

Research Paper

기후요소에 따른 물오리나무(*Alnus hirsuta*)의 목재 해부학적 반응

장채민 · 허 권

강원대학교 생물자원과학부

Wood Anatomical Response of *Alnus hirsuta* to Climatic Factors

ChaeMin Jang · Kweon Heo

Department of Applied Plant Science, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University

요약: 본 연구는 한반도에 자생하는 물오리나무(*Alnus hirsuta*)의 목재 해부학적 형질이 최근 기후요소인 월평균 최고기온과 강수량에 어떻게 반응하는지를 규명하고자 하였다. 이를 위해 울릉도, 인제, 남원, 산청, 서귀포 등 기후 특성이 다른 지역에서 표본을 채집하고, 나이테 성장량, 도관의 면적·길이·빈도, 방사조직의 길이·빈도, 섬유세포 길이 등을 측정하여 분석하였다. 분석 결과, 고온다습한 지역에서는 나이테 성장량과 도관의 면적 및 길이가 유의미하게 증가하였으며, 이는 수분 수송 효율과 성장을 촉진하는 해부학적 적응으로 해석된다. 반면, 방사조직의 빈도와 섬유세포 길이는 온도 및 강수량 증가에 따라 감소하는 경향을 보여, 저장 및 기계적 지지 기능이 상대적으로 억제됨을 시사하였다. 기후요소와의 상관관계 분석에서도 대부분의 형질이 유의미한 관계를 보여, 물오리나무가 기후 민감성이 높은 수종임을 확인하였다. 본 연구 결과는 기후요소 변화에 따른 분포지 이동 및 성장 특성 예측의 기초자료로 활용될 수 있으며, 물오리나무가 기후 민감형 지표종으로서 생태계 관리에 기여할 수 있음을 시사한다.

주요어: 물오리나무, 기후요소, 목재해부학, 지리적 변이, 목재생장

Abstract: This study aimed to elucidate how the wood anatomical characteristics of *Alnus hirsuta*, native to the Korean Peninsula, respond to recent climatic factors such as temperature and precipitation. Wood samples were collected from five areas including Ulleung, Inje, Namwon, Sancheong, and Seogwipo. Growth rate of annual rings, frequency, length, area of vessels, frequency of ray, and fiber length were measured and analyzed. The results of the analysis showed that with high temperature and precipitation, the growth amount of annual rings and the area and length of vessel significantly increased, which reflected the anatomical adaptations that promoted water transport efficiency and growth. On the other hand, the frequency of ray and the length of fiber tended to decrease under high temperature and high precipitation, suggesting that the storage and mechanical support functions were relatively suppressed. In the Pearson correlation analysis with climate elements, most of the anatomical characters showed significant relationships with temperature and

precipitation, confirming the high climate sensitivity of *Alnus hirsuta*. These results can be used as basic data for predicting the distribution shift and growth characteristic changes due to climate change, and suggest that *Alnus hirsuta* can contribute to ecosystem management as a climate sensitive indicator species.

Keywords: *Alnus hirsuta*, *Climate elements*, *Wood anatomy*, *Geographic variation*, *Wood growth*

I. 서론

산업화 및 도시화로 인한 온실가스 배출 증가는 지구 평균기온 상승을 초래하였고, 이로 인한 기후변화는 전 세계 생태계에 극심한 변화를 초래하고 있다(IPCC 2014, Etminan et al. 2016). 이러한 기후 변화는 특히 생물의 성장, 분포, 생존 전략에 중대한 영향을 미치며, 극단적인 기후 사건(폭염, 가뭄, 폭우 등)의 증가로 생태계의 불안정성 또한 심화되고 있다(MOIS 2018, Urban 2015).

특히 한반도는 최근 수십 년간 기후변화의 영향이 뚜렷하게 나타나는 지역으로, 평균기온 상승률이 전 지구 평균보다 빠른 속도로 진행되고 있는 것으로 보고되었다(Ministry of Environment 2020). 이로 인해 식물의 분포지 북상, 생육시기 변화, 생존 전략 조정 등 다양한 반응이 나타나고 있으며, 자생지의 축소나 종절멸 가능성도 함께 제기되고 있다(Pereira et al. 2010, Hegland 2009).

계절변화가 뚜렷한 온대 및 한대지역의 수목은 기온과 강수량에 따라 형성층의 활동이 크게 좌우된다(Rossi et al. 2008, Hatfield and Prueger 2015). 또한 식물의 목재 해부학적 형질은 기온과 강수량과 같은 기후요소에 민감하게 반응하는 지표로 활용될 수 있다(Wimmer 2002, Fonti et al. 2010, Steppe et al. 2015). 예를 들어, 나이테는 연대기적 기후 정보를 저장하며(Zhang 2015), 도관은 수분 수송 효율과 밀접하게 관련되어 있어 기후 스트레스에 따라 직경과 길이가 변화한다(Gao et al. 2020, Miodek et al. 2021). 방사조직은 수분 및 영양분의 횡적 이동과 저장에 기여하며, 기온 및 강수량에 따라 빈도나 크기가 달라진다(Lucas et al. 2013, Saeed et al. 2016). 또한 섬유세포는 목재의 기계적 지지와 성장에 기여하며, 수분 및 온도 조건에 따라 길이나 벽 두께가 조절된다(Arend and Fromm 2007,

Courtois-Moreau et al. 2009). 이처럼 나이테 너비, 도관의 면적 및 빈도, 방사조직의 구조 등은 기후 스트레스에 대한 식물의 적응 및 생리적 반응을 반영하는 중요한 지표이다. 이러한 자료는 단기(3~5년)의 변화도 민감하게 기록하기 때문에 기후변화의 영향을 파악하는 데 유용하게 활용된다(Arend and Fromm 2007, Saeed et al. 2016). 특히 나이테는 단기(1-5년)뿐만 아니라 장기(10-30년)의 기후 영향을 모두 기록하며, 단기 평균 기후자료를 통한 분석은 가뭄 저항성과 회복력 평가에도 효과적인 수단으로 간주된다(Lloret et al. 2011, Camarero et al. 2015).

자작나무과(Betulaceae)는 기후변화에 민감하게 반응하는 대표적인 수종으로, 기온 및 강수량 변화에 따라 성장과 조직 구조가 명확히 변화하는 것으로 보고되어 왔다(Mercuri et al. 2016, Zhang et al. 2014). 특히 오리나무속(*Alnus*)은 기후변화에 따른 해부학적 구조 변화와 함께 자생지의 북상 가능성이 제시되어 왔으며(Fujita et al. 2020, Sakalli 2017), 한반도에서는 해당 속의 자생지 변화에 대한 장기 예측 시나리오 연구가 여전히 부족한 실정이다.

기후에 따른 해부학적 형질은 기온 및 강수량과 유의미한 상관관계를 보이며(Zhang 2020, Ziaco et al. 2014), 다수 국가에서 수행된 선행연구에서도 이러한 기후요소가 식물 성장과 발달의 주요한 결정 인자임을 시사하고 있다(Pandey 2021). 특히 기온은 목본성 식물의 발아 및 초기 성장에 핵심적인 외부 환경 요인으로 작용하며(Junttila et al. 2012), 일정 온도를 초과할 경우 도관 형성과 세포 분열이 중단되며, 심한 경우 세포 손상과 고사로 이어질 수 있다는 연구도 있다(Mercer and Weber 2001, Achchige et al. 2021).

