

ORIGINAL ARTICLE

구상나무 현지외보존원에서 생존율 기반 생육구역 간 생장 변화 및 토양환경 특성 비교

박재현 · 서한나 · 임효인 · 변시연*

국립산림과학원 산림생명자원연구부 산림생명정보연구과

Comparison of Growth Changes and Soil Environmental Characteristics between Survival-based Growth Zones in an Ex Situ Conservation Site of Korean fir (*Abies koreana* E.H.Wilson)

Jae-Hyun Park, Han-Na Seo, Hyo-In Lim, Siyeon Byeon*

Division of Forest Bioinformatics, Department of Forest Bio Resources, National Institute of Forest Science, Suwon 16631, Korea

Abstract

This study compared survival, growth changes, and soil moisture characteristics between a good-growth zone and a poor-growth zone within an ex situ conservation site of Korean fir (*Abies koreana* E.H.Wilson) established at the Eocheon Experimental Forest, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea. A total of 280 individuals planted in 2021 (140 per zone) were fully surveyed for survival, and height and root collar diameter of surviving individuals were measured in 2021 and 2025. Soil moisture was monitored continuously from 2020 to 2024 using sensors installed at 30 cm depth in each zone, and annual, seasonal, and consecutive overhydration characteristics were derived. Soil physicochemical and particle size properties were also compared between zones. Survival rate was significantly higher in the good-growth zone than in the poor-growth zone, with a substantially elevated risk of mortality in the poor-growth zone. Height and root collar diameter of surviving individuals increased significantly from 2021 to 2025 in both zones, but growth increments did not differ significantly between zones. In contrast, the poor-growth zone showed distinctly higher annual mean and maximum soil moisture, greater frequency of overhydration, and longer consecutive overhydration periods than the good-growth zone. Soil moisture content, cation exchange capacity, electrical conductivity, and clay content also differed significantly between zones, consistent with the moisture patterns observed from continuous monitoring. These results indicate that poor growth performance in the conservation site is driven primarily by low survival rate and repeated soil overhydration rather than by reduced growth of surviving individuals. Improving drainage, adjusting microtopography, and continuing soil moisture monitoring are recommended as priority measures for site management to enhance long-term establishment success of this endangered subalpine conifer.

Key words : Subalpine conifer, Establishment stability, Consecutive overhydration, Microsite condition, Drainage environment

Received 29 July, 2026; Revised 6 August, 2026;

Accepted 7 August, 2026

*Corresponding author : Siyeon Byeon, Division of Forest Bioinformatics,
Department of Forest Bio Resources, National Institute of Forest Science,
Suwon 16631, Korea

Phone : +82-31-290-1116

E-mail : sybyun419@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

기후변화는 산림생태계의 종 분포, 생장, 고사 및 갱신 과정에 직접적인 영향을 미치며, 특히 고산 및 아고산성 침엽수는 제한된 서식 범위와 좁은 생태적 지위로 인해 환경변화에 취약한 것으로 평가된다(Allen et al., 2010). 전 세계적으로 산림 수목의 고사율 증가는 기온 상승, 수분 스트레스 및 극한기상 증가와 관련되어 보고되었으며, 이는 보전대상 수종의 서식지 관리와 복원전략 수립에서 미세입지 조건의 중요성을 강조한다(van Mantgem et al., 2009). 식물의 잠재분포와 서식 적합성은 기후조건 변화에 따라 달라질 수 있으며, 이러한 변화는 생물다양성 보전계획에서 장기적인 위험요인으로 고려되어야 한다(Parmesan and Yohe, 2003; Thuiller et al., 2005).

구상나무(*Abies koreana* E.H.Wilson)는 한반도 고산 및 아고산 생태계를 대표하는 특산 침엽수로, 기후변화에 따른 분포 축소, 개체군 쇠퇴 및 보전 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 구상나무의 잠재서식지 예측 연구에서는 기후 및 지형요인이 분포 적합성에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되었으며, 향후 기후조건 변화에 따른 대체서식지 탐색과 보전지역 설정의 필요성이 제시되었다(Kim et al., 2015). 또한 representative concentration pathways (RCP) 시나리오 기반 예측에서는 기온과 강수 변화가 구상나무의 장래 분포 가능성에 영향을 줄 수 있음이 확인되었다(Koo et al., 2016). 최근 세밀한 종분포모형 연구에서도 구상나무 보전을 위해서는 지역 규모의 기후·지형·수문 특성을 반영한 보전 우선지역 설정이 필요하다고 보고되었다(Lee et al., 2023).

멸종위기 또는 취약 수종의 보전에서는 자생지 내 보전뿐 아니라 현지외보존, 대체서식지 조성 및 복원재료의 안정적 관리가 중요한 전략으로 활용된다. 보전 목적의 제도입 및 현지외보존은 단순한 식재 행위가 아니라, 대상종의 생존, 생장, 번식 가능성 및 장기적 개체군 유지 가능성을 평가하는 과정으로 이해되어야 한다(Seddon et al., 2007). 식물 제도입 연구에서는 초기 생존율과 장기 모니터링이 복원 성공 여부를 판단하는 핵심 지표로 제시되어 왔으며, 단기 생장 반응만으로 복원성과를 판단하는 데에는 한계가 있다(Godefroid et al., 2011). 따라서 현지외보존원의 성과 평가는 생장량뿐 아니라 식재 후 생존율, 입지환경, 토양수분 조건 및

생육 기반의 안정성을 함께 고려해야 한다(Menges, 2008).

