

홍릉시험림 내 수목의 폭설 피해 유형 분류 및 속별 감수성 분석

공예진 · 김선영 · 정재호 · 이재운 · 서다예 · 김수진 · 박고은^{ID*}

국립산림과학원 산림생태연구과

Classification of Heavy Snow Damage Types and Susceptibility Analysis by Tree Genera and Growth Types in Hongneung Experimental Forest

Ye Jin Kong, Seon Yeong Kim, Jae Ho Jung, Jae Yoon Lee, Da Ye Seo,
Su-Jin Kim and Go Eun Park^{ID*}

Forest Ecology Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 2024년 11월 25일부터 29일까지 우리나라 중부지방을 중심으로 내린 폭설은 생활권 인근의 수목에 광범위한 피해를 입혔다. 기후변화에 따른 극한기상 현상 발생 빈도와 강도가 증가하는 것을 고려할 때, 향후 기후위기 대응 숲 조성 및 관리를 위해서 폭설에 따른 수목의 피해 특성 등에 대한 이해가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구는 서울특별시에 위치한 국립산림과학원 홍릉시험림 내 수목의 피해 유형을 분류하고 폭설에 대한 수종별 감수성을 분석하였다. 그 결과, 교목성 수목의 주요 피해유형은 수관 피해로 전체의 64.8%를 차지하였으며, 초살도가 큰 개체는 도복에 취약한 경향을 보였다. 감수성 지수는 소나무속이 모든 피해강도에서 가장 높게 나타났고, 동일한 구조적 조건에서도 소나무속의 폭설 감수성이 다른 속에 비해 유의하게 높았다($p < 0.001$). 혼합모형 분석 결과, 흉고직경이 증가할수록 감수성 지수가 유의하게 감소하였다($p < 0.001$). 주성분 분석에서는 수관비와 초살도가 크고 흉고직경과 수관폭이 작은 개체에서 감수성이 높게 나타나, 수목의 구조적 특성이 폭설 취약성에 중요한 역할을 함을 확인하였다. 본 연구는 수목의 폭설 피해유형 분류 기준을 제시하였고, 수목의 생육 특성이 폭설 피해의 정도에 영향을 미침을 시사하였다. 이는 향후 폭설 등 극한 기상에 따른 물리적인 피해 대응하기 위한 수종별 관리전략 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: From November 25 to 29, 2024, heavy snowfall in central Korea resulted in extensive damage to trees in urban areas. As extreme weather events become more frequent under climate change, understanding how snow impacts trees has become increasingly important. This study investigated the types of snow damage and species-specific susceptibility in the Hongneung Forest in Seoul, Republic of Korea. Crown damage was the most common form, accounting for 64.8% of all cases, and taperness emerged as a key factor. The genus *Pinus* exhibited the highest susceptibility index across all classes of snow damage severity, and *Pinus* was far more vulnerable to snow damage than the other analyzed genera under comparable structural conditions ($p < 0.001$). Results from the mixed-effects model indicated that susceptibility decreased significantly with increasing DBH, indicating that thicker stems enhance resistance to snow load ($p < 0.001$). Moreover, principal component analysis revealed a positive association between higher crown ratios and slenderness ratios but smaller DBHs and crown widths with susceptibility, emphasizing the decisive role of structural traits in snow damage vulnerability. These findings suggest that both tree architecture and site conditions influence snow damage and can support improved forest management strategies under future climate change.

Key words: climate change, heavy snow, extreme climatic events, resilience

서론

우리나라에서 2024년 내린 폭설은 서해의 높은 해수면 온

도와 큰 해기차에 의해 눈구름이 강하게 발달하여 서울, 인천, 수원 세 지점에서는 11월 27일에 11월 일최심직설, 28일에는 일최심직설 최곳값을 경신하였다(KMA, 2024). 우리나라의 지난 10년간 폭설에 의한 경제적 피해 규모는 태풍과 호우 다음으로 컸으며, 이러한 폭설은 매년 증가하는 추세이다 (Kwon et al., 2016; Kim et al., 2022). 폭설은 농작물 피해,

* Corresponding author

E-mail: goeunpark@korea.kr

ORCID

Go Eun Park ^{ID} https://orcid.org/0000-0003-4686-2178

건물 붕괴 등 경제에 미치는 영향이 클 뿐만 아니라(Chen et al., 2020, Kim et al., 2022), 수목피해로 산림생태계에도 큰 영향을 미친다.

폭설 피해란 폭설 중이나 후에 나무와 숲이 있는 물리적 피해를 말한다(Haerberli and Whiteman, 2015). 폭설로 인해 단시간 내에 많은 눈이 내리면 다량의 적설에 의한 하중과 이동에 의해 나무가 휘거나 가지가 찢어지고, 수간의 절단과 뿌리가 뽑히는 피해가 발생할 수 있다(Shao et al., 2011). 이러한 피해는 주로 수목에 쌓인 눈의 무게가 가지와 수간의 한계를 초과할 때 발생하며, 이때의 피해정도는 수목의 특성과 입지환경이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Suvanto et al., 2021). 향후 폭설을 동반하는 한파 등의 극한 기상의 발생 빈도와 강도가 증가할 것으로 전망되는데(KMA, 2025), 같은 강도의 기후환경에 노출되더라도 수목의 반응 특성은 각 수종의 성장형(교목성, 관목성 등)과 생육상태(수고, 흉고 직경 등) 등에 따라 다르게 나타날 수 있다(Song et al., 2020). 그러므로 수종별 감수성에 대한 이해가 선행되어야 하지만, 폭설과 수목 피해 사이의 관계는 고려해야 할 변수가 복잡하여 분석과 해석에 어려움이 많다(Klopčič et al., 2020).

우리나라에서는 과거 눈의 무게를 견디는 힘의 차이에 따른 수종 분류 시도가 있었으나(Kang et al., 2011), 폭설에 대한 피해유형과 영향인자 규명은 미흡한 실정이다. 기존의 국내 연구에서는 흉고직경과 수관폭 등의 생육특성에 대한 정보가 반영되지 않고, 눈의 무게를 견디는 것에 집중되어 있어 수종별 폭설 피해의 특성을 이해하는 데에 한계가 있는 것으로 보인다.