자작나무는 잎이 전개된 이후 형성층의 활동이 본격화되며, 낙엽이 지기 전 생장이 중단되는 계절적 성장 특성을 갖고 있다(Suzuki et al. 1996). 줄기 생장은 일반

Table 1. Geographical locations of collected samples used in this study

| Region | Collection information |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Ulreung Island | Korea. Gyeongsangbuk-do, Ulleung-gun, Seo-myeon, 28 Oct 2022, C. M. Jang s.n. |
| Inje | Korea. Gangwon-do, Inje-gun, Inje-eup, 8 Oct 2022, C. M. Jang s.n. |
| Namwon | Korea. Jeonbuk-do, Namwon-si, Jucheon-myeon, 13 Aug 2022, C. M. Jang s.n. |
| Sancheong | Korea. Gyeongsangnam-do, Sancheong-gun, Sancheong-eup, 18 Aug 2022, C. M. Jang s.n. |
| Seogwipo | Korea. Jeju-do, Seogwipo-si, Seoho-dong, 27 Oct 2022, C. M. Jang s.n. |

Table 2. Location and foraging information for *Alnus hirsuta*

| Region | Collection information | Altitude (m) | DBH (cm) | Total Height (m) |
|----------------|------------------------------|--------------|--------------|------------------|
| Ulreung Island | 37° 29' 47.7" 130° 49' 35.2" | 360 | 22 / 24 / 19 | 11 / 12 / 8 |
| Inje | 38° 06' 56.1" 128° 08' 16.0" | 740 | 18 / 23 / 21 | 10 / 11 / 11 |
| Namwon | 35° 23' 35.5" 127° 15' 09.1" | 204 | 25 / 19 / 20 | 13 / 9 / 9 |
| Sancheong | 35° 26' 01.1" 127° 55' 46.9" | 469 | 24 / 22 / 18 | 11 / 11 / 10 |
| Seogwipo | 33° 21' 56.0" 126° 41' 19.6" | 362 | 25 / 21 / 23 | 12 / 12 / 11 |

적으로 5월부터 8월 사이에 집중되며, 해당 기간 동안 수분 스트레스나 연도별 기후 편차에 따라 생장 지속 기간과 강도가 변화한다는 보고도 있다(Montero and Merino 2022). 또한 초가를 이후에는 생장 억제와 함께 잎 색이 변화하고, 9월 이후에는 생장 속도가 현저히 둔화되는 경향을 보인다(Cooke et al. 2012, Pudas et al. 2008).

기온 변화에 따른 생장 반응은 반복적으로 보고되어 왔으며, 낮은 기온에서는 생장이 억제되고, 상대적으로 높은 기온에서는 생장이 촉진되는 경향이 확인되었다(Groot and Wein 1999). 이는 생장기 동안의 월평균 최고기온이 줄기 생장과 밀접하게 연관되어 있음을 시사하며, 자작나무는 수분 조건에도 민감하게 반응한다는 점에서, 강수량이 과도하게 많거나 부족할 경우 모두 생장을 저해할 수 있다(Usoltsev et al. 2022).

이러한 점에서 목재 해부학적 생장 반응 분석은 생태계 변화 예측과 산림 관리 전략 수립에 있어 핵심적인 기초 자료로 활용될 수 있다. 오리나무속의 대표 수종인 물오리나무(*Alnus hirsuta*)는 한국, 중국, 일본, 러시아 등에 자생하며 명운대 및 한랭지대 기후에 적응해온 수종이다(Chang et al. 2005). 그러나 최근 기후변화로 인해 생리적 스트레스 증가와 자생지 축소 가능성이 제기되고 있으며, 이에 대한 정량적 분석이 요구되고 있다.

따라서 본 연구는 물오리나무를 대상으로 나이테, 도관, 방사조직, 섬유세포 등의 해부학적 형질을 분석하고, 3개년(2019-2021) 동안의 월평균 최고기온과 강수량이라는 주요 기후요소의 지역 간 차이에 따라 목재 형질에 유의미한 변화가 나타나는지를 비교·분석하고자 한다. 이를 통해 물오리나무의 기후 민감성을 평가하고, 향후 분포지 변화 예측 및 산림 관리 전략 수립을 위한 과학적 기초자료를 제공하는 데 본 연구의 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 목재표본 수집

본 연구에서는 물오리나무의 해부학적 분석을 위해 국립생물자원관(NIBR)에서 제공하는 분포 자료를 바탕으로 표본 수집을 실시하였다(Table 1). 표본 채취 지역은 한반도를 기준으로 선정하였으며, 지역 간 월평균 최고기온 및 강수량 차이를 비교하고자 물오리나무 자생 개체를 선별하였다. 선정된 개체는 흉고직경 18~25cm, 수고 8~12m의 개체의 가지(Stem) 중, 생장 5년 이상 된 가지를 채집하여 사용하였으며, 생장조건의 편차를 줄이기 위해 동쪽 및 남쪽 방향에 위치하는 샘플을 확보하였다(Table 2). 또한, 고도적 차이는 한라산에서 고도가 100m 상승할 때 기온이 평균 약 0.58°C 하

Table 3. Climate elements and average for three years in the native range

| Year | 2019 | | 2020 | | 2021 | | three year mean | |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|------------|
| | temp. (°C) | pptn. (mm) | temp. (°C) | pptn. (mm) | temp. (°C) | pptn. (mm) | temp. (°C) | pptn. (mm) |
| Ulreung Island (Ulreung) | 24.6 | 102.0 | 24.2 | 150.5 | 24.0 | 143.9 | 24.3 | 132.1 |
| Inje (Middle) | 27.5 | 98.8 | 26.9 | 248.0 | 27.2 | 126.8 | 27.2 | 157.9 |
| Namwon (South) | 28.5 | 186.3 | 28.0 | 379.5 | 28.3 | 173.4 | 28.2 | 246.4 |
| Sancheong (South-coast) | 28.9 | 203.4 | 27.8 | 409.2 | 28.2 | 170.0 | 28.3 | 260.9 |
| Seogwipo (Jeju) | 26.1 | 333.8 | 25.6 | 282.8 | 26.5 | 224.2 | 26.1 | 280.3 |

강하는 것으로 보고된 연구 결과(Kong, 1998)를 기반으로 간접적인 해석을 진행하였다(Table 2).

채집된 목재 샘플은 50% 에탄올 용액에 고정 보존한 후, 마이크로토프 절편 제작을 위해 약 1cm 크기의 입방체로 절단하였다. 각 샘플은 횡단면, 방사단면, 접선단면으로 구분하여 15 μ m 두께로 절단하였으며, 에탄올 연속 희석액을 이용해 탈수 과정을 거친 뒤 1% Safranin 용액으로 염색하였다. 이후 Entellan (Merck, Germany) 을 이용해 mounting하여 영구 슬라이드로 제작하였다.