복원생태학에서 식재지의 토양환경은 초기 활착과 생존을 결정하는 주요 요인 중 하나이다. 생태복원은 목표종의 단순한 식재가 아니라 훼손된 생태계 기능을 회복시키는 과정이며, 이를 위해서는 토양, 수분, 지형 및 미세환경 조건이 대상종의 생태적 요구와 부합해야 한다(Hobbs and Harris, 2001). 특히 토양수분은 식물의 수분 이용, 뿌리권 산소 상태, 양분 이동 및 토양-식물 상호작용을 조절하는 핵심 변수이며, 식생 동태를 설명하는 중요한 수문생태학적 요인으로 다루어진다(Rodriguez-Iturbe, 2000). 토양수분은 시간적 변동성과 공간적 이질성이 크기 때문에 평균값뿐 아니라 극단적 수분상태, 지속기간 및 빈도 특성까지 함께 평가할 필요가 있다(Porporato et al., 2002).

구상나무 쇠퇴와 관련해서는 주로 기후변화, 건조 스트레스, 분포 변화 및 자생지 보전 문제가 연구되어 왔다. 백운산 일대 구상나무 임분을 대상으로 한 종분포모형 연구에서는 기후 및 입지 요인이 임분 쇠퇴 및 존속 여부와 밀접하게 관련되는 것으로 보고되었다(Cho et al., 2015). 지리산 구상나무 고사 연구에서는 기후기반 수분 스트레스와 입지 조건이 고사 패턴을 설명하는 데 중요한 요인으로 제시되었다(Lim et al., 2025). 또한 구상나무 묘목의 건조 스트레스 저감 연구에서는 근권 미생물 조절이 스트레스 완화에 기여할 수 있음이 보고되어, 토양환경과 근권 조건이 구상나무 보전전략에서 중요한 요소임을 보여준다(Mannaa et al., 2023). 그러나 현지외보존원 조성지에서 생존율, 생장 변화, 토양수분의 장기 변동성, 연속 과습 특성 및 토양 이화학성을 통합적으로 비교한 연구는 아직 제한적이다.

따라서 본 연구는 구상나무 현지외보존원 내 생육양 호지와 생육불량지를 대상으로 생존율과 생장 변화를 비교하고, 토양수분 파생변수, 계절별 토양수분, 연속 과습 특성 및 토양 이화학성·입도 특성을 분석하여 생육 불량과 관련된 환경요인을 평가하고자 하였다. 이를 통해 구상나무 현지외보존원의 초기 활착 제한요인을 파악하고, 향후 보존원 관리에서 고려해야 할 토양수분 및 입지환경 관리 방향을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지 및 조사구 설정

본 연구는 경기도 화성시 매송면 어천리(북위 약 37°16'N, 동경 약 126°55'E) 칠보산 자락에 위치한 국립산림과학원 산림생명자원연구부 어천시험림 내에 조성된 구상나무(*Abies koreana* E.H.Wilson) 현지의 보존원을 대상으로 수행하였다. 공시개체는 2021년에 식재되었으며, 현장조사를 통하여 생육상태가 양호한 지역(good-growth zone)과 생육상태가 불량한 지역(poor-growth zone)을 선정하였다. 생육양호지는 식재 후 활착이 안정적으로 이루어져 생존 개체가 지속적으로 유지되는 지역으로 정의하였으며, 생육불량지는 고사율이 높고 생존 개체수가 적은 지역으로 정의하였다. 두 조사구는 동일한 현지의보존원 내에 위치하며 식재연도(2021년)와 관리방법은 동일하지만 미세지형과 토양환경 특성이 상이한 지역이다. 생존율 분석을 위하여 각 조사구에서 식재된 140주씩 총 280주를 대상으로 전수조사를 실시하였으며, 생존 여부를 기록하였다. 생존 개체를 대상으로 생육조사를 수행하여 생육양호지와 생육불량지의 생장 특성을 비교하였다.

2.2. 생존율 및 생육조사

생육조사는 식재 당시 조사된 초기자료(2021년)와 최종 조사자료(2025년)를 이용하였다. 조사 항목은 수고(height)와 근원경(root collar diameter)으로 설정하였다. 수고는 줄자(측정 정밀도 0.1 cm)를 이용하여 지면으로부터 정단부까지의 길이를 측정하였으며, 근원경은 디지털 캘리퍼스(측정 정밀도 0.01 mm)를 이용하여 지표면 직상부의 줄기 직경을 측정하였다. 생존율은 식재 개체수 대비 생존 개체수의 비율(%)로 산출하였다. 생존 개체를 대상으로 초기 조사와 최종 조사 간 수고 및 근원경 증가량을 산출하였으며, 생장량은 최종값에서 초기값을 차감하여 계산하였다. 이를 통하여 두 조사구 간 초기 활착과 생육 특성을 비교하였다.

2.3. 토양수분 모니터링 및 토양수분 파생변수 산출

토양수분 특성은 생육양호지와 생육불량지에 각각 1대씩 설치된 토양수분센서(HOBO, Onset Computer Corporation, USA)를 이용하여 수집된 자료를 활용하였다. 센서는 각 조사구 내 지표하 30 cm 깊이에 설치하였으며, 30분 간격으로 토양수분 자료를 측정·기록하였다. 분석에는 2020년부터 2024년까지의 자료를 일 단위로 평균하여 산출한 일평균 토양수분 자료

를 이용하였으며, 이상치와 결측치를 제거한 후 분석을 수행하였다. 토양수분은 체적함수율(volumetric water content, m^3m^{-3})로 표현하였다. 연도별 토양수분 특성을 평가하기 위하여 연평균 토양수분, 연최소 토양수분, 연최대 토양수분, 표준편차 및 변동계수(coefficient of variation, CV)를 산출하였다. 또한 전체 토양수분 자료의 10% 이하를 건조(dry period), 90% 이상을 과습(overhydration) 상태로 정의하여 연간 건조빈도와 과습빈도를 계산하였다. 계절별 토양수분 특성을 비교하기 위하여 봄(3-5월), 여름(6-8월), 가을(9-11월), 겨울(12-2월)의 평균 토양수분을 산출하였다. 반복적인 과습환경을 평가하기 위하여 연속 과습 특성을 분석하였다. 연속 과습은 일평균 토양수분이 90% 이상인 상태가 연속적으로 유지되는 기간으로 정의하였다. 이를 바탕으로 연간 과습일수, 과습 발생빈도, 과습 사건 수, 사건당 평균 연속 과습일수, 최대 연속 과습일수 및 3일 이상, 5일 이상, 7일 이상 지속된 과습 사건 수를 각각 산출하였다.

