

기후변화 지표종 구상나무(*Abies koreana* E. H. Wilson)의 생태학적 반응

김윤서* · 김세희** · 이정민* · 박지원* · 박여빈* · 박재훈* · 김의주* · 조경미* · 최윤경* · 서지현* ·
서주현* · 김규리* · 이주선* · 유도훈* · 김민선* · 유영한**

*공주대학교 생명과학과

**국립생태원 복원생태팀

The ecological response of the climate change indicator species, Korean fir (*Abies koreana* E. H. Wilson)

Yoon Seo Kim* · Se Hee Kim** · Jung Min Lee* · Ji Won Park* · Yeo Bin Park* · Jae Hoon Park* · Eui Joo Kim* ·
Kyeong Mi Cho* · Yoon Kyung Choi* · Ji Hyun Seo* · Joo Hyun Seo* · Gyu Ri Kim* · Ju Seon Lee* · Do Hun Ryu* ·
Min Sun Kim* · Young Han You**

*Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea

**Ecological Restoration Team, National Institute of Ecology, Korea

(Received : 22 January 2024, Revised : 13 February 2024, Accepted : 13 February 2024)

요약

기후변화조건에서 구상나무의 생태적 변화를 파악하기 위해 5년 동안 대조구(야외)와 RCP 4.5에 근접하게 온도 및 CO₂를 상승시킨 기후변화처리구에서 생육 및 생리적 반응을 분석하였다. 그 결과, 기후변화처리구에서 구상나무의 년생별 가지 길이는 시간이 지날수록 증가하는 경향이 나타났다. 그리고 기후변화 조건은 구상나무 잎의 형태적 차이에는 큰 영향을 주지 않지만, 잎의 생물량에는 영향을 주어, 기후변화가 진행될수록 구상나무의 잎 생산성이 저하될 것으로 예상되었다. 한편, 기후변화 조건에서 구상나무의 엽록소 함량은 기후변화처리구에서 높은 반면, 광합성률, 기공전도도, 증산율, 그리고 수분이용효율은 대조구가 더 높게 나타났다. 이는 온도와 CO₂가 상승된 환경이 기공밀도 증가에 영향을 줄 수 있으나, 광합성 반응에는 부정적 영향을 주는 것으로 예상된다. 향후 이를 확인하기 위해 각각의 환경 처리에서 기공 밀도에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서는 잎의 생물량 변화만 관찰하였기 때문에 기후변화 조건 하에서 구상나무의 생물량 변화에 대한 추가적인 실증 연구가 고려되어야 할 것으로 사료된다. 결과적으로 장기간 상승된 온도와 CO₂에서 구상나무의 환경 적응력은 약화될 것으로 판단된다.

핵심어 : 주성분 분석, 엽록소 함량, 소지, 잎 생물량, 광합성률

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Biological Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea

E-mail : youeco21@kongju.ac.kr

- Yoon Seo Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (201502761@smail.kongju.ac.kr)
- Se Hee Kim Ecological Restoration Team, National Institute of Ecology, Korea / Researcher (ksh0720@nie.re.kr)
- Jung Min Lee Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (ljm@smail.kongju.ac.kr)
- Ji Won Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (ecopark@kongju.ac.kr)
- Yeo Bin Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (pyb1994@smail.kongju.ac.kr)
- Jae Hoon Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Ph.D. (kn5314@smail.kongju.ac.kr)
- Eui Joo Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Ph.D. (euijoo@kongju.ac.kr)
- Kyeong Mi Cho Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (whrudal77@smail.kongju.ac.kr)
- Yoon Kyung Choi Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (yoonkyung@smail.kongju.ac.kr)
- Ji Hyun Seo Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (vnd1229@smail.kongju.ac.kr)
- Joo Hyun Seo Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (sjh2584@smail.kongju.ac.kr)
- Gyu Ri Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (gyuri128@smail.kongju.ac.kr)
- Ju Seon Lee Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Graduate student (wntjs2433@smail.kongju.ac.kr)
- Do Hun Ryu Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / University student (dohoonnara@smail.kongju.ac.kr)
- Min Sun Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Professor (mskim0825@kongju.ac.kr)
- Young Han You Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea / Professor (youeco21@kongju.ac.kr)

Abstract

To assess the ecological changes of Korean fir (*Abies koreana* E. H. Wilson) under climate change conditions, growth and physiological responses were analyzed over a 5-year period in a control group (outdoors) and in a treatment group where the temperature and CO₂ levels were elevated to closely resemble RCP 4.5 conditions. The results showed an increasing trend in annual branch length of *A. koreana* in the climate change treatment group over time. While climate change conditions did not significantly impact the morphological differences of *A. koreana* leaves, they did influence the biomass of the leaves, suggesting that as climate change progresses, the productivity of *A. koreana* leaves may decline. On the other hand, the chlorophyll content in *A. koreana* under climate change conditions was higher in the climate change treatment group, whereas the photosynthesis rate, transpiration rate, water use efficiency and stomatal conductance was higher in the control group. This suggests that an environment with elevated temperature and CO₂ could influence an increase in stomatal density, but having a negative impact on photosynthetic reactions. Further research on stomatal density under each environmental treatment will be required to confirm this hypothesis. Additionally, as this study only observed changes in leaf biomass, further empirical research should be considered to understand the changes in biomass of *A. koreana* under climate change conditions. In conclusion, the environmental adaptability of *A. koreana* is expected to weaken in the long term under elevated temperatures and CO₂.

Key words : PCA, Chlorophyll content, Twig, Leaf biomass, Photosynthetic rate

1. 서론

세계기상기구(WMO)는 최근 5년간 전지구 연평균 기온이 산업화 이전 수준보다 1.1도에서 최대 1.7도까지 상승할 것으로 예측하였다(WMO, 2022). 또한, IPCC는 UNFCCC의 제26차 당사국총회(COP26)에서 인위적으로 배출한 CO₂는 2019년까지 지속적으로 증가하였으며, 전지구 온난화로 인해 2100년에는 기온이 2.2°C에서 최대 3.5°C까지 상승될 것이라 전망하였다(IPCC, 2022). 한편, 2021년 기준 전 세계의 대기 중 CO₂ 농도는 약 410ppm 수준으로 나타났고, 2022년에는 일부 지역에서 최대 430ppm 수준까지 나타나면서 지속적으로 증가되고 있는 추세이다(WMO, 2022).

한반도는 세계의 다른 지역보다 기온 상승세가 가파르게 진행되었고, 추세가 지속될 경우 전 지구 평균 기온보다 0.7°C 상승될 것으로 예측되었다(Shin and Jung, 2015). 이로 인해 한반도의 고산대와 아고산대에 고립되어 나타나는 종, 분포범위가 좁거나 기후변화에 민감한 종과 같이 환경의 변화에 상대적으로 취약한 식물종이 지구온난화로 인해 분포 면적이 감소될 것으로 전망되고 있다(Kong et al., 2014).