반면, Díaz-Yáñez et al.(2019)은 노르웨이 남동부 침엽수림의 폭설 피해의 주요 변수를 분석하여, 경사가 가파를수록 우점 수종과 수고에 따라 바람과 폭설 피해가 급격히 증가함을 보고하였다. Irland(2000)는 수목의 폭설 피해에 수형, 수피, 수관 밀도 등이 영향을 미치며, 특히 넓은 수관의 침엽수

에서 수관이 절단되는 피해가 많음을 보고하였다. 또한, 북미 지역 수종별 폭설에 대한 감수성을 비교 및 평가하여, 감수성 정도에 따라 수종을 분류하였다.

국립산림과학원 홍릉시험림은 2024년 11월 27일과 28일 양일간 내린 폭설에 노출되어 수목의 피해가 발생하였다. 홍릉시험림은 시험림의 특성상 다양한 수종이 제한된 공간에 분포하고 있어, 동일한 기후 및 환경적 조건 하에서 폭설에 대한 각 수종별 피해유형, 반응 특성을 비교하는데 유리하다. 따라서, 본 연구는 홍릉시험림 내 1) 폭설로 인한 수목의 피해유형을 분류하고, 2) 각 피해유형의 영향인자를 도출하였으며, 3) 수종의 생육특성을 고려하여 폭설의 감수성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 현황

연구대상지는 2024년 11월 27일과 28일 폭설로 인한 수목 피해가 발생한 국립산림과학원 홍릉시험림이다. 당시 일최심적설은 28.6 cm를 기록하였다. 이는 1990년도부터 기록된 서울의 일최심적설 중 가장 많은 양이었으며, 당시 월최곳값을 경신하였다(KMA, 2025; Figure 1). 홍릉시험림의 30년간(1991~2020) 연평균 기온은 13.7°C이고, 연평균 누적강수량은 1,357.0 mm이다(KMA, 2025).

서울특별시 동대문구에 위치한 홍릉시험림(41.5 ha)은 13개 수목원과 천장산 일대를 포함하고 있으나, 외국수목원과 접근이 어려운 천장산 일대는 조사지역에서 제외하였다. 홍릉시험림에 서식하고 있는 목본 1,244종과 초본 811종 등 총 157과 2,035종 중(NiFos, 2022), 본 연구에서는 조사구역에 서식하는 120과 496종만을 조사에 포함하였다. 또한, 이중 관목성 수목과 피해목의 분수 비율이 높은 교목성 수목의 상위 5속을 선발하여 피해유형을 분류하고 감수성을 평가하였다.

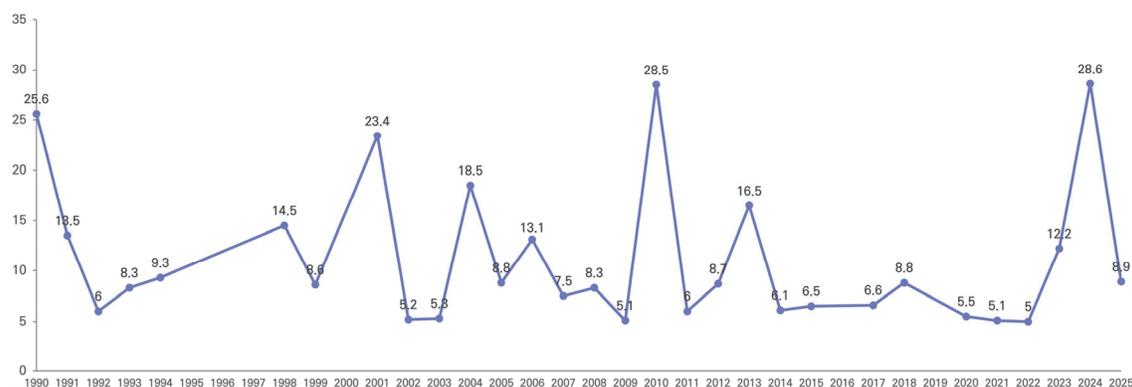


Figure 1. Annual maximum of daily maximum snow depth (cm) from 1990 to 2025 (KMA, 2025).

2. 수목 피해 현황 조사 및 유형 분류

2024년 11월 폭설 당일과 2025년 3월, 2번의 조사를 진행하였으며, 각 개체의 피해 부위와 피해 형태, 수고, 흉고 직경, 수관폭 등을 조사하였다. 흉고직경 아래에서 분지된 수목은 서로 다른 개체로 인식하였고, 수관폭은 장축만을 측정하였다. 또한, 수고와 흉고직경의 비율로 초살도를 계산하였고, 계산된 초살도에 수관폭을 곱하여 수관비를 구하였다.

$$\text{Taperness} = \frac{\text{Height}}{\text{DBH}}$$

$$\text{Crown ratio} = \left(\frac{\text{Height}}{\text{DBH}}\right) \times \left(\frac{\text{Crown width}}{\text{Crown width}_{\text{avg}}}\right)$$

Height: 수고(m), DBH: 흉고직경(cm), Crown width: 수관폭(m), Crown width_{avg}: 동일속의 평균 수관폭(m)

피해유형은 피해 부위와 형태, 빈도 등을 기준으로 분류하고자 했으며, 관목성 수목은 교목성 수목보다 성목의 크기가 작게 성장하는 것을 고려하여 기준을 상이하게 설정하였다(Mason et al., 2014; Gotmark et al., 2016). 그 결과, 교목성 수목 폭설 피해유형 7가지, 관목성 수목 폭설 피해유형 3가지를 도출하였다(Table 1). 교목성 수목에서 눈의 하중으로 수관이 눌린 피해는 CP (Crown Pressed)로 분류하였다. 수관이 꺾인 채 가지가 살아있는 경우는 CBS (Crown Bent, Surviving), 수관이 절단된 피해는 CB (Crown Broken)로 구분하였다. 수간이 한쪽으로 기울어진 피해는 SLS (Stem Leaning, Surviving)로, 수간이 찢어지거나 부러진 채 생존한 경우는 SBS (Stem Broken, Surviving)으로 분류하였다. 더 심각한 피해로 수간 전체가 부러져 고사한 경우는 SBD (Stem Broken, Dead), 뿌리가 들려서 나무가 넘어가 고사한 경우는 RD (Root Uprooted, Dead)로 분류하였다.