2.4. 토양 이화학성 및 입도 분석

토양 시료는 생육양호지와 생육불량지에서 각각 채취하였다. 채취한 시료는 토양 이화학성과 입도 분석을 실시하였다. 시험은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법, 토양오염공정시험기준을 적용하여 수행하였다(KS F 2104, KS F 2302). 분석 항목은 수분함량(%), 유기물(%), 유효인산($mg\ kg^{-1}$), 총질소(Total N, %), 양이온치환용량(cation exchange capacity, CEC, $cmol^+ kg^{-1}$), 전기전도도(electrical conductivity, EC, $dS\ m^{-1}$), pH, 용적밀도($Mg\ m^{-3}$)으로 설정하였다. 입도는 체분석과 비중계법을 이용하여 모래(sand), 미사(silt), 점토(clay)의 구성비(%)를 산출하였다.

2.5. 통계분석

통계분석에 앞서 각 변수의 정규성을 Shapiro-Wilk 검정으로 확인하였다. Shapiro-Wilk 검정은 표본수($n < 50$)에서도 검정력이 높아 정규성 위반을 민감하게 탐지할 수 있는 장점이 있으나, 표본수가 극히 적을 경우 정규성 판정이 불안정해지고 이상값(outlier)에 의해 정규성이 과도하게 기각될 수 있다는 단점이 있다. 생존 개체의 수고 및 근원경과 같이 표본수가 상대적으로 크고, 정규성 가정을 만족하는 변수는 모수적 검정을 적용

Table 1. Comparison of survival rate between good-growth and poor-growth zones

Site condition	Planted individuals	Survived individuals	Dead individuals	Survival rate (%)
Good-growth zone	140	71	69	50.7
Poor-growth zone	140	10	130	7.1

Note. Pearson's chi-square test was used to compare survival frequency between site conditions, $\chi^2(1) = 64.64$, $p < 0.05$. Fisher's exact test also showed a significant difference between site conditions, $p < 0.05$. Odds ratio = 13.38, 95% Confidence interval (CI) = 6.49–27.58; risk ratio = 7.10, 95% Confidence interval (CI) = 3.82–13.19.

Table 2. Changes in height and root collar diameter from 2021 to 2025 in surviving individuals

Site condition	Growth variable	2021	2025	Increment	<i>t</i> -value	<i>p</i> -value
Good-growth zone	Height (cm)	22.38 ± 6.20	66.32 ± 34.34	43.94 ± 32.80	11.29	< 0.05
Good-growth zone	Root collar diameter (mm)	7.73 ± 1.35	21.24 ± 6.50	13.51 ± 6.26	18.17	< 0.05
Poor-growth zone	Height (cm)	14.40 ± 3.74	46.75 ± 28.10	32.35 ± 25.58	4.00	< 0.05
Poor-growth zone	Root collar diameter (mm)	6.53 ± 1.26	17.30 ± 7.83	10.77 ± 6.95	4.91	< 0.05

Note. Values are means ± standard deviations; Paired *t*-test was used to compare 2021 and 2025 values within each site condition.

하였고, 연간 단위로 집계된 토양수분 파생변수와 같이 표본수가 적어 정규성 가정을 충족하기 어려운 변수는 비모수적 검정을 적용하였다. 생존율은 Pearson의 카이제곱 검정(Pearson's chi-square test)과 Fisher의 정확검정(Fisher's exact test)을 이용하여 비교하였으며, 생존위험비(risk ratio)와 승산비(odds ratio)를 95% 신뢰구간과 함께 산출하였다. 생존 개체의 수고와 근원경 변화는 대응표본 *t*-검정(paired *t*-test)을 이용하여 2021년과 2025년 값을 비교하였다. 두 조사구 간 성장량 비교는 분산의 동질성을 고려하여 Welch의 *t*-검정(Welch's *t*-test)을 적용하였다. 토양수분 파생변수, 계절별 토양수분, 연속 과습 특성 및 토양 이화학적·입도 특성은 표본수가 적은 점을 고려하여 비모수 검정인 Mann-Whitney *U* 검정을 이용하여 생육양호지와 생육불량지를 비교하였다. 다수의 환경변수에 대하여 반복적으로 검정을 수행한 점을 고려할 때, 본 연구의 토양환경 변수 비교는 확증적(confirmatory) 검정이 아닌 생육불량 요인을 탐색하기 위한 탐색적(exploratory) 분석의 성격을 가지므로 다중비교 보정은 별도로 적용하지 않았다. 모든 통계분석의 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였으며, 분석에는 R 통계 소프트웨어(R Core Team, ver. 4.6.0)를 이용하였다.