구상나무(*Abies koreana* E. H. Wilson)는 한국의 고유종이자 대표적인 기후변화 지표종으로 분포지역은 지리산, 한라산, 덕유산, 가야산 등의 고산 및 아고산 지대에 매우 제한적으로 분포하는 것으로 알려져 있다(Kim and Lee, 2013; Kim et al., 2011). 또한, 국제자연보호연맹(IUCN)에 의해 멸종위기종(EN, Endangered)으로 지정되기도 하며 향후 야생에서 절멸할 가능성이 높은 것으로 보고된 바 있다(Kim et al., 2011). 한편, 기후변화 지표종은 생물다양성에도 기여하며 잠재적으로 경제적 중요성을 가지는데(Lee et al.,

2010), 구상나무의 주요 균락인 한라산 구상나무림은 1990년~2000년까지 기간 동안 약 1900만 달러의 생태계서비스 손실이 발생된 것으로 추정되었다(Choi and Lee, 2018). 또한 구상나무는 최근 수십년간 아고산지역에서 기후변화로 인해 감소하고 있으며(Kim and Lee, 2013), 미래로 갈수록 분포 면적이 줄어들 것으로 예상된다(You et al., 2020).

식물 종에 따라 대기 중 CO₂ 농도와 온도 상승이 성장과 발달에 긍정적인 영향을 미치기도 한다(Barbour et al., 2015; Jang et al., 2013). CO₂는 광합성의 필수 요소로 대기 CO₂ 농도가 증가할수록 광합성 반응이 증가되고 이로 인해 식물의 생육이 증대될 수 있고(Han and Shin, 2019; Jang et al., 2013; Leadley et al., 1999), 온도 상승은 고지대 식물의 성장과 분포 범위를 확장시키기도 한다(Perfors et al., 2003). 하지만 증가된 CO₂에 대한 다양한 반응과 스트레스와의 상호 작용은 식물종마다 상당한 변동성을 나타내기 때문에 기후 및 환경과의 상호 작용에 대한 이해 향상에는 성숙한 나무를 대상으로 한 장기적인 실험이 요구된다(Saxe et al., 1998; Shaw et al., 2002).

현재까지 구상나무에 관한 국내의 생태학적 연구로 구상나무 분포 예측, 서식지 환경 특성, 서식지 감소 및 감소 원인을 찾는 연구들이 활발히 수행되고 있다(Kim et al., 2017; Koo and Kim, 2014; Koo et al., 2016; Koo et al., 2001; Song et al., 2010). 이처럼 다년간 수행된 다양한 연구에도 불구하고 현재의 기후변화 환경에서 구상나무의 생육 쇠퇴 및 고사를 유발한 원인에 대한 실증적인 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 기후변화처리와 대조구에서 아고산 식물인 구상나무의 유식물을 4년간 키우면서 나타나는 생육 및 생리적 반응을 상호비교하여 기후변화가 이 종의 생태적 반응에 미치는 영향을 알아보고자 시도되었다.

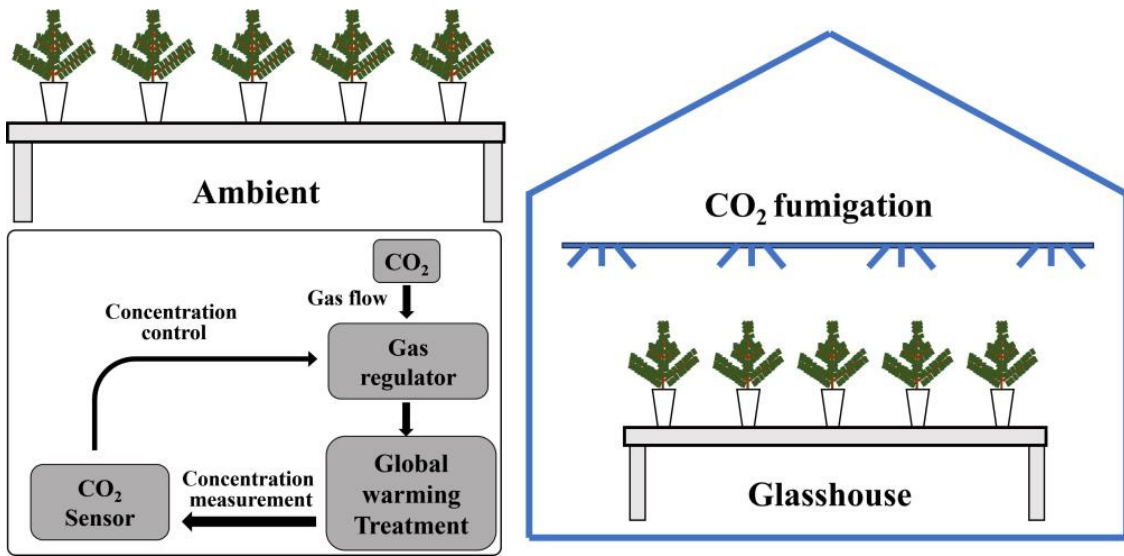


Fig. 1. Schematic diagram of glasshouse(right) with *A. koreana* under climatic change treatment(lower left) and control(upper left).

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

실험에 사용한 구상나무(*Abies koreana* E. H. Wilson)는 2015년 국립산림과학원 난대야열대연구소에서 분양 받은 3년생 유식물이다. 크기가 유사한 유식물을 2017년 3월에 지름 24cm, 높이 23.5 cm 화분에 하나씩 심고, 각 처리구 별로 5개의 화분을 배치하여(Fig. 1) 2021년 12월까지 처리하였다.

2.2 기후변화 처리

기후변화처리는 기후변화처리구 (climate change treatment, treatment)와 대조구 (ambient condition, control)의 2개 공간으로 나뉘어진 유리로 된 폐쇄형 온실 (12m×7.8m ×5m)에서 진행하였으며, 연평균 기온이 현재 대비 21세기 말에 평균온도 2.1°C 상승 (CO₂농도 540ppm) 할 것으로 예측하는 RCP 4.5 시나리오 (IPCC, 2014)를 기반으로 하였다.

기후변화 실험은 대조구(control)와 환경 조건 통제가 가능한 유리온실에서 온도와 CO₂를 상승시킨 기후변화처리구(treatment)로 구분하여 2017년부터 2021년까지 5년간 수행하였다. 실험기간 동안 대조구의 평균 대기 온도는 18.5±0.9°C였고, 기후변화처리구는 22.4±0.9°C로 대조구보다 평균 약 3.9°C 높게 처리하였다(Fig. 2a). 그리고 대조구의 평균 CO₂ 농도는 390.9±12.9ppm였고, 기후변화처리구는 491.3±11.9ppm로 대조구보다 약 100ppm 높게 처리하였다(Fig. 2b). 이러한 기후변화처리구의 환경 조건은 IPCC RCP 4.5 시나리오(온도 2.4도 상승, CO₂ 농도 540ppm)에 가장 근접한 것이다(Stocker et al., 2014).