관목성 수목의 경우, 수관이 눌린 피해는 SPB (Shrub Pressed Branches), 흉고직경 기준 상부 가지가 부러진 피해는 SAB (Shrub Above DBH Broken), 흉고직경 기준 하부 가지가 부러진 피해는 SBB (Shrub Below DBH Broken)로 구분하였다.

3. 수종별 폭설에 대한 감수성 평가

폭설 피해를 입은 교목성 수목의 상위 5속(단풍나무속 *Acer*, 향나무속 *Juniperus*, 소나무속 *Pinus*, 벚나무속 *Prunus*, 참나무속 *Quercus*)에서 흉고직경 6 cm 이상인 개체를 대상으로 감수성 지수를 구하였다. 관목성 수목은 속과 흉고직경 상관없이 모든 개체를 대상으로 하였으며, 각 피해유형의 피해 정도

를 고려하여 피해강도를 부여하였다(Table 2).

피해빈도와 피해강도를 이용하여, 수종별 폭설에 대한 감수성 지수(SI)를 다음의 식으로 산출하였다(Jones et al., 2001; Klopčič et al., 2020). 감수성 지수는 각 수종의 고유값이 아니라, 피해지역 내의 속별 본수와 피해 발생 빈도를 반영하여 산정하는 상대적인 값이다. 따라서 같은 수종도 상황(피해 지역 내 수종 구성, 피해 발생 빈도 등)에 따라 감수성 지수가 달라질 수 있다.

$$\text{Susceptibility Index (SI)} = \frac{\sum P_{ij} \cdot W_{ij}}{300}$$

i: 피해강도, j: 수종, P_{ij}: 같은 i에서 j가 차지하는 비율, W_{ij}: 가중치(D0=0, D1=1, D2=2, D3=3)

4. 통계분석

피해유형이 분류된 속별 생육특성의 차이를 확인하기 위해 일원분산분석(One-way ANOVA)을 실시하였고, 등분산이 위배되었을 경우에는 Welch ANOVA를 수행하였다. ANOVA는 stats를, 사후검정은 agricolae (Mendiburu, 2021)의 Duncan's multiple range test를, 비등분산 시 rstatix (Kassambara, 2025)의 Games-Howell을 수행하여 평균의 유의한 차이를 확인하였다.

폭설에 대한 수종별 감수성을 정량화하기 위해 감수성 지수를 종속변수로 하는 선형혼합모형(Linear Mixed-Effects Model)을 lme4 (Bates et al., 2015)를 이용하여 구축하였다. 고정효과의 표준화 회귀계수와 신뢰구간으로 각 변수의 상대적 영향을 평가하였고, 임의효과의 절편 추정치를 통해 수종별 감수성 차이를 비교하였다. 고정효과의 표준화 계수는 effectsize (Ben-Shachar et al., 2020)로 산출하였으며, p값은 LmerTest (Kuznetsova et al., 2017)을 사용하였다.

피해유형별, 감수성 지수별 생육특성의 관계를 파악하기 위해 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)을 실시하였다. 그룹 간 차이는 비모수 다변량 분산분석 (PERMANOVA; Anderson, 2001)을 vegan (Oksanen et al., 2022)를 사용하여 검정하였다.

모든 통계분석은 R(ver. 4.5.1, R Core Team, 2016)을 사용하였고, 데이터 전처리와 시각화는 tidyverse (Wickham et al., 2019)와 ggplot2 (Wickham, 2016)을 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 수종별 생육특성 분석 및 피해유형 분류

홍릉시험림에서 폭설로 인해 향나무속의 개체목 피해율이

Table 1. Snow damage types in tree and shrub.

Tree type	Picture	Classification	Tree type	Picture	Classification
		수관이 눌린 피해 (CP, Crown Pressed)	Tree		수간이 부러져 고사 (SBD, Stem Broken, Dead)
		수관이 꺾인 피해 (CBS, Crown Bent, Surviving)			뿌리가 들려 고사 (RD, Root Uprooted, Dead)
Tree		수관이 절단된 피해 (CB, Crown Broken)	Shrub		수관이 눌린 피해 (SPB, Shrub Pressed Branches)
		수간이 휘어진 피해 (SLS, Stem Leaning, Surviving)			흉고직경 기준 상부 가지가 부러진 피해 (SAB, Shrub Above DBH Broken)
		수간이 부러진 피해 (SBS, Stem Broken, Surviving)			흉고직경 기준 하부 가지가 부러진 피해 (SBB, Shrub Below DBH Broken)

Table 2. Weight values of snow damage types in tree and shrub.

Tree type	Damage types	Severity
Tree	No damage	D0
	CP	D1
	CBS	
	CB	
	SLS	D2
	SBS	
	SBD	
Shrub	RD	D3
	No damage	D0
	SPB	D1
	SAB	D2
	SBB	D3

※ CP: Crown Pressed, CBS: Crown Bent Surviving, CB: Crown Broken, SLS: Stem Leaning Surviving, SBS: Stem Broken Surviving, SBD: Stem Broken Dead, RD: Root uprooted Dead, SPB: Shrub Pressed Branches, SAB: Shrub Above DBH Broken, SBB: Shrub Below DBH Broken

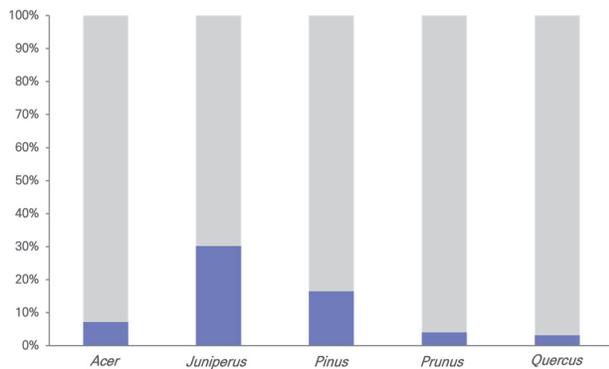


Figure 2. Snow damage rate (%) of tree 5 genera (*Acer*, *Juniperus*, *Pinus*, *Prunus*, *Quercus*) in the study area.