3. 결과

3.1. 생육양호지와 생육불량지의 생존율 및 성장 변화

생육양호지의 생존율은 50.7%(71/140)였으며, 생육불량지의 생존율은 7.1%(10/140)로 나타났다(Table 1). 지역 조건에 따른 생존 여부의 차이를 검정한 결과, 두 구역 간 생존율 차이는 통계적으로 유의하였다($\chi^2(1) = 64.64$, $p < 0.05$). Fisher's exact test에서도 유의한 차이가 확인되었다($p < 0.05$). 생육양호지의 생존위험비(risk ratio)는 7.10으로 산출되었으며, 승산비(odds ratio)는 13.38로 나타났다.

생존 개체를 대상으로 2021년과 2025년의 생육변화를 비교한 결과, 두 구역 모두에서 수고와 근원경이 유의하게 증가하였다(Table 2). 생육양호지의 수고는 22.38 ± 6.20 cm에서 66.32 ± 34.34 cm로 증가하였으며($t(70) = 11.29$, $p < 0.05$), 근원경은 7.73 ± 1.35 mm에서 21.24 ± 6.50 mm로 증가하였다($t(70) = 18.17$, $p < 0.05$). 생육불량지에서도 수고는 14.40 ± 3.74 cm에서 46.75 ± 28.10 cm로 증가하였고($t(9) = 4.00$, $p < 0.05$), 근원경은 6.53 ± 1.26 mm에서 17.30 ± 7.83 mm로 증가하였다($t(9) = 4.91$, $p < 0.05$).

수고 성장량은 생육양호지에서 43.94 ± 32.80 cm, 생육불량지에서 32.35 ± 25.58 cm로 나타났으며, 생육양호지의 평균값이 11.59 cm 높았다(Table 3). 근원경 성장량은 생육양호지에서 13.51 ± 6.26 mm, 생육불량지에서 10.78 ± 6.95 mm로 나타났으며, 생육

Table 3. Comparison of growth increments between good-growth and poor-growth zones

Growth variable	Good-growth zone	Poor-growth zone	Mean difference	<i>t</i> -value	<i>p</i> -value
Height increment (cm)	43.94 ± 32.80	32.35 ± 25.58	11.59	1.29	0.218
Root collar diameter increment (mm)	13.51 ± 6.26	10.78 ± 6.95	2.73	1.18	0.263

Note. Values are means ± standard deviations. Welch's *t*-test was used to compare growth increments between site conditions. Degrees of freedom were adjusted using Welch's approximation.

Table 4. Comparison of annual soil moisture-derived variables between good-growth and poor-growth zones (2020–2024)

Variable	Good-growth zone (mean ± SD)	Poor-growth zone (mean ± SD)	Mann-Whitney <i>U</i>	<i>p</i> -value
Annual mean soil moisture	0.2039 ± 0.0056	0.2747 ± 0.0227	0.0	< 0.05
Annual minimum soil moisture	0.0773 ± 0.0272	0.1631 ± 0.0954	5.0	0.1508
Annual maximum soil moisture	0.2726 ± 0.0196	0.4204 ± 0.0420	0.0	< 0.05
Annual standard deviation	0.0394 ± 0.0070	0.0425 ± 0.0277	16.0	0.5476
Annual coefficient of variation (CV)	0.1935 ± 0.0371	0.1607 ± 0.1215	20.0	0.1508
Dry period frequency	0.1323 ± 0.0713	0.0355 ± 0.0722	21.0	0.0937
Overhydration frequency	0.0005 ± 0.0012	0.2000 ± 0.2410	0.0	< 0.05

Note. Soil moisture values are expressed as volumetric water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Values are means ± standard deviations. Mann-Whitney *U* test was used to compare annual soil moisture-derived variables between good-growth and poor-growth zones. Dry and overhydration frequencies were calculated using the 10% and 90% thresholds of the cleaned daily mean soil moisture dataset, respectively.

양호지의 평균값이 2.73 mm 높았다. Welch's *t*-test 결과, 수고 생장량($t(13.56) = 1.29, p = 0.218$)과 근원경 생장량($t(11.16) = 1.18, p = 0.263$) 모두 두 구역 간 통계적 차이는 유의하지 않았다. 이러한 결과는 두 구역 간 생존율에는 뚜렷한 차이가 있었던 반면, 생존한 개체의 생장 반응 자체에는 유의한 차이가 없음을 보여주며, 초기 활착의 성공 여부가 이후의 생장보다 입지환경 스트레스에 더 민감하게 반응한다는 점을 시사한다.

3.2. 생육양호지와 생육불량지의 토양수분 특성 차이

연도별 토양수분 파생변수를 비교한 결과, 생육불량지는 생육양호지보다 연평균 및 연최대 토양수분이 유의하게 높았다(Table 4). 연평균 토양수분은 생육양호지 0.2039 ± 0.0056 , 생육불량지 0.2747 ± 0.0227 로 나타났으며, 생육불량지에서 유의하게 높았다($U = 0.0, p < 0.05$). 연최대 토양수분도 생육양호지 0.2726 ± 0.0196 , 생육불량지 0.4204 ± 0.0420 로 유의한 차이를 보였다($U = 0.0, p < 0.05$). 반면, 연최소 토양수분, 연표준편차, 변동계수 및 건조빈도는 유의하지 않았고, 과습빈도는 생육불량지에서 유의하게 높았다

($U = 0.0, p < 0.05$).