온도는 환풍기와 해가림막을 통해 조절하였으며, 각 유식물이 위치한 지상 30cm 높이에 온도 데이터 로거(Thermo recorder TR-710, T&D)를 설치하여 10분 단위로 모니터링하였다(Fig. 2a). CO₂ 가스는 처리구 안에 액화 탄산가스(용량 4kg) 2개를 설치하여 호스를 이용해 분사하였으며, Gas regulator를 이용해 처리구의 CO₂ 농도를 조절하였다. 조절한 이산화탄소 농도는 이산화탄소 농도 모니터링 장치

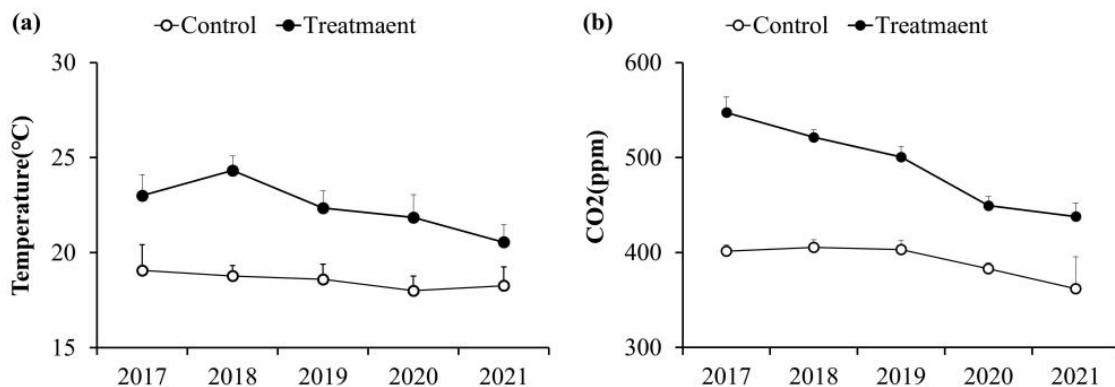


Fig. 2. Annual average of temperature(a) and CO₂ concentration(b) in control and climate change treatment.

(Telair 7001, on set computer, USA)를 이용해 10분 단위로 모니터링하였다(Fig. 2b).

온도와 CO₂ 외에 환경 조건을 동일하게 하기 위해 광은 자연광을 사용하였고, 토양은 동일한 입자 크기(2mm)의 모래에 유기질비료((주)효성오앤비)를 5% 섞음으로 처리하였다. 수분 공급은 화분의 포장용수량(carrying water capacity)을 고려하여 700 ml의 물을 3~4일 간격으로 오전 9시경에 공급하였다.

2.3 생육 및 생리 반응 측정

생육의 측정은 생육기 말인 1월에 매년 소지 길이(cm, twig length; tl), 1-3년생 칩엽의 수분함량(%), moisture content of leaf; mcl), 건조량(g, leaf dry mass; ldm), 잎몸 길이(mm, leaf length; ll) 그리고 잎폭 길이(mm, leaf width; lw)를 각각 측정하였다.

매년 자란 소지의 (cm)는 개체마다 2017년도에 처음 나온 가지(5년생)부터 2021년도에 처음 나온 가지(1년생)까지 개체마다 정단부1개와 가지 2개에서 총 7개씩 측정하였다. 잎의 수분함량(%)은 생중량(g)에서 건조량(g)은 땀 후 백분율로 계산하였다. 이 때, 잎의 생중량은 매년 개체마다 잎 7장을 수확하여 식물체에 있는 먼지 등을 완전히 제거한 후 전자저울(UX400H)을 이용하여 무게를 측정하였고, 건조량(g)은 65°C 건조기에서 48시간 건조시킨 후 무게를 측정하였다.

엽록소 함량(mg·m², chlorophyll content; chl)은 개체마다 가지의 상중하에서 각각 잎 3장을 선정하여 엽록소함량측정기(CCM-300, Chlorophyll Content Meter, OPTI-SCIENCES)를 이용하여 측정하였다. 그리고 광합성 반응은 일사량이 광포화점보다 높은 오전 10시부터 오후 2시 사이에 광합성측정기(Lci, Ultra Compact Photosynthesis System, ADC, UK)를 이용하여 2021 당해 년도 잎의 광합성률(μmol m⁻²s⁻¹, a), 증산율(mmol m⁻²s⁻¹, e), 기공전도도(mol m⁻²s⁻¹, gs), 수분이용효율(μmol CO₂ mmol H₂O⁻¹), wue)을 측정하였다.

2.4 통계 분석

대조구와 기후변화처리구에서 자란 구상나무의 생태적 반응은 샘플수를 고려하여 비모수 Kruskal-Wallis test를 통해 비교 분석하였다. 또한 주성분 분석(principal component analysis, PCA)을 통해 환경 조건과 생육 및 생리 변수 간의 상호관계를 파악하였다(Noh and Chung, 2002). 이상의 통계분석은 STATISTICA 7 프로그램(Statsoft Co. 2008)을 사용하였다.

3. 결과

3.1. 소지 길이

구상나무의 소지길이는 실험을 시작한 초기 3년(2017-2019) 동안에는 대조구와 처리구간에 차이가 없었으나 4년 차부터는 차이가 있게 나타났다(Fig. 3).

대조구와 기후변화처리구 간 구상나무(*A. koreana*)의 매년 자라는 소지 길이(cm)는 2019년생 가지 길이를 제외하고는 기후변화처리구가 대조구보다 더 높은 경향을 보였다(Fig. 3). 2017년의 소지 길이는 기후변화처리구(7.92±2.81)에서가 대조구(6.52±2.34)보다 약 1.2배, 2018년의 소지 길이는 기후변화처리구(9.82±3.67)에서가 대조구(6.12±3.32)보다 약 1.6배높았으나 통계적인 차이가 없었다. 2020의 소지 길이는 기후변화처리구(7.66±1.41)에서가 대조구(6±1.04)보다 약 1.3배, 2021년의 소지 길이는 기후변화처리구(9.2±2.12)에서가 대조구(7.35±1.62)보다 약 1.3배 높았고, 모두 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Fig. 3). 반면, 2019년생 가지 길이는 대조구(5.93±1.03)에서가 기후변화처리구(4.81±1.55)보다 약 1.2배 높았으나 통계적으로 차이가 없었다(Fig. 3).