2. 목재형질 측정

물오리나무의 해부학적 형질 분석은 나이테, 도관, 방사조직, 섬유세포의 생장 및 구조적 특성을 중심으로 수행되었다. 나이테 생장량은 연도별 형성된 나이테 간의 간격(GR)을 측정하여 산정하였고, 도관의 면적(VA₅₀)은 분석 구역 내에서 무작위로 선정된 50개의 도관을 대상으로 계산하였다. 도관 길이(VL₃₀), 방사조직 길이(RL₃₀), 섬유세포 길이(FL₃₀)는 동일 구역 내 무작위로 선택된 각각 30개의 세포를 측정하여 산출하였다. 도관 빈도(VF) 및 방사조직 빈도(RF)는 단위 면적(mm²)당 도관 및 방사조직 수를 기준으로 하여 계산하였다.

측정된 해부학적 데이터는 지역 간 차이를 비교하기 위한 목적하에 분석되었으며, 모든 관찰은 교정된 미세 눈금자가 장착된 현미경(BX-50, Olympus, Tokyo, Japan)을 이용하여 수행하였다. 형태 관찰 결과는 현미경에 연결된 디지털카메라 시스템을 통해 촬영 및 기록하였다.

3. 월평균 최고기온 및 강수량 자료 수집

기상자료는 목재 표본이 채집된 지역을 기준으로

2019년부터 2021년까지의 월평균 최고기온과 강수량 정보를 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)을 통해 수집하였다.

자작나무과의 특성을 고려하여 본 연구에서는 5월부터 8월까지의 월평균 최고기온(temp.), 월평균 강수량(pptn.)을 활용하였다. 월평균 최고기온(temp.) 자료는 월별로 정리된 데이터를 기반으로 확보하였고, 강수량(pptn.)의 경우 연간 총량을 월 단위 평균으로 변환하여 분석하였다.

4. 자료의 통계처리

실험 결과의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 통계 분석 소프트웨어 SPSS (ver. 30)를 사용하여 데이터를 분석하였다. 검정 방법은 일원분산분석 (ANOVA)을 사용하여 $p < 0.05$ 수준의 유의성을 검정하였다.

해부학적 형질과 기후요소 (월평균 최고기온, 월평균 강수량) 간의 관계를 분석하기 위하여 피어슨 상관 분석(Pearson correlation analysis)을 수행하였다. 분석은 통계분석 소프트웨어 R (ver 4.3.1)을 사용하여 수행하였다. 상관계수(r)와 유의확률(p-value)을 통해 기온 및 강수량이 생장량에 미치는 영향을 평가하였고, 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 지역별 기후요소 비교분석

2019년부터 2021년까지의 3개년 데이터를 기반으로 물오리나무 주요 자생지의 월평균 최고기온과 강수량을 분석한 결과, 월평균 최고기온은 인제(27.2°C), 남원(28.2°C), 산청(28.3°C), 울릉도(24.3°C), 서귀포(26.1°C)

순으로 나타났으며, 지역 간 최대 기온 차이는 4.0°C였다. 서귀포는 3년 평균기온이 26.1°C로 가장 높았으며, 이는 울릉도보다 1.8°C 높은 수치였다(Table 3).

한편, 강수량 분석 결과 인제(157.9mm), 울릉도(132.1 mm), 남원(246.4mm), 산청(260.9mm), 서귀포(280.3 mm)로 조사되었으며, 지역 간 강수량 차이는 최대 148.2 mm로 나타났다. 서귀포는 3년 평균 강수량이 280.3mm로 가장 많았으며, 이는 울릉도 대비 148.2mm 높은 수준이었다. 이 결과는 서귀포가 고온다습한 환경을 나타내며, 생육 조건으로서의 기후적 특성이 뚜렷함을 시사한다(Table 3).

2. 나이테 성장량과 기후요소의 상관관계

물오리나무의 나이테는 전반적으로 경계가 흐릿하게 나타나는 경향을 보였으며(Figure 1), 이는 선행연구에서도 유사한 형질로 보고된 바 있다(Arbellay et al.

Table 4. Regional variations in growth ring characteristics

| Region | Characteristics | Growth ring (μm) |
|----------------|-----------------|-------------------------------|
| Ulreung Island | | 445.1 \pm 72.9 |
| Inje | | 303.8 \pm 82.6 |
| Namwon | | 466.6 \pm 257.9 |
| Sancheong | | 744.7 \pm 251.1 |
| Seogwipo | | 912.8 \pm 25.6 |