계절별 평균 토양수분을 비교한 결과, 생육불량지는 모든 계절에서 생육양호지보다 높은 토양수분을 보였다(Table 5). 봄철 평균 토양수분은 생육양호지에서 $0.2183 \pm 0.0050 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, 생육불량지에서 $0.2775 \pm 0.0281 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 로 나타났으며, 생육불량지가 $0.0592 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 높아 통계적으로 유의한 차이를 보였다($U = 0.0, p < 0.05$). 여름철에는 생육양호지 $0.1992 \pm 0.0314 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, 생육불량지 $0.2910 \pm 0.0094 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 로 나타나 계절 중 가장 큰 차이인 $0.0918 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 를 보였으며, 두 구역 간 차이는 유의하였다($U = 0.0, p < 0.05$). 가을철 평균 토양수분 역시 생육양호지 $0.2167 \pm 0.0131 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, 생육불량지 $0.2942 \pm 0.0163 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 로 생육불량지가 $0.0775 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 높았으며, 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다($U = 0.0, p < 0.05$). 반면 겨울철에는 생육양호지 $0.1808 \pm 0.0336 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, 생육불량지 $0.2298 \pm 0.0677 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 로 생육불량지가 $0.0490 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ 높았으나, 두 구역 간 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($U = 5.0, p = 0.1508$). 전체적으로 생육불량지는 봄, 여름 및 가을에 지속적으로 높은 토양

Table 5. Seasonal mean soil moisture in good-growth and poor-growth zones

Season	Good-growth zone	Poor-growth zone	Difference (Poor-Good)	Mann-Whitney <i>U</i>	<i>p</i> -value
Spring	0.2183 ± 0.0050	0.2775 ± 0.0281	0.0592	0.0	< 0.05
Summer	0.1992 ± 0.0314	0.2910 ± 0.0094	0.0918	0.0	< 0.05
Autumn	0.2167 ± 0.0131	0.2942 ± 0.0163	0.0775	0.0	< 0.05
Winter	0.1808 ± 0.0336	0.2298 ± 0.0677	0.0490	5.0	0.1508

Note. Soil moisture values are expressed as volumetric water content (m^3m^{-3}). Values are means ± standard deviations of annual seasonal means. Mann-Whitney *U* tests were used to compare seasonal soil moisture between good-growth and poor-growth zones. $p < 0.05$.

Table 6. Comparison of consecutive overhydration metrics between good-growth and poor-growth zones (2020–2024)

Variable	Good-growth zone (mean±SD)	Poor-growth zone (mean±SD)	Mann-Whitney <i>U</i>	<i>p</i> -value
Number of overhydration days	0.20 ± 0.45	51.60 ± 74.12	0.0	< 0.05
Frequency of overhydration days	0.0005 ± 0.0012	0.2000 ± 0.2410	0.0	< 0.05
Number of overhydration events	0.20 ± 0.45	13.00 ± 11.90	1.0	< 0.05
Mean consecutive overhydration days per event	0.20 ± 0.45	4.25 ± 3.53	0.0	< 0.05
Maximum consecutive overhydration days	0.20 ± 0.45	22.20 ± 40.74	0.0	< 0.05
Number of events lasting ≥ 3 days	0.00 ± 0.00	4.20 ± 5.67	2.5	< 0.05
Number of events lasting ≥ 5 days	0.00 ± 0.00	1.40 ± 2.61	7.5	0.1797
Number of events lasting ≥ 7 days	0.00 ± 0.00	1.20 ± 2.17	7.5	0.1797

Note. Soil moisture values are expressed as volumetric water content (m^3m^{-3}). Values are means ± standard deviations. Mann-Whitney *U* test was used to compare consecutive overhydration metrics between good-growth and poor-growth zones. Overhydration was defined as days when daily mean soil moisture exceeded the 90% threshold of the cleaned dataset. Consecutive overhydration days were calculated as uninterrupted calendar-day sequences.

수분을 나타냈으며, 특히 여름철에 두 구역 간 토양수분 차이가 가장 크게 나타났다.

연속 과습 특성을 비교한 결과, 생육불량지는 생육양호지보다 과습 발생량과 지속성 지표가 전반적으로 높았다(Table 6). 연간 과습일수는 생육양호지 0.20 ± 0.45일, 생육불량지 51.60 ± 74.12일로 나타났으며, 생육불량지에서 유의하게 높았다($U = 0.0$, $p < 0.05$). 과습 사건 수 역시 생육양호지 0.20 ± 0.45회, 생육불량지 13.00 ± 11.90회로 유의한 차이를 보였다($U = 1.0$, $p < 0.05$). 사건당 평균 연속 과습일수와 최대 연속 과습일수도 생육불량지에서 유의하게 높았으며, 3일 이상 지속된 과습 사건 수 역시 유의한 차이를 보였다($U = 2.5$, $p < 0.05$). 반면, 5일 이상 및 7일 이상 지속된 과습 사건 수는 유의한 차이를 보이지 않았다($p = 0.1797$). 이러한 결과는 생육불량지가 단순히 평균적으로 습한 것이 아니라 반복적이고 장기간 지속되는 과습 사건에 더 자주 노출되었음을 나타내며, 이러한 지속

적 과습은 근권 내 산소 확산을 저해하여 뿌리 호흡과 초기 활착에 부정적 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다.

