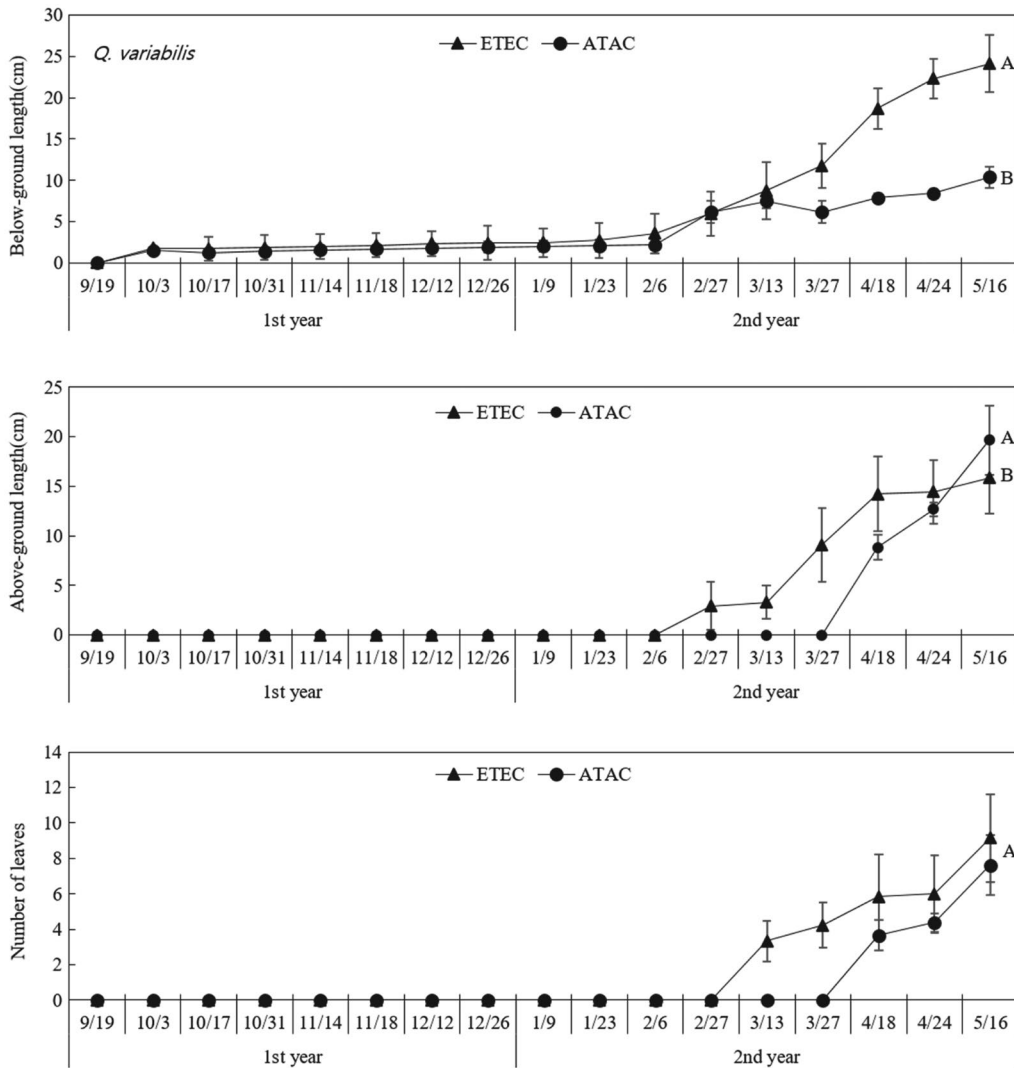


Fig. 3. Initial growth increment (below-ground, above-ground and number of leaves) of *Q. variabilis* seedlings under ETEC and ATAC (The alphabets mean significantly different between ETEC and ATAC, $p < 0.05$).

생장은 기후변화처리구 (21.3 cm)에서 대조구 (16.2 cm)보다 잘 자랐고 ($p < 0.05$, Fig. 7), 지상부 생장은 차이가 없었다. 떡갈나무의 잎 수는 대조구와 기후변화처리구에서 약 3장으로 차이가 없었다. 이 결과들을 정리해 보면, 상수리나무의 성장량은 지하부와 지상부 모두에서 대조구와 처리구 간 차이가 없었으나 잎 수는 기후변화처리구에서 더 많았다. 굴참나무의 지하부 성장량은 기후변화처리구에서 잘 자랐으나 지상부가 못 자랐고 반대로 졸참나무는 기후변화처리구에서 지상부가 잘 자랐으나 지하부는 못 자랐다. 신갈나무와 떡갈나무는 기후변화처리구에서 지하부가 잘 자라는 경향을 나타냈고, 갈참나무는 기후변화처리구에서 지하부와 지상부 모두 못 자라 낙엽성 참나무의 6종의

초기 성장 반응이 서로 다르게 나타났다. 잎 수는 상수리나무만 기후변화처리구에서 더 많았고 다른 모든 종에서 구배 간 차이가 없었다.