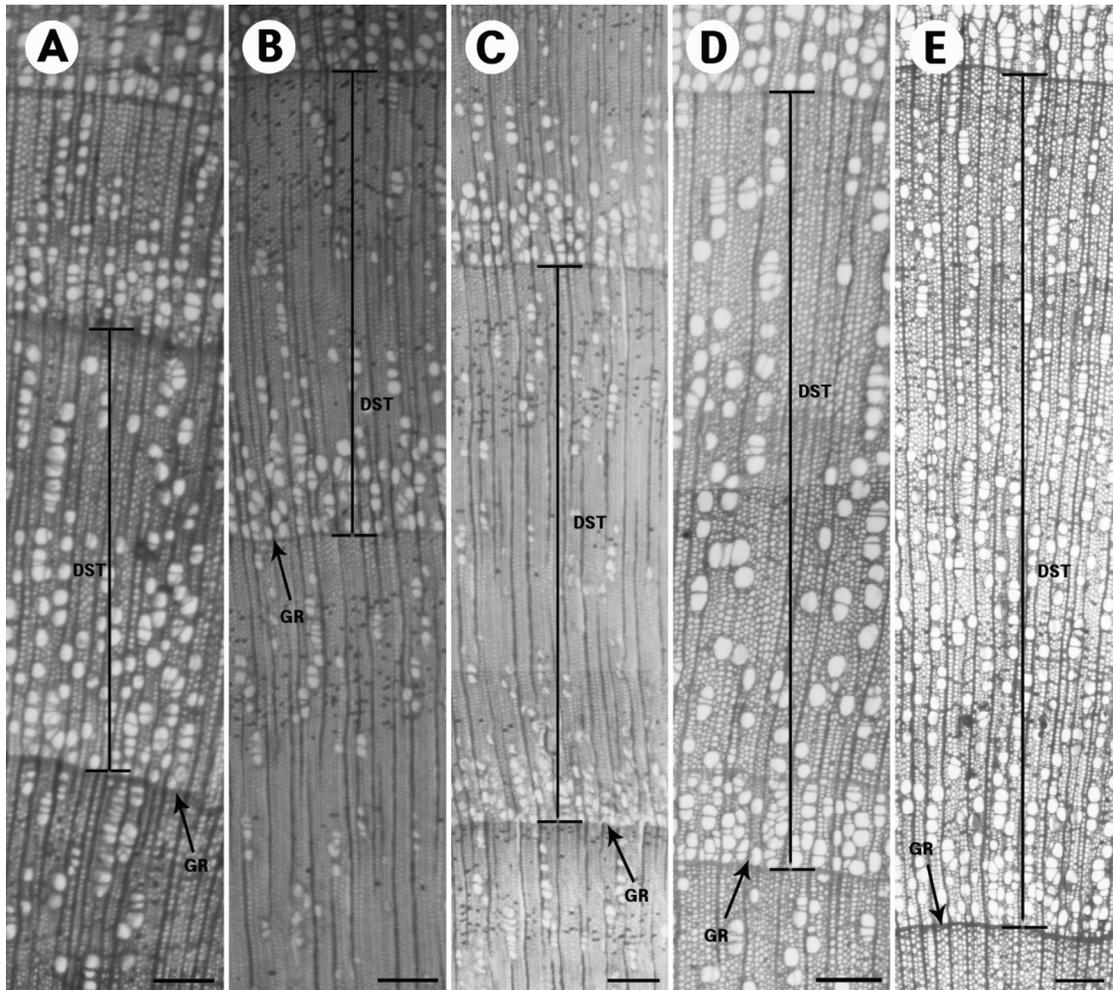


Figure 1. Cross sectional observation of growth ring characteristics in *Alnus hirsuta* according to climatic elements. Abbreviations: GR, Growth ring. DST, Distance. A: Ulreung. B: Inje. C: Namwon. D: Sancheong. E: Seogwipo. Scale bars = 200 μm

2010). 나이테 성장량 간의 간격(DST)은 울릉도에서 445.1 μm , 인제 303.8 μm , 남원 466.6 μm , 산청 744.7 μm , 서귀포 912.8 μm 로 나타났다(Figure 1, Table 4).

통계적으로 분석한 결과, 일부 지역 간 성장량의 통계적 유의성(* $p < 0.05$)은 확인되었으며, 이는 지역별 월평균 최고기온 및 강수량 조건의 차이가 나이테의 성장에 영향을 미치는 가능성을 시사한다. 월평균 최고기온 및 강수량이 모두 높은 서귀포에서는 가장 넓은 나이테 너비가 확인되었으며, 반대로 월평균 최고기온 및 강수량이 모두 낮은 인제(11.3 $^{\circ}\text{C}$, 97.0mm)에서는 가장 좁은 성장량을 나타냈다(Figure 5).

이러한 경향은 고온다습한 환경이 물오리나무의 나이테 성장을 촉진함을 의미하며, Usoltsev et al.(2022)는 자작나무류가 계절별 수분 스트레스에 민감하게 반응하여 성장량이 크게 변동한다고 보고한 바 있으며, 본 연구에서도 유사한 패턴이 확인되었다.

3. 도관과 기후요소의 상관관계

물오리나무의 도관은 고립관공과 복합관공으로 구성

되었으며(Figure 2), 면적은 울릉도에서 149.5 μm^2 , 인제에서 131.3 μm^2 , 남원에서 118.9 μm^2 , 산청에서 146.2 μm^2 , 서귀포에서 171.6 μm^2 로 나타났다(Table 5). 자생지 간 유의한 차이를 보였으며, 서귀포에서 가장 크게 형성되었고, 인제에서 가장 작았다. 통계분석 결과, 도관 면적은 월평균 최고기온 및 강수량과 모두 강한 양의 상관관계를 보여, 고온다습한 환경이 물오리나무의 도관 발달에 긍정적으로 작용함을 시사하였다(Table 5).

도관의 빈도는 지역별로 변동성을 보였으며, 울릉도에서 고립관공은 47.7개/ mm^2 , 복합관공은 44.0개/ mm^2 , 총 91.7개/ mm^2 로 확인되었으며, 인제는 고립관공 51.0개/ mm^2 , 복합관공 42.0개/ mm^2 , 총 93.0개/ mm^2 로 조사되었다(Table 5). 남원은 고립관공 46.7개/ mm^2 , 복합관공 24.0개/ mm^2 , 총 70.7개/ mm^2 , 산청은 고립관공 38.7개/ mm^2 , 복합관공 31.3개/ mm^2 , 총 70.0개/ mm^2 , 서귀포는 고립관공 38.3개/ mm^2 , 복합관공 25.3개/ mm^2 , 총 63.7개/ mm^2 로 확인되었다. 피어슨 상관분석에서는 월평균 최고기온 및 강수량과의 뚜렷한 상관성이 관찰되지 않았다(Table 7).

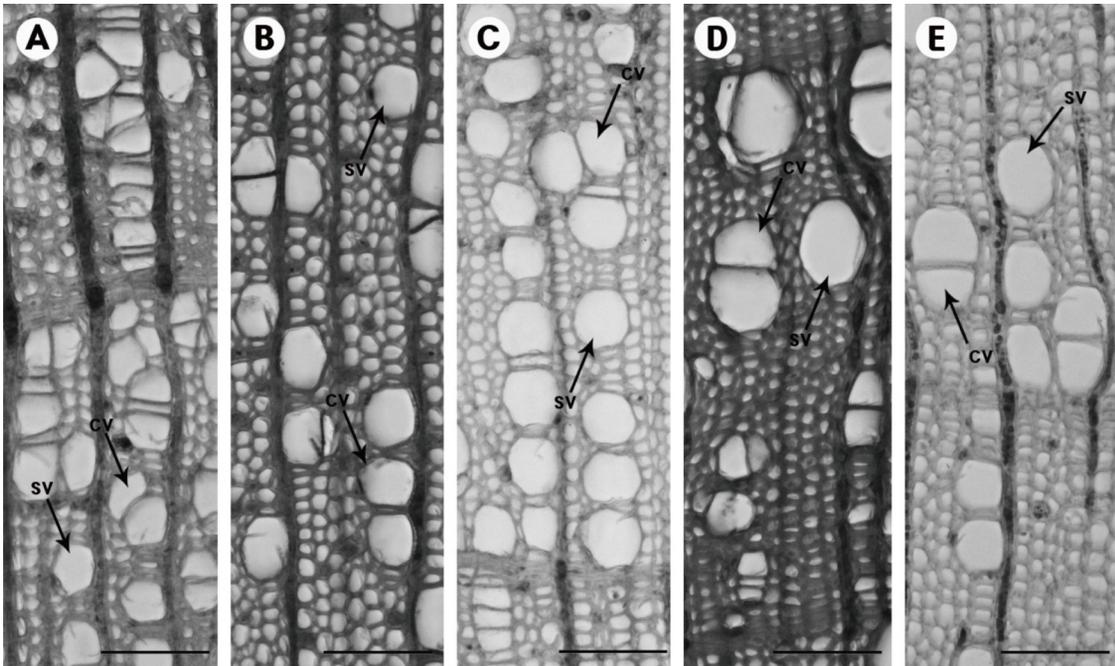


Figure 2. Cross sectional observation of vessel characteristics in *Alnus hirsuta* according to climatic elements. A: Ulreung. B: Inje. C: Namwon. D: Sancheong. E: Seogwipo. Abbreviations : SV, Solitary vessel; CV, Clustered vessel. Scale bars = 100 μm