32.8%로 가장 높았고, 소나무속의 피해율이 19.7%로 뒤를 이었다(Figure 2). 단풍나무속, 벚나무속 그리고 참나무속은 모두 피해율 10% 이하로 비교적 낮은 피해율을 보였다.

폭설 피해를 입은 피해목의 속간 수고와 흉고직경, 초살도, 수관폭, 수관비에 대해 분산분석을 수행한 결과, 모든 변수에서 평균 차이가 유의하게 나타났다($p < 0.05$). 수고와 흉고직경은 참나무속과 소나무속에서 가장 크게 나타났으며, 두 속은 단풍나무속과 향나무속보다 유의하게 높은 값을 보였다($p < 0.001$, Figure 3). 수관폭은 참나무속에서 유의하게 넓었으며, 향나무속과 관목성 수목은 상대적으로 좁은 수관폭을 보였다($p = 0.002$). 초살도와 수관비는 단풍나무속과 관목성 수목에서 가장 높은 값을 보였으며, 수관비는 소나무속에서 가장 낮았다($p < 0.001$).

교목성 수목의 8가지 피해유형 중 수관이 절단된 피해(CB)

가 37.7%로 가장 많은 비율을 차지했다. 다음으로는 수관이 꺾인 피해(CBS) 27.1%, 수간이 부러진 피해(SBS) 13.7%, 수간이 부러져 고사한 피해(SBD) 10.3%, 수관이 눌린 피해(CP) 8.0%, 뿌리가 들러 고사한 피해(RD) 5.1% 순으로 나타났으며, 수간이 눌린 피해(SLS)가 0.7%로 가장 적게 나타났다. 이 중 수관피해(CP, CBS, CB)가 총 46.7%를 차지하여 홍릉시험림 내 폭설 피해의 주요 피해는 수관피해인 것으로 보인다.

단풍나무속에서는 주로 수관피해가 일어났으며, 피해유형 중 CB가 70%로 가장 많았다(Figure 4). 향나무속도 CB가 30.8%로 가장 많은 비율을 차지하였으며, 타 수종에 비해 RD가 15.4%로 비교적 높은 비율을 보였다. 소나무속은 8가지 피해유형이 모두 나타났으며, 그 중 CBS가 33.9%로 가장 많았다. 소나무속의 수관피해는 전체 피해 중 70.5%로 수간피해보다 많았지만, 타 수종에 비해 CBS의 비율이 높아 피해가지의 회복가능성이 높을 것으로 판단된다. 벚나무속은 수간피해가 전체 피해 중 60%를 차지해 수간의 취약성이 확인되었다. 참나무속은 CB가 전체 피해유형 중 83.3%를 차지해 교목성 수목 5속 중 수관피해율이 가장 높았다. 이는 참나무속이 다른 속들에 비해 수관폭이 유의하게 높았기 때문으로 사료되며, 수간피해가 적은 것은 흉고직경이 유의하게 컸기 때문으로 보인다($p = 0.002$, $p < 0.001$).

관목성 수목은 수관이 눌린 피해(SPB)가 피해의 48.8%를 차지하였고, 흉고직경 기준 상부 가지가 부러진 피해(SAB)가 34.9%, 흉고직경 기준 하부 가지가 부러진 피해(SBB)가 23.3%를 차지하였다.