3.3. 생육양호지와 생육불량지의 토양 이화학적 및 입도 특성 차이

토양 이화학적 및 입도 특성을 비교한 결과, 수분함량, CEC, EC 및 점토 함량에서 두 구역 간 유의한 차이가 나타났다(Table 7). 수분함량은 생육양호지 8.972 ± 2.043%, 생육불량지 12.660 ± 3.272%로 나타났으며, 생육불량지에서 유의하게 높았다($U = 3.0$, $p < 0.05$). CEC는 생육양호지 5.738 ± 0.160 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$, 생육불량지 6.776 ± 0.784 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$ 으로 생육불량지에서 유의하게 높았고($U = 0.5$, $p < 0.05$), EC도 생육양호지 0.115 ± 0.011 dS m^{-1} , 생육불량지 0.156 ± 0.044 dS m^{-1} 로 생육불량지에서 유의하게 높았다($U = 2.0$, $p < 0.05$). 점토 함량은 생육양호지 1.088 ± 0.076%, 생육불량지 0.880 ± 0.148%로 나타났으며,

Table 7. Comparison of soil physicochemical and particle size properties between good-growth and poor-growth zones

Variable	Good-growth zone	Poor-growth zone	Mann-Whitney <i>U</i>	<i>p</i> -value
Organic matter (%)	1.996 ± 0.391	2.560 ± 0.777	7.0	0.3095
Moisture content (%)	8.972 ± 2.043	12.660 ± 3.272	3.0	< 0.05
Available P (mg kg ⁻¹)	1.099 ± 0.659	2.750 ± 2.181	6.0	0.2222
Total N (%)	0.127 ± 0.057	0.138 ± 0.074	12.5	1.0000
CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹)	5.738 ± 0.160	6.776 ± 0.784	0.5	< 0.05
EC (dS m ⁻¹)	0.115 ± 0.011	0.156 ± 0.044	2.0	< 0.05
pH	6.720 ± 0.449	6.680 ± 0.277	14.0	0.8413
Sand (%)	68.284 ± 10.852	55.360 ± 5.522	21.0	0.0952
Silt (%)	30.628 ± 10.882	43.760 ± 5.447	4.0	0.0952
Clay (%)	1.088 ± 0.076	0.880 ± 0.148	22.0	< 0.05
Bulk density (Mg m ⁻³)	1.405 ± 0.033	1.356 ± 0.045	20.5	0.1508

Note. Values are means ± standard deviations. Mann-Whitney *U* test was used to compare soil physicochemical and texture properties between good-growth and poor-growth zones. Moisture content indicates field soil moisture content. CEC, cation exchange capacity; EC, electrical conductivity; Available P, available phosphorus; Total N, total nitrogen. Significant differences were determined at *p* < 0.05.

생육양호지에서 유의하게 높았다($U = 22.0$, $p < 0.05$). 반면, 유기물, 유효인산, 전질소, pH, 모래, 미사 및 용적밀도는 두 구역 간 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과는 생육불량지의 상대적으로 높은 점토 함량이 토양의 보수력을 높여 앞서 확인된 과습성 토양수분 환경 형성에 기여했을 가능성을 시사하며, 함께 높게 나타난 CEC와 EC는 세립질 토양에서 흔히 관찰되는 특성으로 배수 특성과 밀접하게 관련될 수 있다.

4. 고찰

본 연구에서 생육양호지는 생육불량지보다 생존율이 현저히 높았으나, 생존 개체의 수고 및 근원경 생장량은 두 구역 간 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 식재 후 초기 성과를 판단할 때 생장량보다 생존율이 입지 적합성과 활착 안정성을 더 민감하게 반영할 수 있음을 보여준다(Grossnickle, 2012). 또한 구상나무는 기후와 미세입지 조건에 따라 분포와 개체군 유지 가능성이 달라지는 수종이므로, 생육불량지의 낮은 생존율은 단순한 개체 생장 저하보다 입지 환경의 제한성을 우선적으로 검토해야 함을 시사한다(Park et al., 2018).

두 구역 간 가장 뚜렷한 차이는 토양수분 특성에서 확인되었다. 생육불량지는 생육양호지보다 연평균 토양수분, 연최대 토양수분, 과습빈도 및 연속 과습지표가 높았으며, 이는 단순한 일시적 고수분 상태가 아니라

반복적이고 지속적인 과습환경을 의미한다. 과습 또는 침수 조건은 토양 공극 내 산소 확산을 제한하고 뿌리권 저산소를 유발할 수 있으며, 이러한 조건은 뿌리 호흡과 에너지 대사에 직접적인 영향을 준다(Jackson and Colmer, 2005). 식물은 침수 스트레스에 대응하여 호르몬 매개의 기공 반응, 회피 및 휴면 전략을 나타내며(Bashar et al., 2019), 이러한 침수 내성 전략은 종에 따라 뚜렷한 차이를 보인다(Blom and Voesenek, 1996). 식물은 저산소 조건에서 대사 전환과 생장 조절을 통해 생존을 시도하지만, 스트레스가 반복되거나 지속되면 활착 실패와 고사율 증가로 이어질 수 있다(Bailey-Serres and Voesenek, 2008). 이러한 저산소 신호는 에틸렌 및 산화질소 매개 경로를 통해 조절되며(Sasidharan et al., 2018; Hartman et al., 2019), 이 신호전달 체계는 광조건과 상호작용하여 생장 반응을 다층적으로 조절하는 것으로 알려져 있다(Voesenek et al., 2016).

생존 개체는 두 구역 모두에서 2021년 대비 2025년에 유의하게 성장하였으나, 지역 간 생장량 차이는 유의하지 않았다. 이는 생육불량지에서 고사하지 않고 남은 개체들이 상대적으로 환경 스트레스를 견딘 개체였을 가능성과 함께, 생장량 분석이 생존 개체만을 대상으로 이루어진 데 따른 생존자 편향을 고려할 필요가 있음을 보여준다. 침수·과습 스트레스에 대한 식물

반응은 회피전략, 정지전략, 에틸렌 및 산소 신호 조절 등으로 복합적으로 나타나며, 이러한 반응은 생장 저하보다 생존 여부에 먼저 반영될 수 있다(Voesenek and Bailey-Serres, 2015). 구상나무를 대상으로 한 최근 수분 스트레스 연구에서도 과습은 에너지 대사, 질소동화 및 엽록소 유지에 영향을 줄 수 있음이 보고되었다(Chandrasekaran et al., 2024).