3.2 잎 형질

2019년생부터 2021년생까지 기후변화처리구와 대조구 간 구상나무의 잎의 수분함량(%)은 2020년생 잎에서는 차이

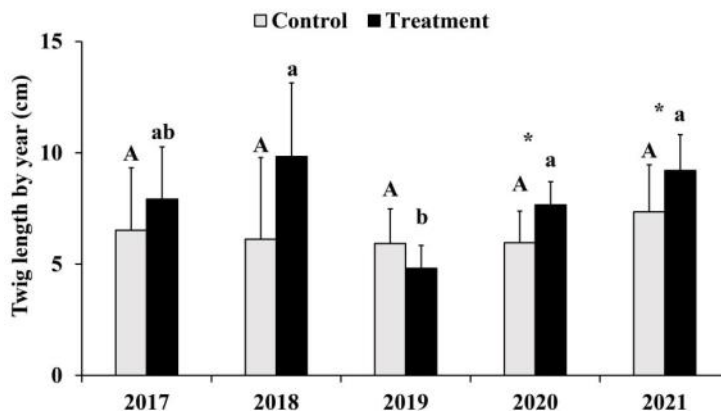


Fig. 3. Current twig length of *A. koreana* by year in control and climate change treatment. Letters on the bars indicate significant differences among year ($p < 0.05$). The asterisks between the bars signify significant differences between the control and the climate change treatment within year ($p < 0.05$).

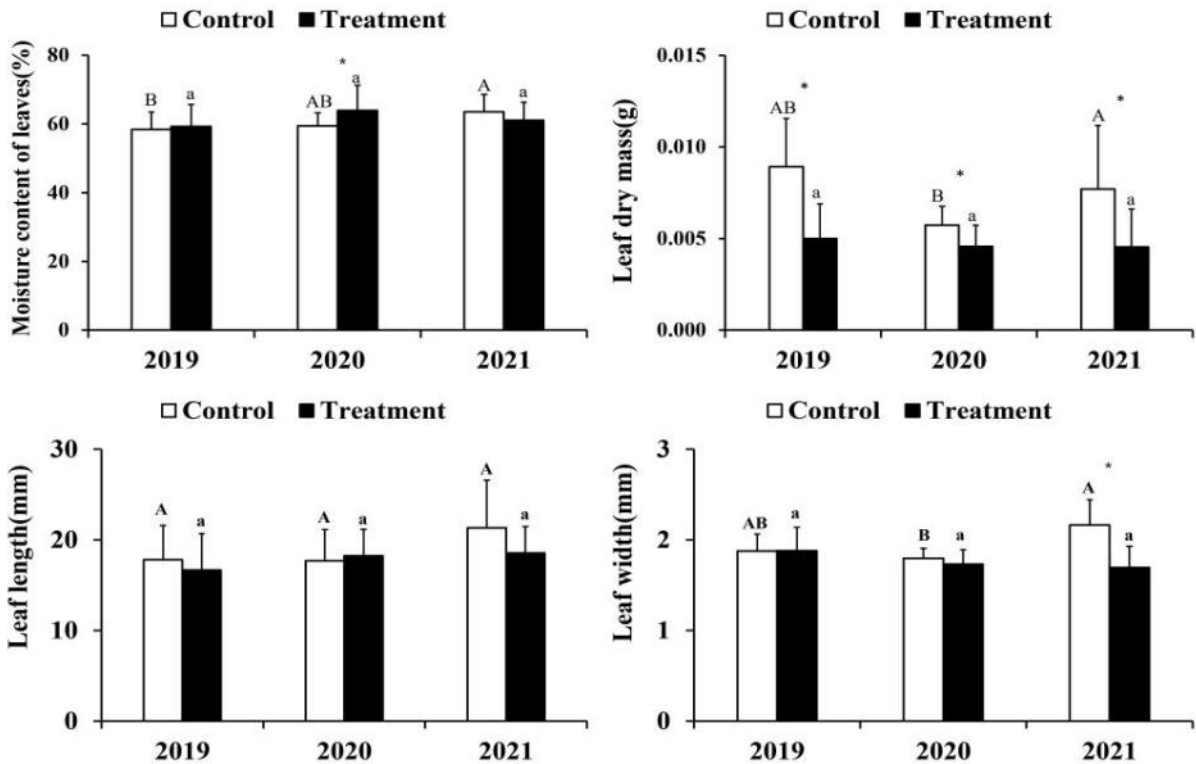


Fig. 4. Yearly growth response of leaves of *A. koreana* in control and climate change treatment. Moisture content of leaves (a), Leaf dry mass (b), leaf length (c), and leaf width (d). Letters on the bars indicate significant differences among years ($p < 0.05$). The asterisks between the bars signify significant differences between the control and the climate change treatment within year ($p < 0.05$).

를 보였고, 나머지는 기후변화처리구(63.93 ± 7.39)에서가 대조구(59.47 ± 3.75)보다 약 1.1배 높았다(Fig. 4a).

잎 건조량(g)은 모든 나이의 잎(2019~2021년생)에서 대조구가 기후변화처리구보다 더 무거웠다(Fig. 4b). 2019년생 잎 건조량은 대조구(0.008 ± 0.003)에서가 기후변화처리구(0.005 ± 0.002)보다 약 1.5배, 2020년생은 대조구(0.006 ± 0.001)에서가 기후변화처리구(0.005 ± 0.001)보다 약 1.3배, 2021년생 잎 건조량은 대조구(0.009 ± 0.003)에서가 기후변화처리구(0.005 ± 0.002)보다 약 2배 높았다(Fig. 4b).

잎몸 길이(mm)는 2021년생에서 가장 길게 나타났고, 대조구의 2021년생 잎몸 길이(21.303 ± 5.278)는 2019년생(17.801 ± 3.792)이나 2020년생(17.669 ± 3.434)에 비해 약 1.2배 높았지만 통계적으로 차이는 없었다(Fig. 4c). 또한 잎몸 길이가 가장 길었던 2021년생에서도 대조구(21.303 ± 5.278)에서가 기후변화처리구(18.537 ± 2.922)보다 약 1.1배 높았으나 통계적으로 차이가 없었다(Fig. 4c).

잎폭 길이(mm)는 잎몸 길이와 유사한 경향을 보였다(Fig. 4c-4d). 잎폭 길이는 대조구의 2021년생에서 가장 길게 나타났고, 2019년생(1.877 ± 0.184)과 2020년생(1.794 ± 0.112)에서보다 약 1.2배 길었고, 2020년생과만 차이가 나타났다(Fig. 3d). 한편, 2021년생 잎폭 길이는 대조구(2.163 ± 0.279)에서가 기후변화처리구(1.694 ± 0.232)보다 약 1.3배 길었다(Fig. 4d).

3.3. 엽록소 함량

대조구와 기후변화처리구 간 구상나무의 년생별 잎의 엽록소 함량($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)은 모든 년생이 대조구보다 기후변화처리구에서 더 높게 나타났다(Fig. 5). 2020년생 엽록소 함량은 기후변화처리구(315.53 ± 30.63)에서가 대조구(109.2 ± 31.36)보다 약 2.9배 높았고, 2021년생은 기후변화처리구(243.47 ± 25.3)에서가 대조구(183.67 ± 44.59)보다 약 1.3배 높았으며, 2019년생은 기후변화처리구(241.08 ± 30.6)에서가 대조구(82.75 ± 33.66)보다 약 2.9배 높았다(Fig. 5).