위의 결과로 지구온난화 환경에서 신갈나무와 떡갈나무의 초기 생장은 양호한 반면 갈참나무는 부정적이었으며 상수리나무는 큰 영향이 없는 것으로 판단되었다. 이는 온난화 환경에서 상수리나무의 줄기와 뿌리의 성장량의 차이가 없었던 선행연구와 같았다 (Jeong *et al.*, 2010). 또한 CO₂ 농도 및 온도가 높은 온난화 환경에서 신갈나무가 잘 자란 결과와 같았다 (Park *et al.*, 2019). 갈참나무의 경우 6종의 낙엽성 참나무 중 유일하게 지구온난화 환경에서 초기생장이 부정적인 것으로 나타났는데 이 결과는 갈참나

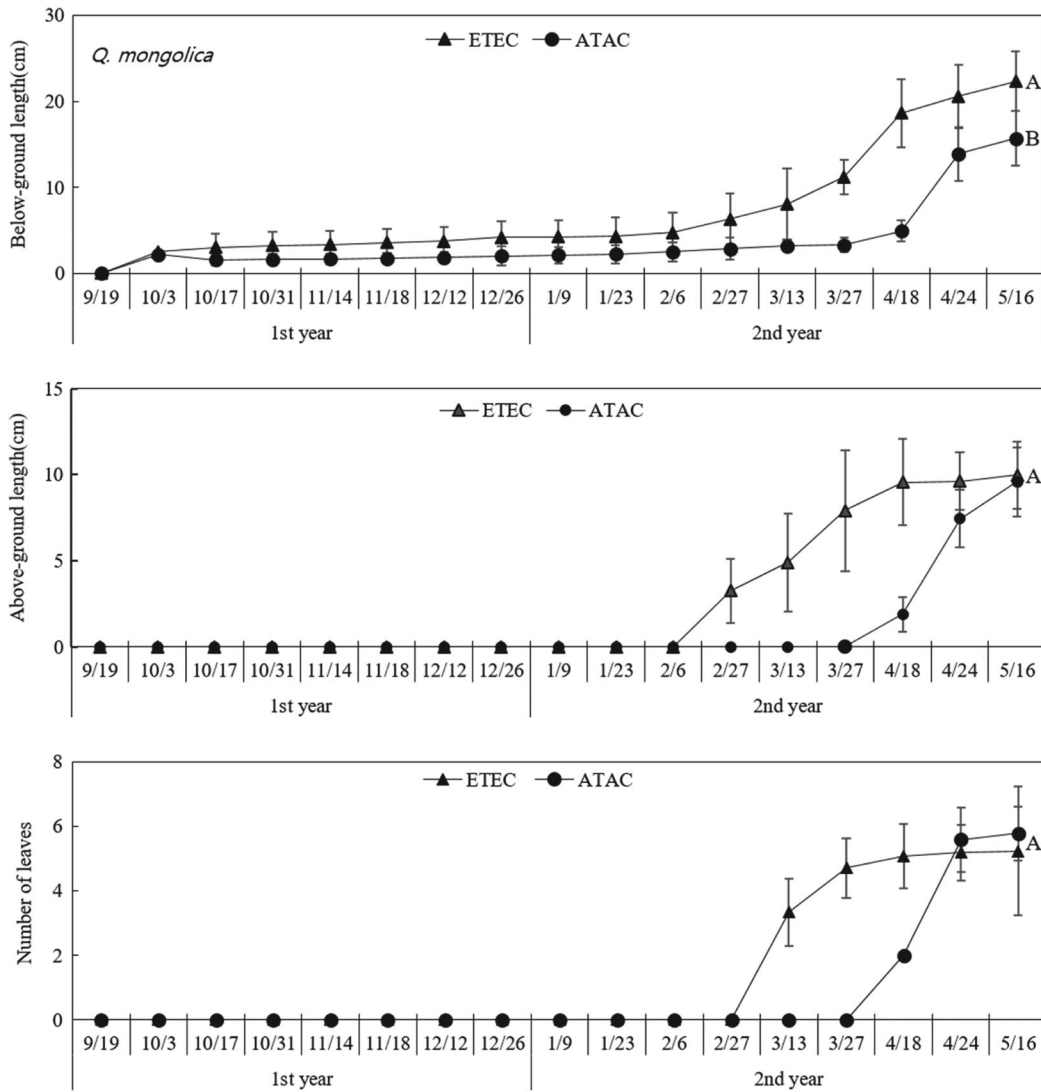


Fig. 4. Initial growth increment (below-ground, above-ground and number of leaves) of *Q. mongolica* seedlings under ETEC and ATAC (The alphabets mean significantly different between ETAC and ATAC, $p < 0.05$).