토양 이화학적 및 입도 특성에서는 수분함량, CEC, EC 및 점토 함량에서 구역 간 차이가 나타났다. 이 중 생육불량지에서 높은 수분함량과 EC는 장기 토양수분 분석에서 확인된 고수분·과습 특성과 같은 방향의 결과이며, 토양 용액 내 이온 농도와 근권 환경 차이를 반영할 수 있다(Drew, 1997). 다만 토양 이화학적 자료는 표본 수가 제한적이므로 개별 인자를 생육불량의 직접 원인으로 단정하기보다는, 과습성 토양수분 환경을 보조적으로 설명하는 자료로 해석하는 것이 타당하다(Jeong et al., 2023). 종합하면, 본 연구의 결과는 구상나무 현지외보존원에서 생육불량의 핵심이 생존 개체의 생장 저하보다는 낮은 생존율과 반복적 과습환경에 있으며, 향후 관리에서는 배수 개선, 미세지형 조정 및 연속 과습기간 저감이 우선되어야 함을 보여준다(Yun et al., 2018).

5. 결론

본 연구는 구상나무 현지외보존원에서 생육양호지와 생육불량지의 생존율, 생장 변화, 토양수분 및 토양 이화학적성을 비교하여 생육불량과 관련된 환경요인을 평가하였다. 생육양호지는 생육불량지보다 생존율이 현저히 높았으며, 생존 개체의 수고와 근원경은 두 구역 모두에서 2021년 대비 2025년에 유의하게 증가하였다. 그러나 생장량의 구역 간 차이는 유의하지 않아, 생육불량지의 주요 문제는 생존 개체의 생장 저하보다는 낮은 생존율에 있는 것으로 판단된다. 토양수분 분석에서는 생육불량지가 연평균 및 연최대 토양수분, 과습빈도, 연속 과습일수에서 높은 값을 보여 반복적 과습환경에 노출된 것으로 나타났다. 따라서 구상나무 생육 관리를 위해서는 배수 개선, 미세지형 조정, 토양수분 모니터링이 우선적으로 필요하다. 다만 본 연구는 단일 보존원과 제한된 토양 시료를 대상으로 하였으므로, 향후 장기 모니터링과 반복 조사구 기반의 추가 검증이 필요하다.

감사의 글

This study was supported by National Institute of Forest Science, Korea Forest Service (No. FG0802-2023-01-2026).

REFERENCES

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., Cobb, N., 2010, A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *For. Ecol. Manage.*, 259(4), 660-684.
- Bailey-Serres, J., Voesenek, L. A. C. J., 2008, Flooding stress: Acclimations and genetic diversity, *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 313-339.
- Bashar, K. K., Tareq, M. Z., Amin, M. R., Honi, U., Tahjib-Ul-Arif, M., Sadat, M. A., Hossen, Q. M. M., 2019, Phytohormone-mediated stomatal response, escape and quiescence strategies in plants under flooding stress, *Agronomy*, 9(2), 43.
- Blom, C. W. P. M., Voesenek, L. A. C. J., 1996, Flooding: the survival strategies of plants, *Trends Ecol. Evol.*, 11(7), 290-295.
- Chandrasekaran, U., Park, S., Kim, K., Byeon, S., Han, A. R., Lee, Y. S., Oh, N. H., Chung, H., Choe, H., Kim, H. S., 2024, Energy deprivation affects nitrogen assimilation and fatty acid biosynthesis leading to leaf chlorosis under waterlogging stress in the endangered *Abies koreana*, *Tree Physiol.*, 44(6), tpae055.
- Cho, S. H., Park, J. Y., Park, J. H., Lee, Y. G., Mun, L. M., Kang, S. H., Kim, G. H., Yun, J. G., 2015, A Study for continue and decline of *Abies koreana* forest using species distribution model: Focused in Mt. Baekwun, Gwangyang-si, Jeollanam-do, *J. Korean For. Soc.*, 104(3), 360-367.
- Drew, M. C., 1997, Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 48, 223-250.
- Godefroid, S., Piazza, C., Rossi, G., Buord, S., Stevens, A. D., Aguraiuja, R., Cowell, C., Weekley, C. W., Vogg, G., Iriondo, J. M., Johnson, I., Dixon, B., Gordon, D., Magnanon, S., Valentin, B., Bjureke, K., Koopman, R., Vicens, M., Virevaire, M.,