3.4 생태 생리적 반응

대조구와 기후변화처리구 간 구상나무의 광합성 반응을 비교한 결과, 대조구가 기후변화처리구보다 4가지 요인에서 모두 높게 나타났다(Fig. 6). 광합성률은 대조구(1.08 ± 0.07)에서 기후변화처리구(1.99 ± 0.13)보다 약 1.8배 더 높게 나타났다(Fig. 6a). 이러한 결과는 고산식물인 구상나무의 경우, 낮은 온도에서 높은 광합성률을 보였다는 기존의 결과와도 일치했다(Lim et al., 2006). 또한, 증산율은 대조구(0.29 ± 0.01)에서 기후변화처리구(0.18 ± 0.01)보다 약 1.7배 더 높았고, 수분이용효율은 대조구(6.91 ± 0.25)에서 처리구(6.20 ± 0.58)보다 약 1.1배 더 높았으며, 기공전도도도 대조구(0.02 ± 0.002)에서 기후변화처리구(0.01 ± 0.002)보다 약 1.8배 더 높게 나타났다(Fig. 6b-6d).

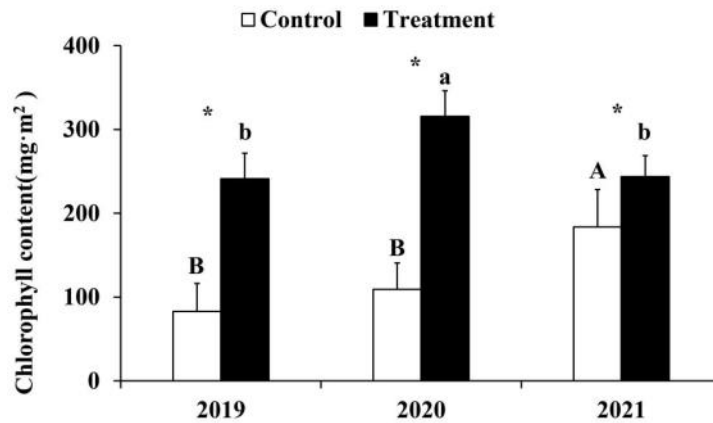


Fig. 5. Chlorophyll content of leaves from branches by year of *A. koreana* in control and climate change treatment. Letters on the bars indicate significant differences among year ($p < 0.05$). The asterisks between the bars signify significant differences between the control and the climate change treatment within year ($p < 0.05$).

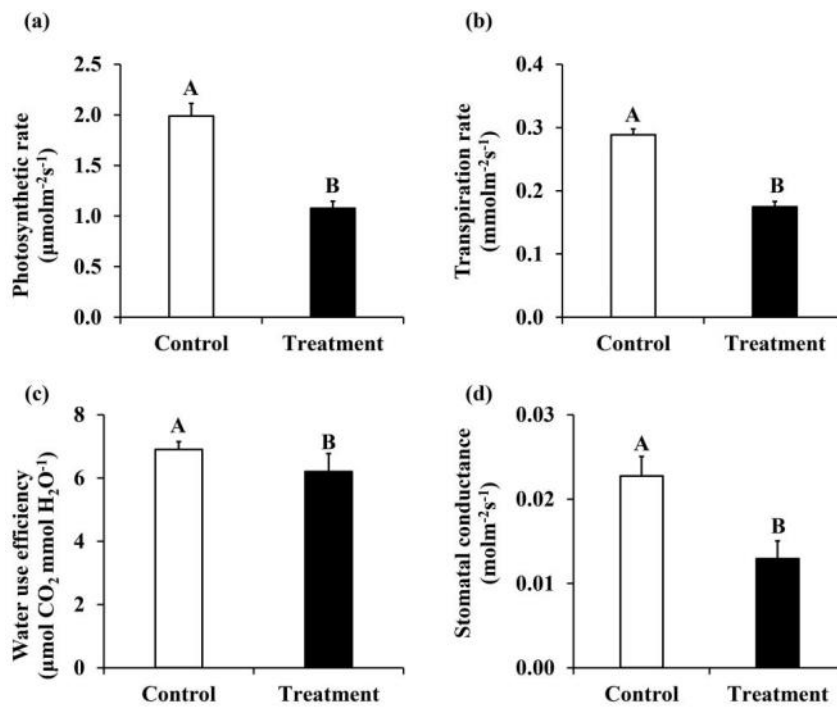


Fig. 6. Physiological responses of *A. koreana* in control and climate change treatment. Photosynthetic rate (a), transpiration rate (b), water use efficiency (c), and stomatal conductance (d). Letters on the bars indicate significant differences between control and climate change treatment ($p < 0.05$).

3.5 주성분 분석(principal component analysis, PCA)

구상나무의 생육 및 생리 생태반응은 기후변화조건과 대조구 간에 뚜렷하게 다르게 나타났다. 기후변화처리구에서 구상나무의 개체들의 생육 및 생리반응은 대조구의 것보다 더 좁게 분포하였다. 이는 기후변화조건에서는 구상나무가 생태적으로 볼 때 불리하게 영향을 받음을 의미한다. 한편 기후변화조건이 되면 2년생 잎의 수분함량, 2년차 소지길이, 2년생과 3년생 잎의 엽록소 함량과 같은 형질이 크게 영향을 받는 반면(그림7의 오른쪽 상단), 잎의 건조량, 1년생 잎 폭 길이, 3년차 소지길이, 증산율, 기공전도도와 같은

형질들은 대조구 조건에서 안정적으로 반응하였다(그림 7의 왼쪽 중앙에서 하단). 1, 4, 5년차 소지길이, 1년생 잎의 엽록소 함량, 1, 2, 3년생 잎 몸 길이, 1년생과 3년생 잎의 건조량, 광합성률과 수분이용효율이 중앙에 분포하였다. 두 구배의 분포면적은 대조구 개체들이 기후변화처리구에 비해 더 넓게 나타났으나, 대조구에 비해 기후변화처리구에 많은 형질이 인접하게 나타났다(Fig. 7). 이러한 결과는 두 구배의 생태학적 반응이 어떤 핵심적인 소수의 형질에 의한 것이 아니라, 식물체의 여러 다양한 형질이 종합적으로 관여하고 있음을 의미한다. 한편, 요인 1과 상관성이 높은 변수는 15가지였고, 요인 2와 상관성이 높은 변수는 10가