Table 5. Regional variations in vessel characteristics

| Region | Characteristics | Vessel area (μm^2 , VA ₅₀) | Vessel frequency (no./mm ² , VF) | | | Vessel length (μm , VL ₃₀) |
|----------------|-----------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------------------------|
| | | | Solitary | Clustered | Mix | |
| Ulreung Island | | 149.5±21.7 | 47.7±12.1 | 44.0±5.6 | 91.7±6.8 | 356.8±67.1 |
| Inje | | 131.3±27.6 | 51.0±15.5 | 42.0±7.2 | 93.0±11.4 | 347.2±49.1 |
| Namwon | | 118.9±21.7 | 46.7±6.4 | 24.0±3.6 | 70.7±3.5 | 358.2±45.2 |
| Sancheong | | 146.2±29.8 | 38.7±14.2 | 31.3±18.2 | 70.0±30.0 | 384.4±97.4 |
| Seogwipo | | 171.6±25.2 | 38.3±4.0 | 25.3±8.6 | 63.7±12.7 | 373.0±41.9 |

Table 6. Regional variations in ray and fiber characteristics

| Region | Characteristics | Ray frequency (no./mm ² , RF) | | | Ray length (μm , RL ₃₀) | Fiber length (μm , FL ₃₀) |
|----------------|-----------------|------------------------------------------|--------------|------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| | | Uniseriate | Multiseriate | Mix | | |
| Ulreung Island | | 104.0±4.0 | - | 104.0±4.0 | 68.2±62.4 | 582.3±151.5 |
| Inje | | 106.7±10.1 | - | 106.7±10.1 | 142.4±82.5 | 573.7±132.4 |
| Namwon | | 113.7±10.0 | - | 113.7±10.0 | 58.8±35.5 | 510.5±143.6 |
| Sancheong | | 70.7±19.7 | - | 70.7±19.7 | 208.1±99.3 | 490.4±142.9 |
| Seogwipo | | 61.3±16.7 | - | 61.3±16.7 | 174.9±94.8 | 525.2±128.4 |

Table 7. Pearson correlation coefficients between characteristics, maximum monthly mean temperature, and precipitation

| Characteristics | Correlation with temp | Correlation with pptn |
|------------------|-----------------------|-----------------------|
| Growth ring | 0.953 | 0.847 |
| Vessel area | 0.877 | 0.885 |
| Vessel frequency | -0.448 | -0.983 |
| Vessel length | 0.280 | 0.745 |
| Ray frequency | -0.026 | -0.663 |
| Ray length | 0.280 | 0.745 |
| Fiber length | -0.739 | -0.906 |

도관 길이는 울릉도에서 356.8 μm , 인제 347.2 μm , 남원 358.2 μm , 산청 384.4 μm , 서귀포 373.0 μm 로 확인되었다(Table 5). 산청에서 가장 길고, 인제에서 가장 짧게 측정되었으며, 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 기후요소와의 상관분석에서는 도관 길이가 월평균 최고기온 및 강수량 모두와 높은 양의 상관관계를 나타내어(Table 7), 기온과 수분 조건이 도관 연장에도 영향을 미치는 것으로 해석된다(Figure 5).

도관의 형질도 기후요소와 밀접한 관계를 나타냈다. 도관의 면적과 길이는 고온다습한 지역일수록 증가하였으며, 이는 수분 수요 증가에 따른 수송 효율 향상을 위한 해부학적 적응으로 해석된다(Fonti et al. 2010, Gao et al. 2020). 반면 도관 빈도는 기후요소와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았으며, 이는 형질별로 기후 반

응 민감도가 다를 수 있음을 시사한다. 이러한 도관 특성의 변화는 기후요소에 따른 식물의 수분 스트레스 대응 전략과 관련이 있으며, 특히 자작나무과 수종은 그 변화 양상이 두드러지게 나타난다(Hacke and Sperry 2001, Qaderi et al. 2019).

4. 방사조직과 기후요소의 상관관계

물오리나무의 방사조직은 단열방사조직이며(Figure 3), 이성방사조직으로 구성되어있다(Figure 4). 방사조직의 빈도는 울릉도에서 104.0개/mm², 인제에서 106.7개/mm², 남원에서 113.7개/mm², 산청에서 70.7개/mm², 서귀포에서 61.3개/mm²로 확인되어, 자생지별로 유의미한 차이를 나타냈으며, 남원, 인제, 울릉도 등 월평균 최고기온과 강수량이 비교적 낮은 지역에서 높은 빈도

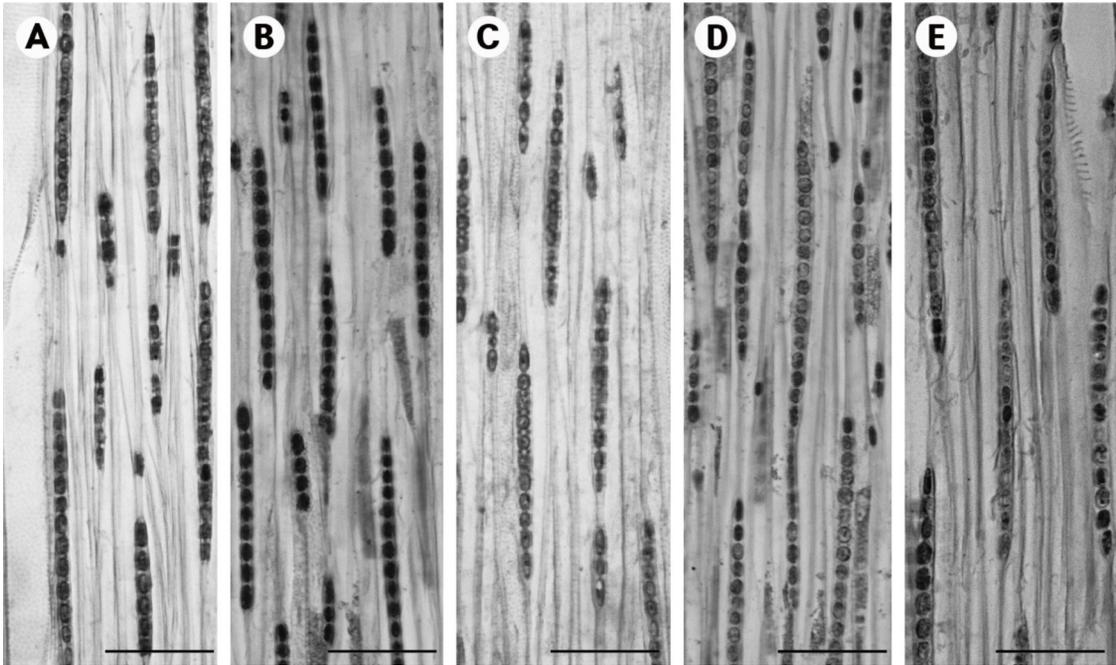


Figure 3. Tangential section observation of ray characteristics in *Alnus hirsuta* according to climatic elements. A: Ulreung. B: Inje. C: Namwon. D: Sancheong. E: Seogwipo. Scale bars = 100 μ m