무의 지상부 생물량이 대조구 환경에서 더 많았던 선행연구와 비슷하였다(Cho *et al.*, 2012). 상수리나무의 잎 수가 온난화 환경에서 증가한 것은 Jeong *et al.* (2010)의 선행연구와 같은 결과를 나타냈다.

3. 기후변화에 의한 참나무 유식물의 영향

환경요소의 변화는 일차적으로 식물의 생리적인 특성에 영향을 주고 이는 식물의 생육과 발달에 영향을 미치게 되므로(Jeong *et al.*, 2018), 지구온난화에 따른 빠른 환경 변화에 의한 식물의 반응을 이해하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 우리나라의 주요 식생대에 영향을 줄 수 있

는 지구온난화 환경에서의 낙엽성 참나무 6종의 초기 성장 반응을 관찰하고자 하였다.

현재까지 전 세계에서 수행된 미래 기후변화 환경에서의 식물의 반응은 다양하다. 북아메리카 자생 참나무인 *Q. alba*는 CO₂ 농도가 증가하는 환경에서 초기 생장이 더 빨라지며 엽면적과 생중량이 비례하여 증가하는 반응을 나타냈고(Norby *et al.* 1995), 고농도의 CO₂ 환경에 노출된 후 첫 1년 동안 테에다소나무의 기저면적이 24%까지 증가하였다(Naidu and Delucia, 1999). 또한 우리나라의 상록성 참나무인 개가시나무의 경우 온난화 처리 3년 후 C:N ratio가 64.60%, 엽록소함량이 23.56% 증가하여 식물체의 생리적 반응에도 영향을 미칠 것으로 예측되었고(Jeong *et*