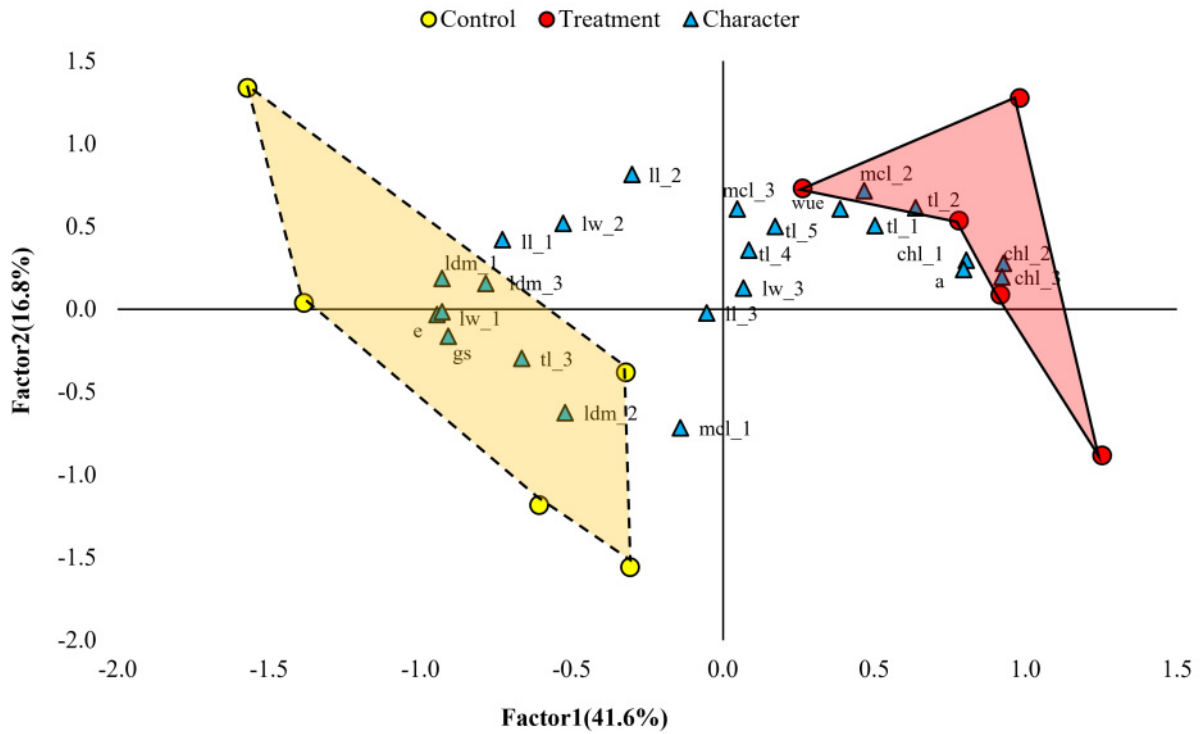


Fig. 7. Principal components analysis results of 10 variables (triangle) and each *A.koreana* individuals (circular) of growth and physiological responses of *A.koreana* in climate change treatment group (red circle) and control group (yellow circle). Abbreviations refer to table 1.

Table 1. Correlation matrix of 24 variables with the first and two principle component scores of PCA analysis. (Statistically significant factors with values greater than 0.5 are marked in*)

Variables	Abbreviation	Factor	
		I	II
2021year Twig length(cm)	tl_1	0.50*	0.51*
2020year Twig length(cm)	tl_2	0.64*	0.61*
2019year Twig length(cm)	tl_3	-0.67*	-0.30
2018year Twig length(cm)	tl_4	0.09	0.36
2017year Twig length(cm)	tl_5	0.17	0.50*
2021year Chlorophyll content(mg·m2)	chl_1	0.80*	0.30
2020year Chlorophyll content (mg·m2)	chl_2	0.93*	0.28
2019year Chlorophyll content (mg·m2)	chl_3	0.92*	0.19
2021year Moisture content of leaf(%)	mcl_1	-0.14	-0.72*
2020year Moisture content of leaf(%)	mcl_2	0.47	0.72*
2019year Moisture content of leaf(%)	mcl_3	0.05	0.61*
2021year Leaf dry mass(g)	ldm_1	-0.93*	0.19
2020year Leaf dry mass(g)	ldm_2	-0.52*	-0.62*
2019year Leaf dry mass(g)	ldm_3	-0.78*	0.16
2021year Leaf length(mm)	ll_1	-0.73*	0.42
2020year Leaf length(mm)	ll_2	-0.30	0.81*
2019year Leaf length(mm)	ll_3	-0.05	-0.02
2021year Leaf width(mm)	lw_1	-0.95*	-0.03
2020year Leaf width(mm)	lw_2	-0.53*	0.52*
2019year Leaf width(mm)	lw_3	0.07	0.13
E(Transpiration rate)	e	-0.93*	-0.02
gs(Stomatal conductance)	gs	-0.91*	-0.16
A(Photosynthetic rate)	a	0.80*	0.24
WUE(Water use efficiency)	wue	0.39	0.61*
Expl.Var		9.76	4.83
Prp.Totl		0.39	0.19

지였다(Table 1). 특히, 수분이용효율을 제외한 4가지 생리 변수(엽록소 함량, 광합성률, 증산율, 기공전도도)는 요인1에 높은 상관성을 보였다(Fig. 7, Table 1). 생리 변수간의 상관관계는 대조구에서는 기공전도도와 증산율이 양의 상관관계를, 처리구에서는 엽록소 함량, 광합성률 그리고 수분이용효율이 양의 상관관계를 보였다(Fig. 7, Table 1). 생육 변수는 대조구에서는 잎의 건조량이 높은 양의 상관관계를 보였으나, 처리구에서는 년생별 가지 길이와 잎 수분함량이 높은 양의 상관관계를 보였고 잎의 건조량은 음의 상관관계를 보였다(Fig. 7, Table 1).

4. 고찰

소지길이에서 본 연구 결과는 대조구와 기후변화처리구 간 처리한 초기 3년간은 차이가 없었지만, 그 후 2년간(2020~2021년)은 차이가 나타났다. 이는 우리연구와 유사한 4년간의 선행연구에서 상승된 CO₂ 조건에서 자란 참나무(*Quercus petraea*)가 초기 3년간은 대조구와 차이가 없었지만 그 후 4년 차에는 더 잘 자랐고, 서어나무(*Carpinus betulus*)는 초기 1년은 상승된 농도에서 더 잘 자랐지만, 그 후 3년간의 차이가 없었으며, 또한 유럽너도밤나무(*Fagus sylvatica*)는 4년간의 서로 간 차이가 없었다(Asshoff et al., 2006). 이러한 결과는 기후변화의 영향이 수종과 동일 수종이라도 시간에 따라 서로 다르게 반응함을 의미하는 것이다. 일반적으로 목본식물은 기후변화에 대하여 초기에는 온도나 이산화탄소농도의 변화에 민감하지만, 점차 시간이 지나면서 안정화되는 것이 일반적이라는 보고(Saxe et al., 2001)와 비교해 볼 때 본 연구의 결과는 오히려 그 반대로 초기에는 반응이 없지만, 후기에는 변화하는 유형을 보였다.