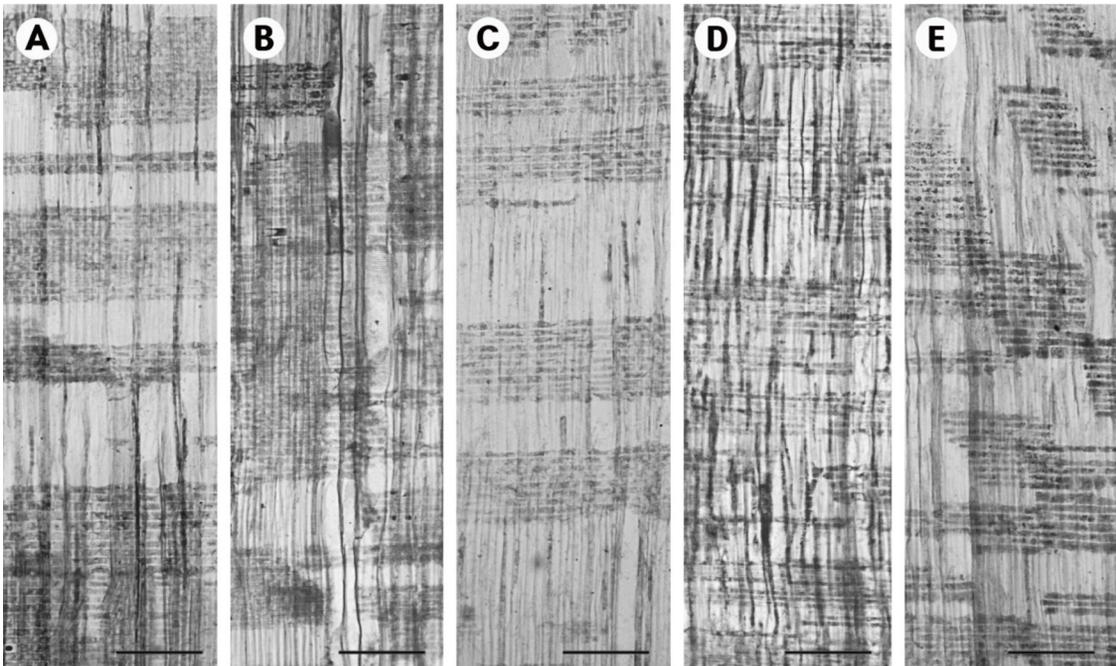


Figure 4. Radial section of *Alnus hirsuta* showing hetero-cellular ray and supporting fiber cells. A: Ulreung. B: Inje. C: Namwon. D: Sancheong. E: Seogwipo. Scale bars = 200 μ m

를 보였다(Table 6). 반면, 서귀포와 산청 등 고온다습한 지역에서는 빈도가 낮게 측정되었다. 피어슨 상관분석 결과, 방사조직의 빈도는 월평균 최고기온 및 강수량과 모두 음의 상관관계를 보여, 고온다습한 환경에서는 방사조직 빈도가 감소하는 경향이 관찰되었다

(Table 7).

방사조직의 길이는 울릉도에서 356.8 μm , 인제 347.2 μm , 남원 358.2 μm , 산청 384.4 μm , 서귀포 373.0 μm 로 확인되었다(Table 6). 산청과 서귀포에서 상대적으로 길게 나타났으며, 인제와 울릉도에서는 짧게 확인되

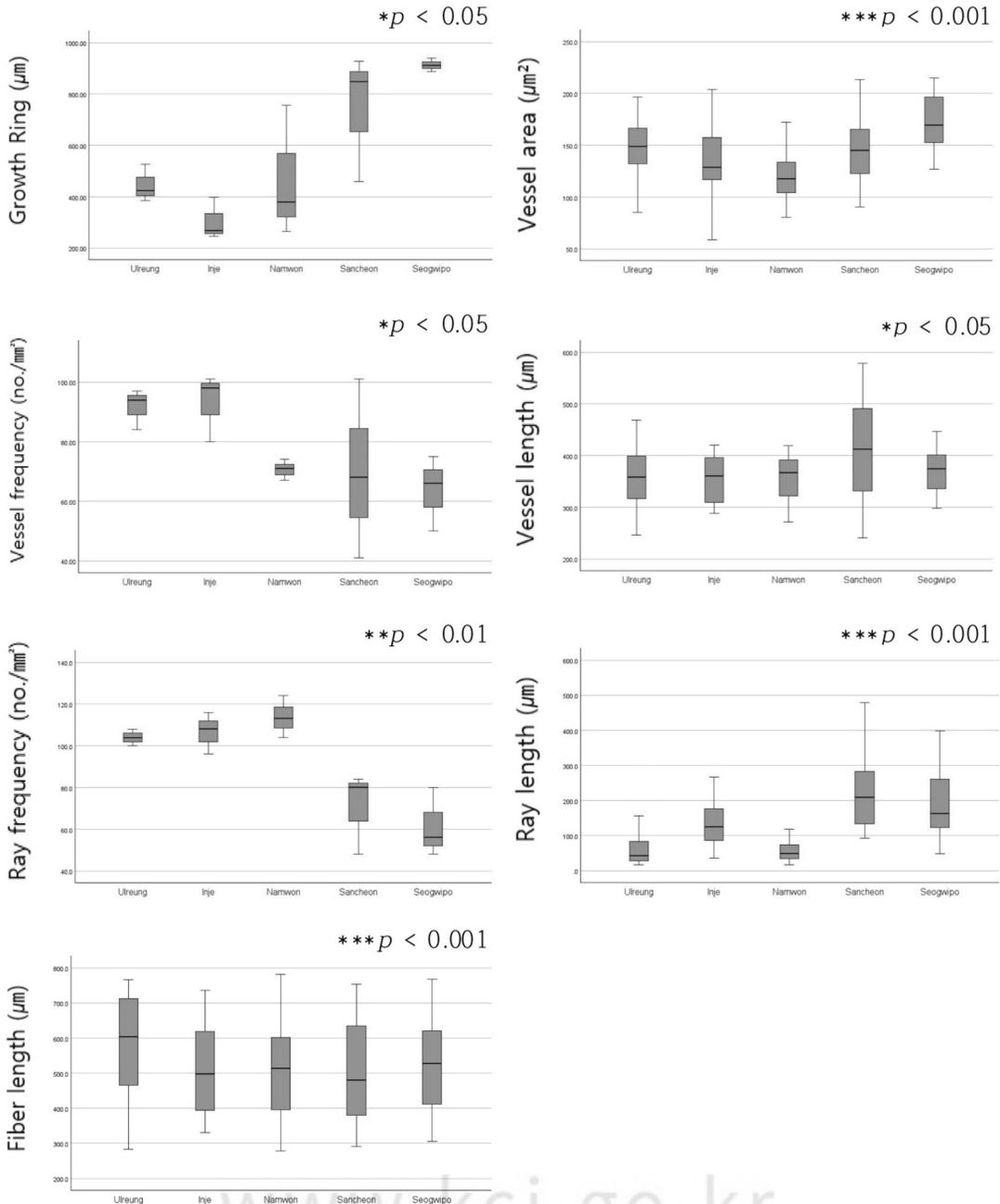


Figure 5. Regional variation in anatomical traits

었다. 통계분석에서도 지역 간 유의한 차이가 나타났으며, 피어슨 상관분석 결과, 방사조직의 길이는 월평균 최고기온 및 강수량과 모두 양의 상관관계를 나타냈다(Table 7). 이는 고온다습한 기후 조건에서 방사조직이 길게 발달하는 생리적 특성을 반영하는 것으로 해석된다.