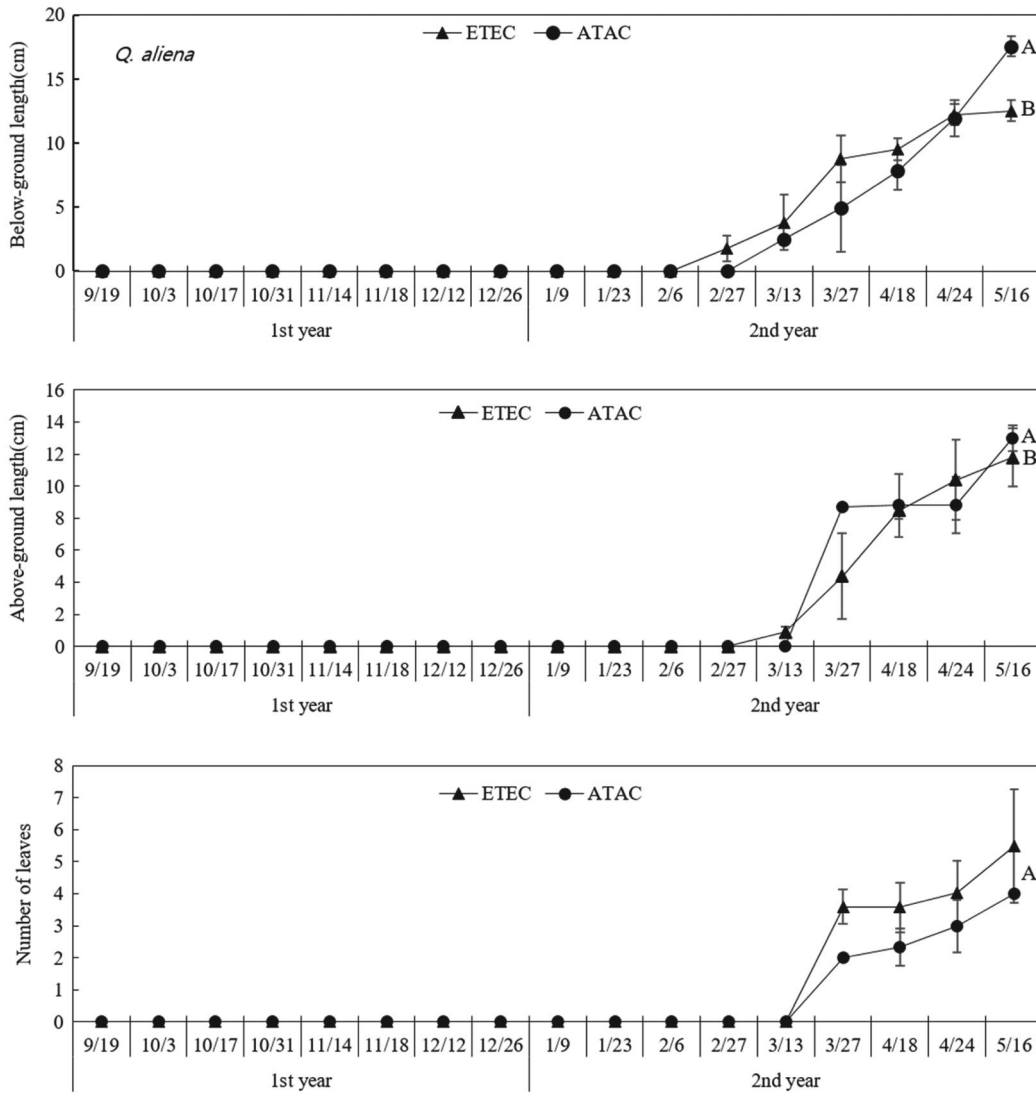


Fig. 5. Initial growth increment (below-ground, above-ground and number of leaves) of *Q. aliena* seedlings under ETEC and ATAC (The alphabets mean significantly different between ETAC and ATAC, $p < 0.05$).

al., 2018), 일반적으로 기온의 증가는 기질의 이용 가능한 방식으로 효소가 분해되는 시점까지 사실상 식물과 토양 내 모든 화학적, 생화학적 진행과정 속도를 증가시키는 것으로 보고되었다(Saxe et al., 2000). 그리고 지구온난화 환경에서 초본식물들의 발아 개시일, 개엽, 꽃대형성, 개화, 열매 성숙시기 등이 빨라지고 잎의 노화시기가 늦춰지는 등의 영향을 미친다(Kim and You, 2010). 이처럼 대기 중 CO₂ 농도와 기온의 증가는 식물체의 생육을 증감시키고 생리적 변화를 유발하며, 생물계절을 빠르게 하고 반면 어떠한 영향도 미치지 않는 것으로(Ghannoum et al., 2010) 나타내, 종마다 갖는 특성이나 분포 등에 따라 연구 결과

가 다양하다.

본 연구에서 낙엽성 참나무 6종은 각각 지구온난화 환경에서 지하부 및 지상부의 출현시기, 개엽시기 등에서 차이를 나타냈다. 신갈나무는 다른 종들과 비교하여 지구온난화 환경에서 지상부 출현 및 개엽시기가 빠르고 지하부의 초기 생장량이 큰 것으로 판단된다. 이는 온난화 환경에서 신갈나무의 발아속도가 빠르고 생장량과 생물량이 증가한 연구 결과(Park et al., 2019)와 비슷하였다. 또한 IPCC SRES A2 시나리오에 따라 2080년경 기온이 약 4.0°C 증가한 환경(Shin and Bae, 2012)에서 지형적 요인 및 기후 요인과 관련된 환경적응 범위가 넓은 신갈나무