구상나무의 잎 수분함량, 잎몸 길이, 잎폭 길이에서는 대조구와 기후변화처리구간에 뚜렷한 차이가 확인되지 않았다(Fig. 4a, 4c, 4d). 하지만 잎 건조량은 기후변화처리구에서 대조구에 비해 명확하게 감소되었다(Fig. 4b). 이러한 결과는 온도와 CO₂ 상승 조건이 구상나무 잎의 형태적 차이에 영향을 주지는 않지만, 생물량 감소에는 영향을 줄 수 있음을 의미하는 것이다. 이는 아고산지대에서 고온 처리 시 협엽초본의 생산성이 감소된 것과 유사하다(Kim, 2012). 또한, 온도 및 CO₂ 농도 증가는 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*) 유식물의 바이오매스를 감소시킨 결과(Han and Shin, 2019)와도 유사하게 본 연구의 구상나무에서도 지상부의 일부인 잎의 생물량이 감소된 것은 기후변화가 진행될 시 구상나무 잎의 생산성이 저하될 수 있음을 시사한다.

한편, CO₂ 농도 증가는 광합성을 촉진하고(Callaway et al., 1994; Morinson and Lawlor, 1999), 식물의 생물량을 증가시키는 것으로 알려졌는데(Bernacchi et al., 2001; Sage and Kubien, 2007), 본 연구에서는 년생별 잎의 생물량만을 측정하였기에 지상부 바이오매스에 대한 비교는 한

계가 있을 것으로 판단된다. 향후 기후변화처리조건에서 지상부 및 지하부 생물량에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

엽록소 함량은 대기 온도와 양의 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있고(Saxe et al., 2001), 온난화 처리에 의해 대기온도가 증가하면 묘목의 엽록소 함량이 증가되는 결과(Yuan et al., 2022)와도 본 연구의 결과가 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 온도 증가가 엽록소 생합성 관련 효소들의 활성을 증가시켜 엽록소 함량 증가에 영향을 주었기 때문으로 사료된다.

광합성 능력은 기공 닫힘에 의해 제한되며 순광합성률과 기공전도도는 양의 상관관계를 가진다(Faria et al., 1996). 이처럼 구상나무의 광합성률과 증산율, 수분이용효율이 낮아지게 된 결과는 기공전도도의 감소에 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 CO₂ 농도의 증가가 구상나무의 기공밀도를 저하시켰을 수 있으며, 이로 인해 기공전도도 감소 및 CO₂ 가스교환에 제한을 받아 광합성 능력이 저하되었을 것으로 예상된다(Reich and Amundson, 1985).

주성분 분석 결과들로 보아, 대조구와 기후변화처리구의 배열이 명확히 구별 되었으며, 이는 기후변화 환경에서 주성분분석 결과가 명확히 구별되는 결과와 일치하였다(Cho et al., 2012). 일반적으로 온도와 CO₂농도가 증가하면 식물은 광합성률, 비엽면적, 수분이용효율 등을 향상시키는데(Onoda et al., 2009; Kim, 2012), 본 연구에서도 기후변화처리구에서 구상나무의 광합성률, 엽록소함량, 수분이용효율이 양의 상관관계를 보이며 이와 유사한 반응 양상을 나타냈다(Fig. 7). 기후변화가 진행될수록 구상나무의 광합성 능력과 잎의 수분 보유량이 증대될 수 있지만, 잎의 생물량은 점차 감소될 것으로 해석된다.

5. 결론

본 연구는 기후변화 시 구상나무의 생태적인 변화를 파악하기 위해 5년간 야외와 실내 환경 처리를 하며 구상나무의 생육 및 생리적 반응을 분석하였다. 구상나무의 년생별 소지 길이는 온도와 CO₂가 상승된 기후변화처리구에서 대조구보다 더 증가된 경향성을 보였다. 또한, 잎의 수분함량은 기후변화처리구에서 약간 높은 경향성을 보였으나, 모든 년생 가지의 잎 건조량은 대조구에서 기후변화처리구보다 더 높게 나타났다. 더불어, 대조구와 기후변화처리구 간에 잎몸 길이와 잎폭 길이와 같은 형태적 차이 나타나지 않았다. 이러한 결과들은 기후변화가 구상나무의 잎의 형태적 특성에는 중요한 영향을 미치지 않으나, 가지의 성장과 생물량 변화에는 유의한 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 본 연구에서는 잎의 생물량 변화만 관찰하였기 때문에 향후 기후변화 조건 하에서 구상나무의 생물량 변화에 대한 추가적인 실증 연구가 고려되어야 할 것으로 사료된다.

한편, 구상나무의 엽록소 함량은 기후변화처리구에서 대

조구보다 높았으며, 이는 대기 온도의 상승이 엽록소 합성에 긍정적인 영향을 주었을 것으로 해석된다. 반면, 광합성률은 대조구에서 기후변화처리구보다 더 높게 나타났는데, 이는 기후변화처리구에서 기공전도도가 감소되면서 기공 닫힘으로 인해 구상나무의 광합성 능력이 제한되어 나타난 결과로 판단된다. 이러한 기공전도도의 감소는 CO₂ 농도의 증가에 의한 기공밀도에 변화에 의한 영향이 예상되며, 향후 이에 각각의 환경 처리에서 기공 밀도에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주성분분석을 통해 온도와 CO₂ 환경 처리 조건에서 구상나무 형질 간의 상호 관련성을 비교한 결과, 대조구와 기후변화처리구의 배열은 명확히 구별되었다. 이를 통해 구상나무의 다양한 형질이 종합적으로 관여한다는 것을 확인하였다. 한편, 구상나무의 경우, 기후변화에 따라 구상나무의 광합성능력과 잎의 수분 보유량은 증가할 것이나, 잎의 생물량은 감소할 것으로 예상되며, 결과적으로 장기간 상승된 온도와 CO₂에 노출될 경우 구상나무의 환경 적응력은 약화될 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003630003).