방사조직 특성의 경우, 빈도는 월평균 최고기온 및 강수량과 음의 상관관계를, 길이는 양의 상관관계를 나타내었다. 이는 고온다습한 환경에서 방사조직 빈도는 줄어 들고, 길이는 증가하는 경향을 보이며, 방사조직이 수분 및 영양분의 횡적 수송과 저장 기능을 담당하면서 환경변화에 구조적으로 적응함을 시사한다(Soheili et al. 2023). 특히 물오리나무는 이러한 환경 반응이 두드러져 기후요소에 따른 목재 특성 변화를 예측하는 지표종으로서 활용 가능성이 높다.

5. 섬유세포와 기후요소의 상관관계

물오리나무의 섬유세포 길이는 울릉도에서 582.3 μm , 인제 573.7 μm , 남원 510.5 μm , 산청 490.4 μm , 서귀포 525.2 μm 로 지역 간 차이를 보였으나, 통계적으로 유의한 차이는 확인되지 않았다(Table 6). 울릉도와 인제에서는 상대적으로 긴 섬유세포 길이가 측정된 반면, 산청과 서귀포에서는 짧은 길이가 관찰되었다.

피어슨 상관분석 결과, 섬유세포 길이는 월평균 최고기온 및 월평균 강수량과 음의 상관관계를 나타내었으며(Table 7), 이는 고온다습한 환경에서 섬유세포의 길이가 짧아지는 경향이 있음을 시사한다. 이러한 경향은 수분 공급이 제한되거나 상대적으로 저온인 환경에서 섬유세포가 더 길게 발달할 수 있음을 의미하며, 기후조건에 따른 조직 형성의 유연성을 반영하는 결과로 해석된다.

섬유세포는 월평균 최고기온 및 강수량과 음의 상관관계를 보여, 고온다습한 지역에서 더 짧은 길이로 형성되었다. 이는 고온 및 수분 과다 환경이 세포 신장을 억제하는 방향으로 작용할 수 있음을 의미하며, 수종별 생리적 특성과 생육 전략의 차이를 반영한다(Bolotova 2019). 이러한 결과는 물오리나무가 기후요소에 따른 해부학적 조절 능력이 뛰어난 수종이며, 다양한 환경 조건에서의 적응성과 생존 전략을 이해하는데 중요한

자료로 해석될 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 물오리나무의 주요 자생지에서 기후요소(월평균 최고기온, 월평균 강수량)가 목재 해부학적 형질에 미치는 영향을 분석하여, 수종의 기후 적응 반응을 파악하고자 하였다. 분석 결과, 서귀포와 같은 고온다습한 지역에서는 나이트 성장량, 도관의 면적 및 길이가 유의미하게 증가하는 경향을 보였으며, 이는 고온 및 풍부한 수분 공급이 수분 수송과 성장을 촉진함을 나타낸다. 이는 도관 직경 확대를 통한 수송 효율성 증가 보고와 유사한 결과이다(Gao et al. 2020).

반면, 방사조직의 빈도는 상대적으로 서늘하고 건조한 지역에서 높았고, 섬유세포의 길이 또한 상대적으로 서늘하고 건조한 지역에서 길게 발달하였다. 이러한 결과는 방사조직이 수분 및 영양분의 저장, 횡적 이동을 조절하며 스트레스 대응에 중요한 역할을 함을 시사하며(Lucas et al. 2013), 고온다습한 환경에서 생존 전략으로 도관 확대가 이루어지는 대신 저장 기능의 조직은 상대적으로 억제되는 해부학적 조절이 발생함을 보여준다(Soheili et al. 2023).

월평균 최고기온과 강수량이 물오리나무 성장에 미치는 영향은 기후 민감성을 반영하며, 본 연구의 해부학적 특성 변화는 자작나무와 수종이 형성층 반응 및 성장 시기 조절을 통해 기후변화에 적응한다는 기존 연구 결과(Mercuri et al. 2016, Zhang et al. 2014)와 일치한다. 또한, 서식지 내 기후 외 요인과의 상호작용을 통해 식물 종 간 경쟁 구조가 변화하고, 기온 상승과 강수량 변화는 새로운 경쟁 수종의 침입 가능성을 높여 생태계 변화를 초래할 수 있다(Kardol et al. 2010). 이러한 요인을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

다만, 본 연구는 표본 수와 조사 지역이 제한적이며, 기후자료 역시 3개년 평균값을 기반으로 분석하였다는 점에서 장기적인 변동성을 완전히 반영하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 표본 수를 확대하고, 다양한 해부학적 형질과 기후요소를 장기적인 자료와 연계하여 분석하는 것이 필요하다. 이를 통해 수종별 기후 적응 메커니즘을 정밀하게 규명할 수 있

을 것이다.

본 연구에서 도출된 물오리나무의 해부학적 반응과 기후요소 간 관계는 향후 기후변화 영향 예측, 수종별 기후 적응성 평가, 서식지 변화 예측 등에 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 이러한 정량적 자료는 삼림 관리, 수종 보전, 환경영향평가 등 실무적 절차에도 적용 가능성이 높다. 본 연구는 물오리나무의 해부학적 특성과 성장 반응을 기후요소와 연계하여 종합적으로 해석하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 기후변화에 따른 삼림 관리 및 보전전략 수립에 기여할 것으로 기대한다.