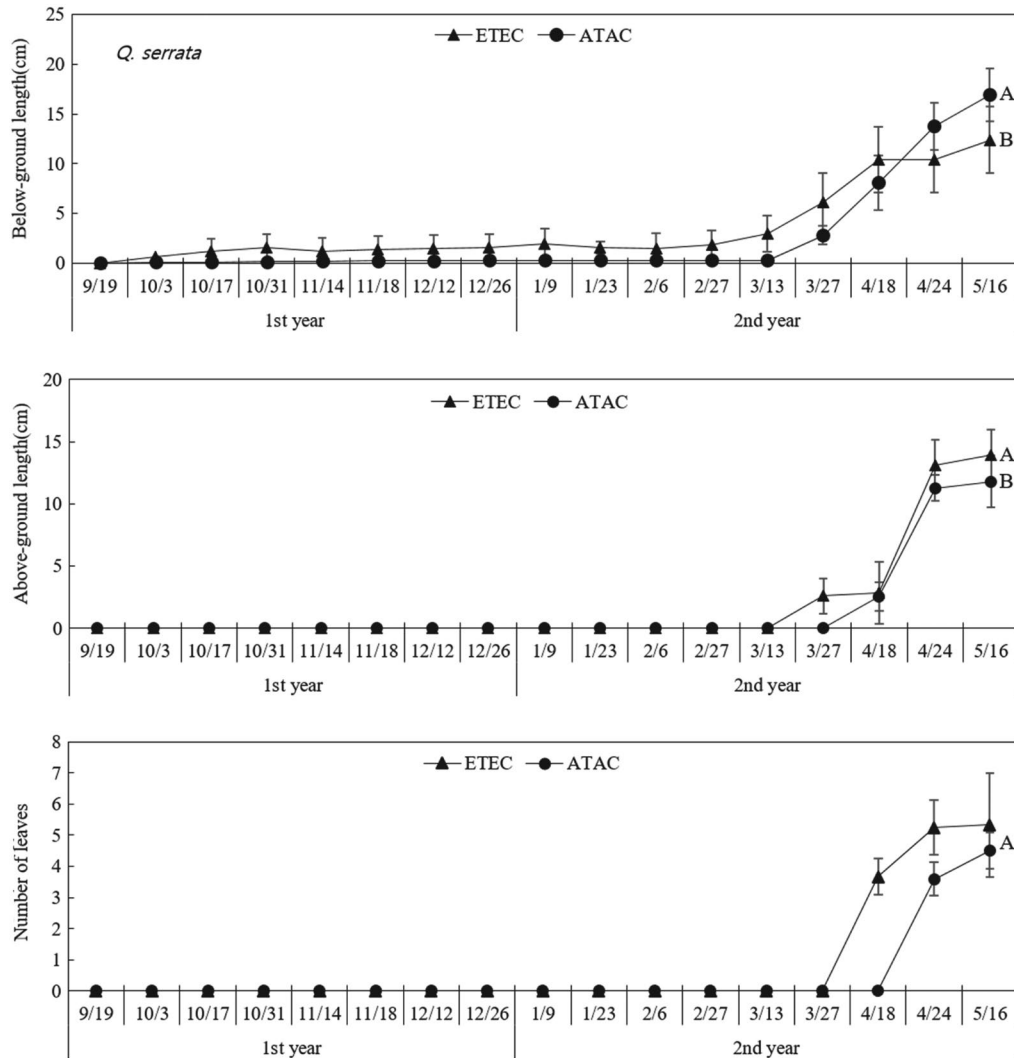


Fig. 6. Initial growth increment (below-ground, above-ground and number of leaves) of *Q. serrata* seedlings under ETEC and ATAC (The alphabets mean significantly different between ETAC and ATAC, $p < 0.05$).

(Lee *et al.*, 2020)는 유식물의 빠른 발아와 생장, 159일의 생육기 연장(Hong *et al.*, 2018) 등의 변화는 신갈나무 유식물의 생육에 긍정적일 것으로 판단된다.

굴참나무와 졸참나무 그리고 떡갈나무는 지구온난화 환경에서 빠른 발아와 지상부의 출현으로 생육이 유리할 것으로 예측되었으나, 반대로 굴참나무의 지상부와 졸참나무의 지하부가 각각 지구온난화 환경에서 생육이 불량하여 한계를 나타냈다. 졸참나무는 선행연구를 통해 지구온난화 환경과 대조구에서 식물체 생물량과 잎의 형태학적 변화에서 차이가 없어(Cho *et al.*, 2012, 2013) 초기생장에 큰 영향이 없는 것으로 판단되었다. 떡갈나무는 본 연구에서 지상부의 출현이 빠르고 지하부 생장이 양호하였으나 환경적응 범위가 매우 좁은 종으로 평가된 바 있어(Lee *et*

al., 2020) 더 많은 연구 결과가 필요하다.

상수리나무는 지구온난화 환경에서 지하부와 지상부의 출현이 빨랐음에도 초기 생장량과 잎의 출현시기에 차이가 없어 지구온난화에 따른 영향이 가장 적은 종이다. 잎 수가 기후변화처리구에서 더 많은 것이 차이점이었다. 상수리나무의 잎 수가 온난화 환경에서 증가하는 것은 Jeong *et al.* (2010)의 연구 결과와 같았다.