References

- Asshoff, R., Zotz, G. and Koerner, C. (2006). Growth and phenology of mature temperate forest trees in elevated CO₂. *Global Change Biology*. 12, 848–861.
- Barbour, M. G., Burk, J. H., Pitts, W. D., Gilliam, F. S. and Schwartz, M. W. (2015). *Terrestrial Plant Ecology*. 3rd ed. Mun HT, Jeong YS, You YH, translator. Hongreung Publishing Company, Seoul, Korea.
- Bernacchi, C. J., Singsaas, E. L., Pimentel, C. A. R. L. O. S., Portis Jr, A. R. and Long, S. P. (2001). Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*. 24, 253–259.
- Callaway, R. M., DeLucia, E. H., Thomas, E. M. and Schlesinger, W. H. (1994). Compensatory responses of CO₂ exchange and biomass allocation and their effects on the relative growth rate of ponderosa pine in different CO₂ and temperature regimes. *Oecologia* 98, 159–166.
- Cho, K. T., Kim, H. R., Jeong, H. M., Lee, K. M., Kahng, T. G., You, Y. H., Kim, T. K. (2012). Effect of Light on the Growth Responses of *Quercus serrata* and *Q. aliena* to Elevated CO₂ and Temperature. Korean Wetlands Society, 14(4), 597–605.
- Choi, J. Y. and Lee, S. D. (2018). Evaluation of Ecosystem Service for Distribution of Korean fir using InVEST Model. *J. EIA*. 27, 181–193.
- Faria, T., García-Plazaola, J. I., Abadia, A., Cerasoli, S., Pereira, J. S. and Chaves, M. M. (1996). Diurnal changes in photoprotective mechanisms in leaves of cork oak (*Quercus suber*) during summer. *Tree Physiology*. 16, 115–123.
- Han, S. H. and Shin, S. J. (2019). Effects of Enhanced Temperature and CO₂ Concentration on Biomass and Physiological Characteristics of *Larix Kaempferi* Seedlings. *Forest Bioenergy*. 29, 32–42.
- IPCC. (2014). Climate change 2014 synthesis report. IPCC: Geneva, Switzerland, pp.1059–1072.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge. UK and New York, NY. USA.
- Jang, R. H., Kim, H. R. and You, Y. H. (2013). Effect of Elevated CO₂ Concentration and Temperature on the Growth Response of Several Woody Plants, Including Two Endangered Species. *KJEE*. 46, 234–240.
- Kim, J. H. (2012). *The Global Warming as seen by Biologist*. Seoul National University Press, Seoul, Korea.
- Kim, J. K., Koh, J. G., Yim, H. T. and Kim, D. S. (2017). Changes of Spatial Distribution of Korean fir Forest in Mt. Hallasan for the Past 10 Years(2006, 2015). *Kor. J. Environ. Ecol.* 31, 549–556.
- Kim, N. S. and Lee, H. C. (2013). A study on changes and distributions of Korean fir in sub-alpine zone. *J. Korean Env. Res. Tech.* 16, 49–57.
- Kim, Y., Chang, C.S., Kim, C.S., and Gardner, M. (2011). *Abies koreana*. In: IUCN 2011. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2011.2<www.iucnredlist.org>, Downloaded on 17 September 2023.
- Kong, W. S., Kim, K. O., Lee, S. G., Park, H. N., and Cho, S. H. (2014). Distribution of High Mountain Plants and Species Vulnerability Against Climate Change. *J. EIA*. 23, 119–136.
- Koo, K. A. and Kim, D. B. (2020). Review Forty-year Studies of Korean fir (*Abies koreana* Wilson). *Kor. J. Environ. Ecol.* 34, 358–371.
- Koo, K. A., Kim, J. U., Kong, W. S., Jung, H. C. and Kim, G. H. (2016). Projecting the Potential Distribution of *Abies koreana* in Korea Under the Climate Change Based on RCP Scenarios. *J. Kor. Env. Res. Tech.* 19, 19–30.
- Koo, K. A., Kong, W. S. and Park, W. K. (2001). Dendrochronological Analysis of *Abies koreana* W. at Mt.

- Halla, Korea: Effects of Climate Change on the Growths. *Kor. J. Ecol.* 24, 281–288.
- Leadley, P. W., Niklaus, P. A., Stocker, R. and Körner, C. (1999). A field study of the effects of elevated CO₂ on plant biomass and community structure in a calcareous grassland. *Oecologia* 118, 39–49.
- Lee, B. Y., Nam, G. H., Yun, J. H., Cho, G. Y., Lee, J. S., Kim, J. H., Park, T. S., Kim, K. G. and Oh, K. H. (2010). EAPDC Symposium: Biological indicators to monitor responses against climate change in Korea. *Kor. J. Pl. Taxon.* 40, 202–207.
- Lim, J. H., Woo, S. Y., Kwon, M. J., Chun, J. H. and Shin, J. H. (2006). Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean fir in Mt. Halla. *Jour. Kor. For. Soc.* 95, 705–710.
- Morison, J. I. L. and Lawlor, D. W. (1999). Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 22, 659–682.
- Noh, H.J. and Chung, H.Y. (2002). Statistical analysis using STATISTICA. Hyung Seul Press Co., Seoul, Korea.
- 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: pp.698–709.
- Perfors, T., Harte, J., and Alter, S. E. (2003). Enhanced growth of sagebrush (*Artemisia tridentata*) in response to manipulated ecosystem warming. *Global Change Biology*. 9, 736–742.
- Reich, P. B. and Amundson, R. G. (1985). Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop species. *Science* 230, 566–570.
- Sage, R. F. and Kubien, D. S. (2007). The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. *Plant, cell & environment*. 30, 1086–1106.
- Saxe, H., D.S. Ellsworth and J. Heath(1998) Tansley review No. 98 Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytol.* 139: 359–436.
- Saxe, H., Cannell, M. G. R., Johnsen, Ø., Ryan, M. G. and Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytol.* 149, 369–399.
- Saxe, H., Ellsworth, D. S. and Heath, J. (1998). Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytol.* 139. 395–436.
- Shaw, M. R., Zavaleta, E. S., Chiariello, N. R., Cleland, E. E., Mooney, H. A. and Field, C. B. (2002). Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO₂. *Science* 298, 1987–1990.
- Shin, Y. H. and Jung, H. C. (2015). Assessing uncertainty in future climate change in Northeast Asia using multiple CMIP5 GCMs with four RCP scenarios. *J. Environ. Impact Assess.* 24, 205–216.
- Song, K. M., Kim, C. S., Koh, J. G., Kang, C. H. and Kim, M. H. (2010). Vegetation Structure and Distributional Characteristics of *Abies koreana* Forests in Mt. Halla. *JESI.* 19, 415–425.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (2014). Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change.
- Tinus, R.W.(1972) CO₂ enriched atmosphere speeds growth of ponderosa pine and blue spruce seedlings. *Tree Plant. Notes.* 23(1): 12–15.
- WMO. 2022. The State of the Global Climate (2021). WMO–No.1290. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11178
- Yoo, S. M., Lim, C. H., Kim, M. I., Song, C. H., Kim, S. J., Lee, W. K. (2020). Potential Distribution of Endangered Coniferous Tree Species under Climate Change. *Journal of Climate Change Research*, 11(4), 215–226.
- Yuan, J., Yan, Q., Wang, J., Xie, J. and Li, R. (2022). Different responses of growth and physiology to warming and reduced precipitation of two co-existing seedlings in a temperate secondary forest. *Front. Plant Sci.* 13, 946141.