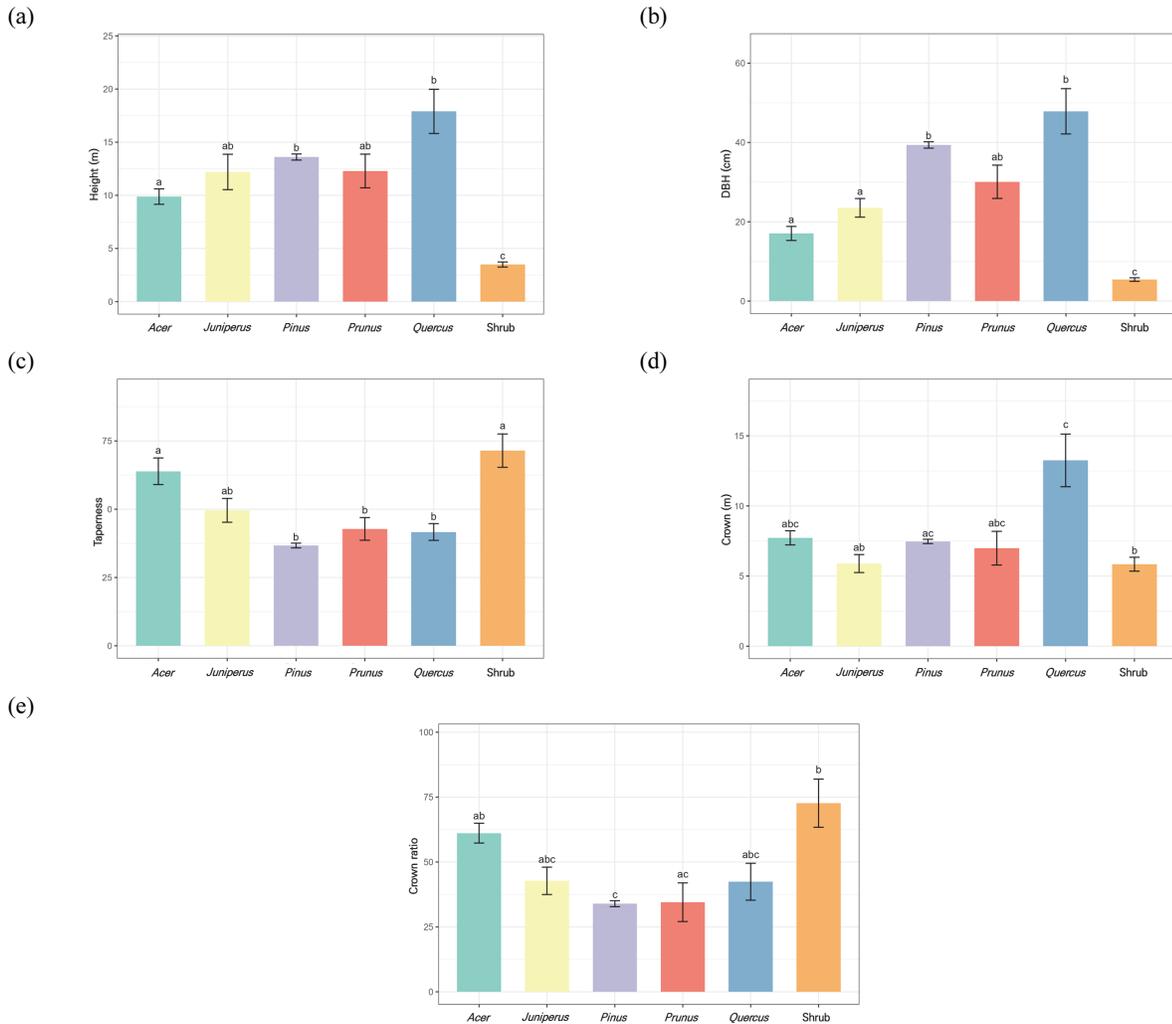


Figure 3. Differences in (a) Height, (b) DBH, (c) Taperness, (d) Crown width, and (e) Crown ratio of tree 5 genera (*Acer*, *Juniperus*, *Pinus*, *Prunus*, *Quercus*) and shrub. Different letters indicate significant differences according to Games-Howell ($p < 0.05$) following Welch ANOVA.

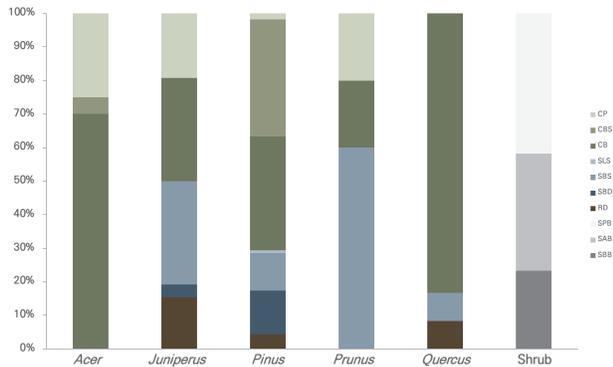


Figure 4. Proportion of snow damage types by tree 5 genera (*Acer*, *Juniperus*, *Pinus*, *Prunus*, *Quercus*) and shrub. (CP: Crown Pressed, CBS: Crown Bent Surviving, CB: Crown Broken, SLS: Stem Leaning Surviving, SBS: Stem Broken Surviving, SBD: Stem Broken Dead, RD: Root uprooted Dead, SPB: Shrub Pressed Branches, SAB: Shrub Above DBH Broken, SBB: Shrub Below DBH Broken)

교목성 수목의 피해유형에 대한 주성분 분석 결과, 전체 변동의 86.2%가 설명되었으며 통계적으로 피해유형간 유의한 차이를 보였다($p < 0.001$, Figure 5). 수관 피해(CP, CBS, CB)는 PC1의 양의 영역에 집중되었으며, 수고와 흉고직경, 수관폭, 수관비가 큰 개체에서 빈번하게 발생하였다. 수간 및 뿌리 피해(SBD, RD)는 PC2의 양의 영역에 분포하여, 초살도와 수관비가 높고 흉고직경이 상대적으로 작은 개체에서 주로 나타나는 경향을 보였다. 폭설 피해에는 수목의 특성이 영향을 미치는데, 그 중 수고와 흉고직경, 초살도, 경사도가 강한 피해와 연관이 있다고 알려져 있다(Nykänen et al., 1997) 그 중, 초살도가 큰 개체는 같은 눈의 하중 조건에서도 더 큰 휨이나 도복으로 이어질 수 있다(Nasiri and Fallah, 2012). 수간 및 뿌리 피해는 개체의 생존 가능성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Xiang et al., 2025). 수간

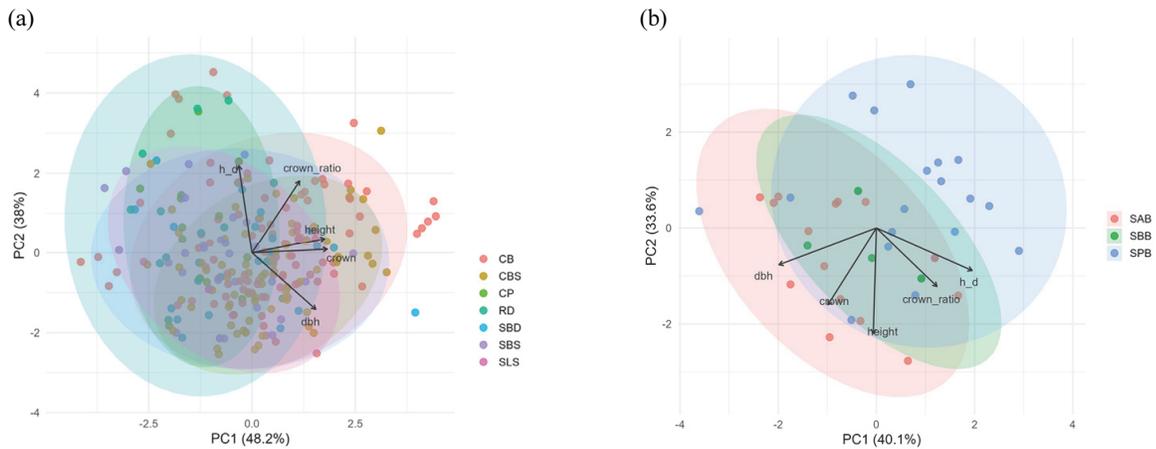


Figure 5. Principal component analysis (PCA) of snow susceptibility index by (a) tree 5 genera (*Acer*, *Juniperus*, *Pinus*, *Prunus*, *Quercus*) and (b) shrub based on height, DBH, taperness, crown width and crown ratio. (height: Height, dbh: DBH, h_d: Taperness, crown: Crown width, crown_ratio: Crown ratio, CP: Crown Pressed, CBS: Crown Bent Surviving, CB: Crown Broken, SLS: Stem Leaning Surviving, SBS: Stem Broken Surviving, SBD: Stem Broken Dead, RD: Root uprooted Dead, SPB: Shrub Pressed Branches, SAB: Shrub Above DBH Broken, SBB: Shrub Below DBH Broken)

및 뿌리 피해와 같은 유형은 고사 가능성이 높고, 피해 부위를 통해 병해충이 침입하여 2차 피해가 발생할 수 있다 (Deschênes et al., 2019; Xiang et al., 2025). 이러한 병해충 확산을 방지하기 위해 피해목의 제거가 고려될 수 있다 (Bragg et al., 2003; Deschênes et al., 2019).