갈참나무는 지구온난화 환경에서 지상부와 지하부 출현 시기는 빨랐으나 초기 생장은 불량했으며, 이는 갈참나무의 지상부가 대조구 환경에서 더 잘 자랐던 선행연구와 같았다(Cho *et al.*, 2012). 이러한 결과는 지구온난화 환경에서 갈참나무의 분포역이 줄어들 수 있음을 시사하고 있으며, 미래의 갈참나무 분포범위는 저위도로 북상할 수 있음

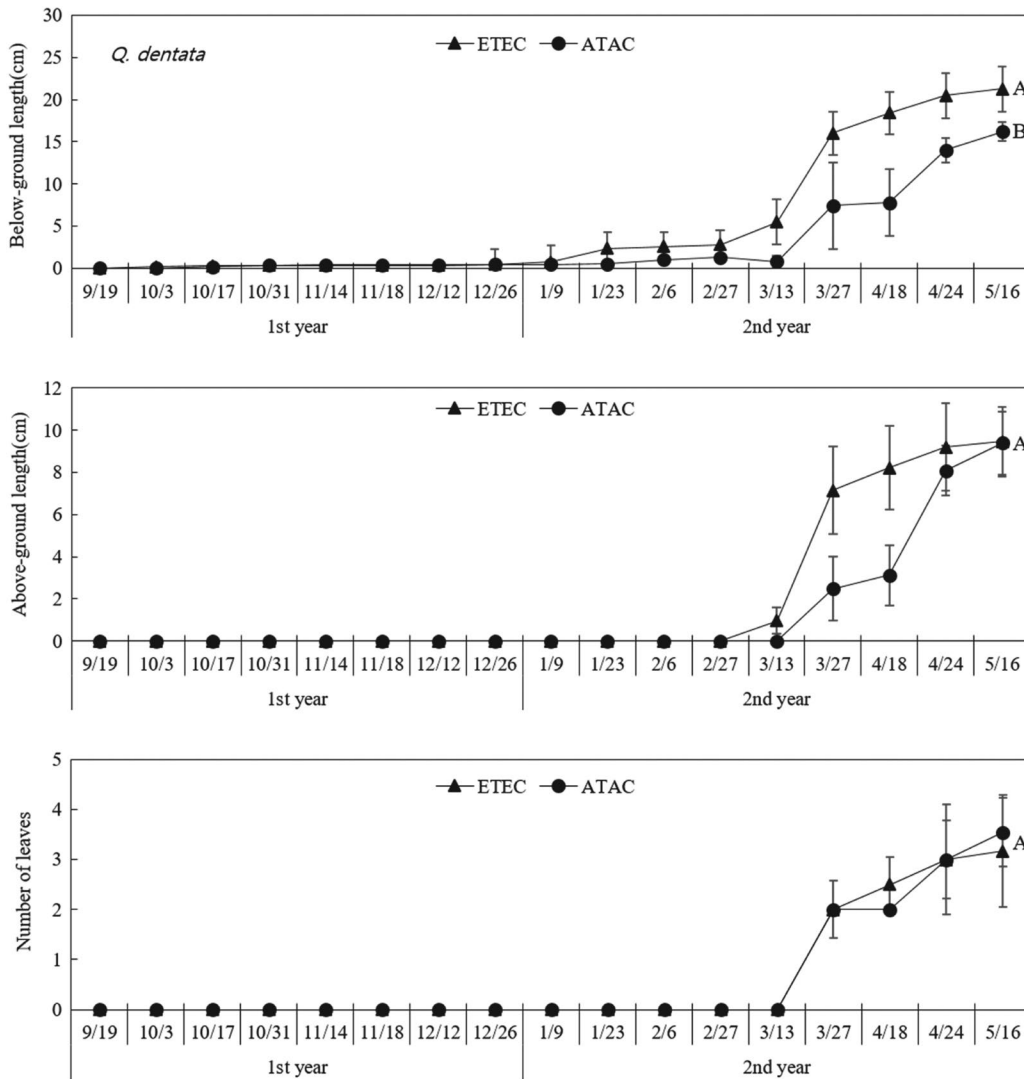


Fig. 7. Initial growth increment (below-ground, above-ground and number of leaves) of *Q. dentata* seedlings under ETEC and ATAC (The alphabets mean significantly different between ETAC and ATAC, $p < 0.05$).

을 보여준다. 한편, 갈참나무의 잎은 지구온난화 환경에서 잎 길이와 잎몸 무게가 증가하고 비엽면적이 감소하는 등 민감하게 반응하여 잎의 형태학적 변화가 크게 일어나는 것으로 연구된 바 있다(Cho *et al.*, 2013). 이러한 기후변화는 기후적인 지위 폭(Ramirez-Preciado *et al.*, 2019)에 영향을 주어 참나무의 지리학적인 분포의 변동을 일으킬 것으로 사료된다(Li *et al.*, 1999; Jeong *et al.*, 2018).