References

- Gao Y., Yang Z., Wang G., Sun J., & Zhang X. (2020). Discerning the difference between lumens and scalariform perforation plates in impeding water flow in single xylem vessels and vessel networks in cotton. *Frontiers in Plant Science*, 11, 246.
- Kardol P., Cregger M. A., Campany C. E., & Classen A. T. (2010). Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects. *Ecology*, 91(3), 767-781.
- 공우석. (1998). 한반도의 고산과 아고산지 생태. *한국 생태학회*, 21(4), 383-387.
- Kong W. S. (1998). The alpine and subalpine geocology of the Korean Peninsula. *The Ecological Society of Korea*, 21(4), 383-387.
- Koo K. A., & Park S. U. (2022). The effect of interplays among climate change, land-use change, and dispersal capacity on plant redistribution. *Ecological Indicators*, 142, 109192.
- Groot D. W. J., & Wein R. W. (1999). *Betula glandulosa* Michx. response to burning and postfire growth temperature and implications of climate change. *International Journal of Wildland Fire*, 9(1), 51-64.
- Lloret F., Keeling E. G., & Sala A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120(12), 1909-1920.
- Lucas W. J., Groover A., Lichtenberger R., Furuta K., Yadav S. R., Helariutta Y., & Kachroo P. (2013). The plant vascular system: evolution, development and functions. *Journal of Integrative Plant Biology*, 55(4), 294-388.
- Rossi S., Deslauriers A., Griçar J., Seo J. W., Rathgeber C. B., Anfodillo T., Morin H., Levanic T., Oven P., & Jalkanen R. (2008). Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography: A Journal of Macroecology*, 17(6), 696-707.
- Mercer G. N., & Weber R. O. (2001). Fire plumes. *In Forest Fires*, 225-255.
- Mercuri A. M., Torri P., Fornaciari R., & Florenzano A. (2016). Plant responses to climate change: the case study of Betulaceae and Poaceae pollen seasons (Northern Italy, Vignola, Emilia-Romagna). *Plants*, 5(4), 42.
- Miodek A., Gizińska A., Włoch W., & Kojs P. (2021). What do we know about growth of vessel elements of secondary xylem in woody plants? *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 96(6), 2911-2924.
- MOIS. (2018). 2018 Disaster Chronology. *Ministry of the Interior and Safety*.
- Montero X. C., & Merino E. G. (2022). Phenology and Stem Growth Dynamics of *Betula pendula* Roth. *In the Spanish Pyrenees*.
- Bolotova K. S., Chukhchin D. G., Vydrina I., & Novozhilov E. (2019). The similarities and differences in microstructure of phloem and xylem of *Betula nana* and *Betula pubescens* species. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science / Institute of Physics*, 263, 012007.
- Saeed N, Maqbool N, Haseeb M and Sadiq R. (2016). Morpho-anatomical changes in roots of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress condition. *Journal of Agricultural Science and Technology*

- JAST, 6, 1-9.
- Sakalli A. (2017). Simulation of potential distribution and migration of *Alnus* spp. under climate change. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(4), 1039-1070.
- Soheili F., Abdul-Hamid H., Almasi I., Heydari M., Tongo A., Woodward S., & Naji H. R. (2023). How tree decline varies the anatomical features in *Quercus brantii*. *Plants*, 12(2), 377.
- Suzuki M., Yoda K., & Suzuki H. (1996). Phenological comparison of the onset of vessel formation between ring-porous and diffuse-porous deciduous trees in a Japanese temperate forest. *IAWA Journal / International Association of Wood Anatomists*, 17(4), 431-444.
- Steppe K., Sterck F., & Deslauriers A. (2015). Diel growth dynamics in tree stems: linking anatomy and ecophysiology. *Trends in Plant Science*, 20(6), 335-343.
- IPCC. (2014). Summary for policymakers In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, 1-32.
- Urban M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571-573.
- Usoltsev V. A., Shakoor A., Zaib G., & Tsepordey I. S. (2022). Temperature and precipitation gradients determine biomass in Birch (*Betula* spp.) and Fir (*Abies* spp.) in Eurasia. *Biologia Futura*, 73(1), 119-131.
- Wimmer R. (2002). Wood anatomical features in tree rings as indicators of environmental change. *Dendrochronologia / Istituto Italiano di Dendrochronologia*, 20(1-2), 21-36.
- Achchige S. Y. M., Volkova L., & Weston C. J. (2021). Effect of temperature and exposure time on cambium cell viability in vitro for *Eucalyptus* species. *Forests*, 12(4), 445.
- Arend M., & Fromm J. (2007). Seasonal change in the drought response of wood cell development in poplar. *Tree Physiology*, 27, 985-992.
- Etminan M., Myhre G., Highwood E. J., & Shine K. P. (2016). Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 43(24), 12-614.
- 장계선, 장진성, 박준섭. (2005). 한국의 물오리나무(*Alnus hirsuta* var. *hirsuta*)와 물갠나무(*A. hirsuta* var. *sibirica*)의 분류학적 재고. *서울대학교 수목원 연구보고*, 25, 82-88.
- Chang K. S., Chang C. S., and Park J. S. (2005). Taxonomic reconsideration of *Alnus hirsuta* var. *hirsuta* and *Alnus hirsuta* var. *sibirica* in Korea. The Arboretum and Department of Forest Science, Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul. 151-921.
- Zhang S., Belien E., Ren H., Rossi S., & Huang J. G. (2020). Wood anatomy of boreal species in a warming world: a review. *IForest: Biogeosciences and Forestry*, 13(2), 130.
- Zhang Y., Bielory L., & Georgopoulos P. G. (2014). Climate change effect on *Betula* (birch) and *Quercus* (oak) pollen seasons in the United States. *International Journal of Biometeorology*, 58, 909-919.
- Zhang Z. (2015). Tree rings, a key ecological indicator of environment and climate change. *International Journal of Biometeorology*, 51, 107-116.
- Ziaco E., Biondi F., Rossi S., & Deslauriers A. (2014). Climatic influences on wood anatomy and tree-ring features of Great Basin conifers at a new mountain observatory. *Applications in Plant Sciences*, 2(10), 1400054.
- Junttila O., & Hänninen H. (2012). The minimum temperature for budburst in *Betula* depends on the state of dormancy. *Tree Physiology*, 32(3), 337-345.

- Camarero J. J., Gazol A., Sangüesa-Barreda G., Oliva J., & Vicente-Serrano S. M. (2015). To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *The Journal of Ecology*, 103(1), 44-57.
- Courtois-Moreau C. L., Pesquet E., Sjödin A., Muñiz L., Bollhöner B., Kaneda M., & Tuominen H. (2009). A unique program for cell death in xylem fibers of *Populus* stem. *The Plant Journal*, 58(2), 260-274.
- Cooke J. E., Eriksson M.E., & Junttila O. (2012). The dynamic nature of bud dormancy in trees: environmental control and molecular mechanisms. *Plant, Cell & Environment*, 35(10), 1707-1728.
- Qaderi M. M., Martel A. B., & Dixon S. L., (2019). Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. *Plants*, 8(3), 65.
- Pandey S. (2021). Climatic influence on tree wood anatomy: a review. *Journal of Wood Science*, 67(1), 24.
- Pudas E, Leppälä M, Tolvanen A, Poikolainen J, Venäläinen A and Kubin E. (2008). Trends in phenology of *Betula pubescens* across the boreal zone in Finland. *International Journal of Biometeorology*, 52, 251-259.
- Pereira H. M., Leadley P. W., Proença V., Alkemade R., Scharlemann J. P., Fernandez-Manjarrés J. F., & Walpole M. (2010). Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science*, 330(6010), 1496-1501.
- Fonti P., Arx G. V., García-González I., Eilmann B., Sass-Klaassen U., Gärtner H. & Eckstein D. (2010). Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *The New Phytologist*, 185(1), 42-53.
- Fujita S., Noguchi K., & Tange T. (2020). Root responses of five Japanese afforestation species to waterlogging. *Forests*, 11(5), 552.
- Hacke U. G., & Sperry J. S. (2001). Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 4(2), 97-115.
- Hatfield J. L., & Prueger J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10.
- Hegland S. J., Nielsen A., Lázaro A., Bjerknes A. L., & Totland Ø. (2009). How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology Letters*, 12(2), 184-195.
- 환경부. (2020). 한반도 기후평가보고서 2020. 환경부. Ministry of Environment. (2020). Prospect report of climate change in Korea. Ministry of Environment.