관목성 수목의 피해유형에 대한 주성분 분석 결과, 전체 변동의 73.7%가 설명되었으나 피해유형간 유의한 차이를 보이지 않았다($p > 0.05$). SPB가 PC1과 PC2의 양의 영역에 위치하여 수관비와 초살도가 높은 개체에서 발생 빈도가 높았다(Figure 5). SAB는 PC1의 음의 영역에 주로 분포하여 흉고 직경과 수관폭, 수고가 상대적으로 큰 개체에서 자주 나타났고, SBB는 중심 근처에 위치해 다른 변수들과의 관계가 뚜렷하지 않은 것으로 보인다.

2. 수종별 폭설에 대한 감수성 지수 및 영향인자

소나무속은 모든 피해강도의 감수성 지수가 교목성 수목 5속 중에서 가장 높게 나타났고, 특히 피해강도가 가장 높은 수준인 D3의 감수성 지수가 0.87로 매우 높았다(Figure 6). 또한, 향나무속의 D3 감수성 지수는 0.11로 나타났으며, 활엽수종인 뽕나무속은 0.02로 비교적 낮은 감수성 지수를 보였다. 단풍나무속과 참나무속에서는 D3 수준의 피해가 발생하지 않아 침엽수종이 폭설에서 강도 높은 피해에 취약할 수 있다고 판단된다.

전체 수종을 대상으로 혼합모형 분석 결과, 흉고직경이 증가할수록 감수성 지수가 유의하게 감소하는 것으로 나타났고 ($p < 0.001$), 흉고직경이 증가할수록 피해가 감소했다는 선행연구 결과와 유사하였다(Díaz-Yáñez et al., 2019). 수고와 초살

도, 수관폭, 수관비는 유의한 영향을 미치지 않았다($p > 0.05$, Figure 7).

혼합모형을 활용한 속별 감수성 지수 차이 분석에서는 소나무속이 가장 높은 양의 절편값을 보여 폭설 피해에 대한 감수성이 가장 높은 속으로 나타났다($p < 0.001$, Figure 7). 이는 동일한 구조적 조건 속에서도 소나무속이 다른 속에 비해 상대적으로 폭설에 취약함을 시사한다. 반면, 단풍나무속은 타 수종에 비해 상대적으로 낮은 감수성을 보였다.

속별 감수성 지수에 대한 주성분분석 결과, PC1(53.3%)과 PC2(19.0%)에서 전체 변동의 72.3%를 설명하였으며, 속 간 감수성 지수의 차이는 통계적으로 유의하였다($p < 0.001$, Figure 8). 단풍나무속은 수고와 수관폭이 크게 발달한 개체에서 높은 감수성을 나타냈다. 소나무속은 주로 그래프 중심

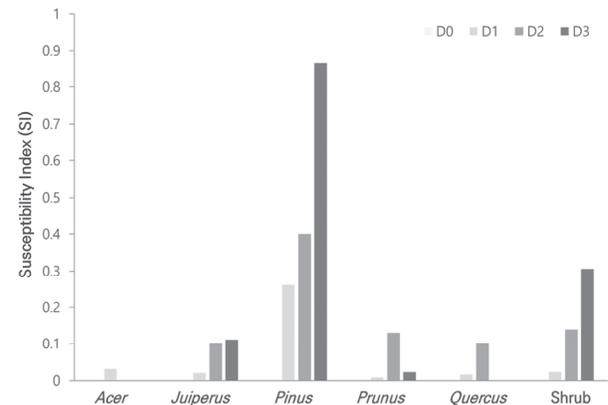


Figure 6. Susceptibility Index (SI) among tree 5 genera (*Acer*, *Juniperus*, *Pinus*, *Prunus*, *Quercus*) and shrub.

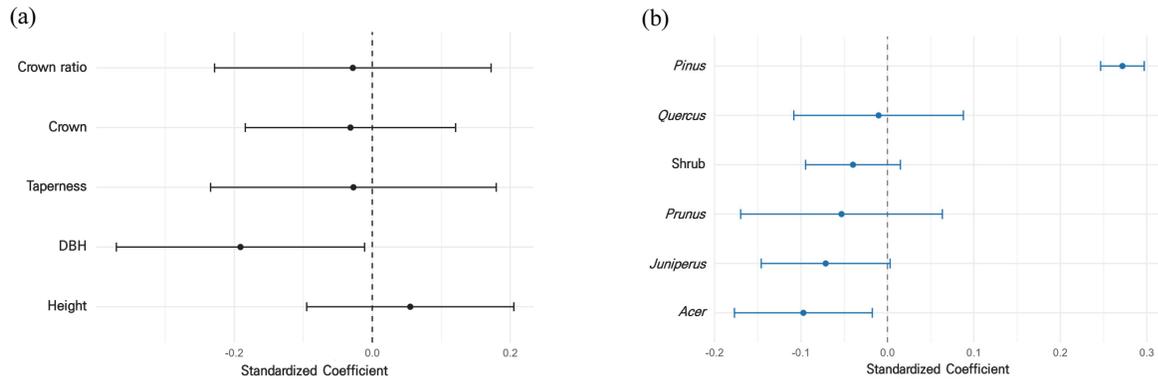


Figure 7. (a) Standardized regression coefficients and 95% confidence intervals for factors affecting snow damage susceptibility, (b) Random intercept estimates (BLUPs) and 95% confidence intervals by tree 5 genera (*Acer*, *Juniperus*, *Pinus*, *Prunus*, *Quercus*) and shrub.