- Vanderborght, T., 2011, How successful are plant species reintroductions?, *Biol. Conserv.*, 144(2), 672-682.
- Grossnickle, S. C., 2012, Why seedlings survive: Influence of plant attributes, *New For.*, 43(5-6), 711-738.
- Hartman, S., Liu, Z., van Veen, H., Vicente, J., Reinen, E., Martopawiro, S., Zhang, H., van Dongen, N., Bosman, F., Bassel, G. W., Visser, E. J. W., Bailey-Serres, J., Theodoulou, F. L., Hebelstrup, K. H., Gibbs, D. J., Holdsworth, M. J., Sasidharan, R., 2019, Ethylene-mediated nitric oxide depletion pre-adapts plants to hypoxia stress, *Nat. Commun.*, 10, 4020.
- Hobbs, R. J., Harris, J. A., 2001, Restoration ecology: repairing the earth's ecosystems in the new millennium, *Restor. Ecol.*, 9(2), 239-246.
- Jackson, M. B., Colmer, T. D., 2005, Response and adaptation by plants to flooding stress, *Ann. Bot.*, 96(4), 501-505.
- Jeong, M., Tägele, S. B., Kim, M. J., Ko, S. H., Kim, K. S., Koh, J. G., Jung, D. R., Jo, Y., Jung, Y., Park, Y. J., Kim, M. S., Lim, K. W., Shin, J. H., 2023, The death of Korean fir (*Abies koreana*) affects soil symbiotic fungal microbiome: Preliminary findings, *Front. For. Glob. Change*, 5, 1114390.
- Kim, N. S., Han, D. U., Cha, J. Y., Park, Y. S., Cho, H. J., Kwon, H. J., Cho, Y. C., Oh, S. H., Lee, C. S., 2015, A detection of novel habitats of *Abies koreana* by using species distribution models (SDMs) and its application for plant conservation, *J. Korean Soc. Environ. Restor. Technol.*, 18(6), 135-149.
- Koo, K. A., Kim, J. U., Kong, W. S., Jung, H. C., Kim, G. H., 2016, Projecting the potential distribution of *Abies koreana* in Korea under the climate change based on RCP scenarios, *J. Korean Soc. Environ. Restor. Technol.*, 19(6), 19-30.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS), 2022, Test method for particle size distribution of soils, KS F 2302, Korean Agency for Technology and Standards, Eumseong, Korea, <https://standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do?tmpPrKsNo=KSF2302&reformNo=12&ksNo=KSF2302>
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS), 2023, Testing method of organic matter in soils by ignition loss, KS F 2104, Korean Agency for Technology and Standards, Eumseong, Korea, <https://www.kssn.net/search/stdDetail.do?itemNo=K001010143030>
- Lee, K., Kim, D., Cha, J., Hong, S., 2023, Fine-scale species distribution modeling of *Abies koreana* across a subalpine zone in South Korea for in situ species conservation, *Sustainability*, 15(11), 8964.
- Lim, W., Park, H. C., Park, S., Seo, J. W., Kim, J., Ko, D., 2025, Modeling tree mortality induced by climate change-driven drought: A Case study of Korean fir in the subalpine forests of Jirisan National Park, South Korea, *Forests*, 16(1), 84.
- Mannaa, M., Han, G., Jung, H., Park, J., Kim, J. C., Park, A. R., Seo, Y. S., 2023, *Aureobasidium pullulans* treatment mitigates drought stress in *Abies koreana* via rhizosphere microbiome modulation, *Plants*, 12(20), 3653.
- Menges, E. S., 2008, Restoration demography and genetics of plants: when is a translocation successful?, *Aust. J. Bot.*, 56(3), 187-196.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAT), 2000, Methods of soil and plant analysis, Technical manual, Rural Development Administration (RDA), Suwon, Korea, <https://book.nifos.go.kr/search.do/10110/contents/5780274>
- Park, J. S., Shin, H. S., Choi, C. H., Lee, J., Kim, J., 2018, Hierarchical environmental factors affecting the distribution of *Abies koreana* on the Korean Peninsula, *Forests*, 9(12), 777.
- Parmesan, C., Yohe, G., 2003, A Globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 421, 37-42.
- Porporato, A., D'Odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L., Rodriguez-Iturbe, I., 2002, Ecohydrology of water-controlled ecosystems, *Adv. Water Resour.*, 25(8-12), 1335-1348.
- Rodriguez-Iturbe, I., 2000, Ecohydrology: A Hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics, *Water Resour. Res.*, 36(1), 3-9.
- Sasidharan, R., Hartman, S., Liu, Z., Martopawiro, S., Sajeev, N., van Veen, H., Yeung, E., Voesenek, L. A. C. J., 2018, Signal dynamics and interactions during flooding stress, *Plant Physiol.*, 176(2), 1106-1117.
- Seddon, P. J., Armstrong, D. P., Maloney, R. F., 2007, Developing the science of reintroduction biology, *Conserv. Biol.*, 21(2), 303-312.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., Prentice, I. C., 2005, Climate change threats to plant diversity in Europe, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 102(23), 8245-8250.
- Van Mantgem, P. J., Stephenson, N. L., Byrne, J. C., Daniels, L. D., Franklin, J. F., Fulé, P. Z., Harmon, M. E., Larson, A. J., Smith, J. M., Taylor, A. H., Veblen, T. T., 2009, Widespread increase of tree mortality rates in the western United States, *Science*, 323(5913), 521-524.
- Voesenek, L. A. C. J., Bailey-Serres, J., 2015, Flood

- adaptive traits and processes: an overview, *New Phytol.*, 206(1), 57-73.
- Voesenek, L. A. C. J., Sasidharan, R., Visser, E. J. W., Bailey-Serres, J., 2016, Flooding stress signaling through perturbations in oxygen, ethylene, nitric oxide and light, *New Phytol.*, 209(1), 39-43.
- Yun, J. H., Nakao, K., Tsuyama, I., Matsui, T., Park, C. H., Lee, B. Y., Tanaka, N., 2018, Vulnerability of subalpine fir species to climate change: using species distribution modeling to assess the future efficiency of current protected areas in the Korean Peninsula, *Ecol. Res.*, 33(2), 341-357.
-
- Postdoctor researcher. Jae-Hyun Park
Division of Forest Bioinformatics, Department of Forest Bio Resources, National Institute of Forest Science
jh2344@korea.kr
 - Postdoctor researcher. Han-Na Seo
Division of Forest Bioinformatics, Department of Forest Bio Resources, National Institute of Forest Science
caragana2@korea.kr
 - Senior research officer. Hyo-In Lim
Division of Forest Bioinformatics, Department of Forest Bio Resources, National Institute of Forest Science
iistorm@korea.kr
 - Senior research officer. Siyeon Byeon
Division of Forest Bioinformatics, Department of Forest Bio Resources, National Institute of Forest Science
sybyun419@korea.kr