적 요

우리나라 산림 생태계의 주요 우점종인 낙엽성 참나무

6종의 지구온난화에 의한 초기 생장의 영향을 파악하기 위하여, 야외(대조구)와 대조구보다 온도(3.0°C 상승)와 CO₂ 농도(2배 상승)를 증가시킨 기후변화처리구에 종자를 파종하고 2주 간격으로 발아 및 초기 생장을 측정하였다. 그 결과 6종 참나무 유식물들의 지상부와 지하부 출현 시기는 대조구보다 기후변화처리구에서 모든 종이 더 빨랐다. 잎 출현시기는 기후변화처리구에서 굴참나무, 신갈나무 그리고 졸참나무가 빨랐다. 지하부 길이는 기후변화처리구에서 굴참나무, 신갈나무 그리고 떡갈나무가 길었고 상수리나무는 구배 간 차이가 없었으며 갈참나무와 졸참나무는 짧았다. 지상부 길이는 기후변화처리구에서 졸참나무가 길었고, 상수리나무, 신갈나무 그리고 떡갈나무는

차이가 없었으며 갈참나무는 짧았다. 이상의 결과는 지구 온난화 환경에서 지상부와 잎의 출현시기가 빠르고 지하부 생장이 좋은 신갈나무의 초기 생장이 가장 유리함을 나타내었다. 반면, 기후변화처리환경에서 지상부와 지하부의 생장이 가장 낮은 갈참나무는 다른 참나무에 비하여 생육이 불리하였다. 또한 상수리나무는 지구온난화 환경에 따른 초기 생장의 차이가 적어 가장 영향이 적은 나무로 판단된다.

저자정보 정현모(국립생태원 연구원), 김해란(국립생태원 전임연구원), 유영한(공주대학교 교수)

저자기여도 개념설정: 정현모 & 김해란 & 유영한, 방법론: 정현모 & 유영한, 분석: 정현모 & 김해란, 자료관리: 정현모, 원고 초안작성: 정현모, 원고 교정: 정현모 & 김해란 & 유영한, 원고 편집 및 검토: 정현모 & 김해란 & 유영한. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 본 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 본 논문은 국립생태원의 “생태계의 기후변화 리스크에 대응한 적응역량 강화 연구(NIE-C-2021-35)”에 의해 지원되었습니다.

REFERENCES

- Bae, K.H. 2005. Vegetation classification and ecological application of vegetation data in the Keumbong recreational forest. *Journal of Korean Institute of Forest Recreation* 9(2): 1-20.
- Cho, K.T., H.R. Kim, H.M. Jeong, K.M. Lee, T.K. Kim, T.K. Kang and Y.H. You. 2012. Effect of light on the growth responses of *Quercus serrata* and *Q. aliena* to elevated CO₂ and temperature. *Journal of Wetlands Research* 14(4): 597-605.
- Cho, K.T., H.R. Kim, H.M. Jeong and Y.H. You. 2013. Effects of elevated CO₂ and temperature on the leaf morphological responses of *Quercus serrata* and *Quercus aliena*, potential natural vegetation of riverin. *Journal of Wetlands Research* 15(2): 171-177.
- Ghannoum, O., N.G. Phillips, J.P. Conroy, R.A. Smith, R.D. Attard, R. Woodfield, B.A. Logan, J.D. Lewis and D.T. Tissue. 2010. Exposure to preindustrial, current and future atmospheric CO₂ and temperature differentially affects growth and photosynthesis in Eucalyptus. *Global Change Biology* 16: 303-319.
- Hong, Y., S. Lee, S. Lee, E. Lee, E. Kim, J. Park, H. Jeong and Y. You. 2018. The phenological response of leaf of deciduous woody species to base temperature maintenance. *Korean Journal of Ecology and Environment* 51(4): 259-267.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: Impact, adaptation and vulnerability. Working group II contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof P.J. van der Linden and C.E. Hanson eds.). Cambridge University press, Cambridge, New York. pp. 11-37.
- Jang, G.J. 2007. Phytosociological Studies on the *Quercus mongolica* Forest in Korea. Kangwon National University Press. Korea.
- Jeong, H.M., H.R. Kim, S. Hong and Y.H. You. 2018. Effects of elevated CO₂ concentration and increased temperature on leaf quality responses of rare and endangered plants. *Journal of Ecology and Environment* 42: 1.
- Jung, 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*. *Korean Journal of Environmental Ecology* 24(6): 648-656.
- Jung, M.P., K.M. Shim, Y.S. Kim, I.T. Choi and K.H. So. 2014. Trend of climate growing season using average daily temperature (1971~2013) in Suwon, Korea. *Journal of Climate Change Research* 5(4): 285-289.
- Jung, Y.H., J.K. Lee, S.W. Kim, J.S. Baek, K.T. Jo, Y.H. You. 2017. Impact of climate change on the growth of *Quercus dentata* Thunb. ex Murray. *Proceedings of The Korean Society of Environmental Ecology Conference* 27(2): 49.
- Kim, H.R. and Y.H. You. 2010. Effects of elevated CO₂ concentration and temperature on the response of seed germination, phenology and leaf morphology of *Phytolacca insularis* (Endemic species) and *Phytolacca Americana* (Alien species). *Korean Journal of Environmental Ecology* 24(1): 62-68.
- Kim, I.T., M.S. Song and S.H. Jung. 2009. Analysis of distribution and association structure on the sawtooth oak (*Quercus acutissima*) forest in Korea. *Journal of Life Science* 19(3): 356-361.
- Kim, J.U. and B.S. Kil. 2000. The Mongolian Oak Forest in Korea Environment, Vegetation and its Life-. Wonkwang University Press. Korea.
- Lee, S.Y., E.J. Kim, E.P. Lee, K.T. Cho, J.H. Park, Y.K. Lee, S.H. Chung, Y.S. Hong, J.H. Park, S.S. Choi, H.R. Kim and Y.H. You. 2020. Analysis of climate and topographical factors in Korea to select the restoration safe site of 5 dominant oak species. *Korean Journal of Environment and Ecology* 53(4): 427-435.
- Lee, T.B. 2003. Coloured Flora Korea. Hyangmun-sa Press. Korea.
- Li, J.H., P. Dijkstra, C.R. Hinkle, R.M. Wheeler and B.G. Drake. 1999. Photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO₂ concentration in the Florida scrub-oak species *Quer-*