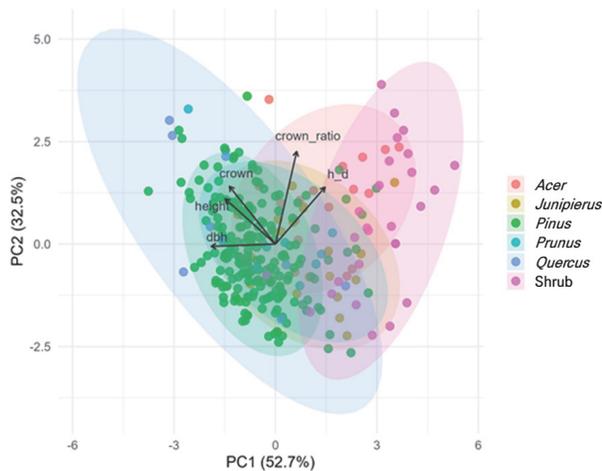


Figure 8. Principal component analysis (PCA) of snow susceptibility index by tree 5 genera (*Acer*, *Juniperus*, *Pinus*, *Prunus*, *Quercus*) and shrub based on height, DBH, taperness, crown width, and crown ratio. (height: Height, dbh: DBH, h_d: Taperness, crown: Crown width, crown_ratio: Crown ratio)

부에 군집하여 생육 특성과 상관없이 폭설에 취약한 특성을 보였으며, 이는 위의 혼합모형의 결과를 뒷받침하였다. 향나무속은 PC2의 양의 영역으로 이동하여 초살도가 감수성 지수에 영향을 미치는 것으로 보인다. 참나무속은 PC1과 PC2 전반에 걸쳐 넓게 분포하여, 참나무속 내 개체 간 구조적 변이가 크다는 점을 보여주었다.

혼합모형 결과와 비교하면, 감수성 지수가 높은 속일수록 수관비와 초살도가 크고, 흉고직경과 수관폭이 상대적으로 작은 영역에 위치하는 경향을 보았다. 반대로 흉고직경과 수관폭이 넓은 개체는 주성분 분석 결과에서 감수성 지수가 낮은 속들과 겹쳐 분포하여 폭설 감수성 지수를 감소시키는 요인임을 확인할 수 있었다. 이는 수목이 지닌 구조적 특성이 폭설에 대한 감수성으로 이어짐을 의미한다. 선행연구에 의하

면, 일반적으로 침엽수종은 활엽수종에 비해 폭설 피해에 취약하며, 특히 소나무속은 구조적 특성으로 인하여 폭설에 민감한 종으로 알려져 있다(Päätaalo et al., 1999; Suzuki et al., 2008; Shao et al., 2011). 활엽수종은 겨울철 낙엽으로 인해 가지에 잎이 없어서 가지 사이로 눈이 통과할 수 있지만, 침엽수종은 잎 때문에 눈이 쌓이게 된다(Suzuki et al., 2008). 또한, 침엽수종 중에서도 소나무속은 가지가 쉽게 휘어져 수관피해가 일어날 수 있다(Suzuki et al., 2008). 따라서, 속별 감수성 지수의 차이는 속의 형태적인 특성에 따른 것이며, 속별로 폭설 취약성이 상이함을 시사한다.

결론

본 연구는 홍릉시험림 내 폭설 피해를 입은 교목성 수목 상위 5개 속과 관목성 수목을 대상으로 수종별 생육특성, 폭설 피해유형 및 감수성 지수를 분석하여 수종 간 피해 양상을 정량적으로 규명하였다. 혼합모형을 통해 수종간 감수성 지수 차이를 밝히고, 주성분 분석으로 피해유형 및 감수성 지수에 영향을 주는 인자들을 파악하고자 하였다.

홍릉시험림 내 폭설 피해유형 분류 결과, 수관피해가 가장 빈번했으며, 수고, 흉고직경, 수관폭, 초살도 등의 생육특성이 피해유형을 결정하였다. 교목성 수목의 피해 중 수관이 절단된 피해(CB)가 전체의 37.7%로 가장 많았다. 이는 교목성 수목의 상부 수관부에서 눈하중이 집중되면서 가지의 물리적 파손이 발생했기 때문으로 해석된다. 교목성 수목의 피해유형별 주성분 분석 결과, 수관피해는 수고와 흉고직경, 수관폭이 크고 수관비(수고/흉고직경×수관폭/평균 수관폭)가 큰 개체에서 빈번하게 발생하였고, 수간 및 뿌리 피해는 초살도와 수관비가 크고 흉고직경이 작은 개체에서 주로 나타났다. 이는 높고 가는 형태의 개체일수록 휨과 도복에 취약하다는 선

행연구와 일치하였다(Nasiri and Fallah, 2012).

5개 속과 관목성 수목에 대한 혼합모형 결과에서는 흉고직경만이 감수성 지수에 유의한 영향을 미쳤으나($p < 0.001$), 감수성 지수에 대한 속별 주성분 분석에서는 특정 속에서 개체의 흉고직경 외 다른 생육 특성도 감수성 지수의 차이를 설명하는 요인으로 작용하였다. 또한 소나무속의 감수성 지수가 유의하게 높아($p < 0.001$), 폭설에 취약한 종임을 확인하였다. 그 외 다른 속과 관목성 수목은 통계적으로 유의하지 않았다($p > 0.05$). 감수성 지수는 흉고직경이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다($p < 0.001$). 속별 감수성 지수에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위해 주성분 분석을 실시한 결과, 단풍나무속은 수고와 수관폭이 크게 발달한 개체에서 높은 감수성을 나타냈으며, 향나무속은 초살도가 감수성 지수에 영향을 미쳤다. 소나무속은 생육 특성과 상관없이 폭설에 취약한 특성을 보였다.

본 연구에서 현장조사 자료를 기반으로 분류한 폭설 피해 유형과 새로이 산출한 속별 감수성 지수 및 영향 요인은 생활권 산림에서 폭설로 인해 발생하는 수목 피해의 특성을 이해하는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 또한, 폭설 이후 산림생태계의 회복탄력성을 평가하고 피해목의 관리 및 제거, 위험 수종의 식재 회피, 식재 밀도 조절 등과 같은 관리 지침을 마련하는 데에도 근거를 제공할 수 있다. 본 연구에서 제시한 피해유형은 향후 기후변화에 따른 폭설뿐 아니라 강풍, 관설해(冠雪害), 우빙해(雨氷害) 등 다양한 기상재해로 인한 산림의 영향 평가에 활용될 수 있으리라 기대된다.

References

- Anderson, M.J. 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology* 26(1): 32-46.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. and Walker, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1): 1-48.
- Ben-Shachar, M.S., Lüdtke, D., and Makowski, D. 2020. effectsize: Estimation of Effect Size Indices and Standardized Parameters. *Journal of Open Source Software* 5(56): 2815.
- Bragg, D.C., Shelton, M.G., and Zeide, B. 2003. Impacts and management implications of ice storms on forests in the southern United States. *Forest Ecology and Management* 186(1-3): 99-123.
- Chen, H., Sun, J. and Lin, W. 2020. Anthropogenic influence would increase intense snowfall events over parts of the Northern Hemisphere in the future. *Environmental Research Letters* 15: 114022.
- Deschênes, É., Brice, M.H., and Brisson, J. 2019. Long-term impact of a major ice storm on tree mortality in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management* 448: 386-394.
- Díaz-Yáñez, O., Mola-Yudego, B., and González-Olabarria, J.R. 2019. Modelling damage occurrence by snow and wind in forest ecosystems. *Ecological Modelling* 408: 108741.
- Gotmark, F., Gotmark, E., and Jensen, A.M. 2016. Why be a shrub? A basic model and hypotheses for the adaptive values of a common growth form. *Frontiers in Plant Science* 7: 1095.
- Haerberli, W. and Whiteman, C. 2015. Snow and ice-related hazards, risks, and disasters: a general framework. In *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* 1-34. Academic Press.
- Irland, L.C. 2000. Ice storms and forest impacts. *Science of the Total Environment* 262(3): 231-242.
- Jones, J.J., Pither, J.P., Debruyn, R.D., and Robertson, R.J. 2001. Modeling ice storm damage to a mature, mixed-species hardwood forest in eastern Ontario. *Ecoscience* 8(4): 513-521.
- Kang, Y.H., Lee, C.Y., Bae, Y.T., and Kim C.B. 2011. characteristics Analysis of Site Condition and Disturbance Resistance of Tree Species for Damaged Forested Land in South Korea. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 14(5): 1-15.
- Kassambara, A. 2025. rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests. R package.
- Kim, B., In, S. and Kim, S. 2022. The study on the selection of performance test conditions for indoor and outdoor experiments of snowfall in winter. *Journal of Korea Water Resources Association* 55(12): 1149-1154.
- Klopčič, M., Poljanec, A., Dolinar, M., Kastelec, D. and Bončina, A. 2020. Ice-storm damage to trees in mixed Central European forests: damage patterns, predictors and susceptibility of tree species. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 93(3): 430-443.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2024. 2024 Climate change report. Daejeon, Korea.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2025. Open MET data portal. Daejeon, Korea.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B. and Christensen, R.H.B. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* 82(13): 1-26.
- Kwon, S.H., Park, H.S. and Chung, G.H. 2016. Analysis of snow vulnerability and adaptation policy for heavy snow.

- Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 16(2): 363-368.
- Mason, N.W., Beets, P.N., Payton, I., Burrows, L., Holdaway, R.J., and Carswell, F.E. 2014. Individual-based allometric equations accurately measure carbon storage and sequestration in shrublands. *Forests* 5(2): 309-324.
- Mendiburu, F. de. 2021. *agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. R package version 1.1-8.
- Nasiri, M. and Fallah, A. 2012. The effect of snow weight on trees bending at the edge of the Hyrcanian forest roads. *African Journal of Agricultural Research* 7(22): 3367-3374.
- NiFos (National Institute of Forest Science). 2022, *The story Hongneung forest*, Seoul, Korea.
- Nykänen, M.L., Peltola, H., Quine, C., Kellomäki, S. and Broadgate, M. 1997. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica* 31: 193-213.
- Oksanen, J. et al. 2022. *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.3-6.
- Päätaalo, M. L., Peltola, H. and Kellomäki, S. 1999. Modelling the risk of snow damage to forests under short-term snow loading. *Forest Ecology and Management* 116(1-3): 51-70.
- Shao, Q., Huang, L., Liu, J., Kuang, W. and Li, J. 2011. Analysis of forest damage caused by the snow and ice chaos along a transect across southern China in spring 2008. *Journal of Geographical Sciences* 21(2): 219-234.
- Song, W.K., Park, G.E., Kim, S.H, and Lim, J.H. 2020. Growth and Physiological Characteristics of *Abies koreana*, *Pinus densiflora*, *Quercus serrata* Seedlings under Elevated Temperature and CO₂ Concentration. *Journal of Climate Change Research* 11(1): 1-9.
- Suvanto, S., Lehtonen, A., Nevalainen, S., Lehtonen, I., Viiri, H., Strandstrom, M. and Peltoniemi, M. 2021. Mapping the probability of forest snow disturbances in Finland. *PloS one* 16(7).
- Suzuki, K., Kodama, Y., Yamazaki, T., Kosugi, K., and Nakai, Y. 2008. Snow accumulation on evergreen needle-leaved and deciduous broad-leaved trees. *Boreal Environment Research* 13(5).
- Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Wickham, H. et al. 2019. Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software* 4(43): 1686.
- Xiang, H. et al. 2025. Long-term forest damage due to an extreme weather event: An ice storm mediated by elevation causes tree breakage in sub-tropical China. *Forest Ecosystems* 13: 100301.

Manuscript Received : November 5, 2025

First Revision : December 2, 2025

Accepted : December 3, 2025