- cus geminate* and *Quercus myrtifolia* growing in their native environment. *Tree Physiology* **19**: 229-234.
- Lim, J.H. 1995. Oaks in our culture. Forest & Culture Press. Korea.
- Matsuda, K. and R. McBride. 1989. Germination characteristics of selected California oak species. *American Midland Naturalist* **122**: 66-76.
- Matsuda, K. 1989. Survival and growth of Konara Oak (*Quercus serrata* Thumb.) seedlings in an abandoned coppice forest. *Ecological Research* **4**: 309-321.
- Ministry of Environment. 2020. Korean climate change assessment report 2020. Korea.
- Naidu, S. and E.H. Delucia. 1999. First-year growth response of trees in an intact forest exposed to elevated CO₂. *Global Change Biology* **5**: 609-613.
- Norby, R.J., S.D. Wullschlegel, C.A. Gunderson and C.T. Nietch. 1995. Increased growth efficiency of *Quercus alba* trees in a CO₂-enriched atmosphere. *New Phytologist* **131**(1): 91-97.
- Park, S., T. Kim, K. Shim, H.Y. Kong, B.G. Yang, S. Suh and C.S. Lee. 2019. The effects of experimental warming on seed germination and growth of two oak species (*Quercus mongolica* and *Q. serrata*). *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**(3): 210-220.
- Ramirez-Preciado, R.P., J. Gasca-Pineda and M.C. Artega. 2019. Effects of global warming on the potential distribution ranges of six *Quercus* species (Fagaceae). *Flora* **251**: 32-38.
- Saxe, H., M.G.R. Cannell, O. Johnsen, M.G. Ryan and G. Vourlitis. 2000. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist* **149**: 369-400.
- Seo, H.H. 2003. Growth and quality of horticultural crops affected by climate change (Focusing to fruit tree). *Proceedings of The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology Conference* **2003**(1): 131-137.
- Seo, H.H., J.K. Kim and S.J. Kang. 2005. Effect of artificial Asian dust spraying on fruiting and qualities in fruit trees. *Proceedings of The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology Conference* **2005** (2): 222-225.
- Shin, S.H. and D.H. Bae. 2013. Future projections of Köppen climate shifts in the Asia regions using A2 Scenario. *Journal of Korea Water Resources Association* **2013**: 253-265.
- Song, M.S. 2007. Analysis of distribution and association structure on the Sawtooth oak (*Quercus acutissima*) Forest in Korea. Changwon National University. Korea.
- Sung, J.W. and K.H. Kim. 2018. Changes of flowering time affected by climate change in the subalpine region of Mt. Gaya. *Journal of Agriculture & Life Science* **52**(1): 13-23.
- World Meteorological Organization. WMO Statement on the state of the global climate in 2019. Geneva, Switzerland.