Journal of Environmental Science International
34(9); 529~537; September 2025

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2025.34.9.529

ORIGINAL ARTICLE

# 주요 산림수종 3종의 양묘 과정에서 양액 수준이 초기 생존과 생장에 미치는 영향

**박재현 · 서한나 · 임효인 · 김한길[1] · 주현우[1] · 이석준[1] · 이명훈[2]***

국립산림과학원 산림생명정보연구과, [1]건국대학교 대학원 녹색기술융합학과, [2]한국골프과학기술대학교 골프코스매니지먼트과

# Effects of Nutrient Solution Levels on Early Survival and Growth of Three Major Forest Tree Species during Nursery Production

**Jae-Hyun Park, Han-Na Seo, Hyo-In Lim, Han-Gil Kim[1], Hyun-Woo Joo[1], Seok-Jun Lee[1], Myung-Hun Lee[2]***

*Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science, Suwon 16631, Korea*
*[1]Department of Green Technology Convergence, Graduate School, Konkuk University, Chungju 27478, Korea*
*[2]Department of Golf Course Management, Korea Golf University of Science & Technology, Hoengseong 25247, Korea*

## Abstract

This study investigated the effects of nutrient solution electrical conductivity (EC) on the soil environment, survival, and growth of *Larix kaempferi, Pinus densiflora, and Betula platyphylla* seedlings. Seedlings were cultivated under six EC treatments (0, 1, 2, 3, 4, and 5 dS/m) for nine weeks under controlled greenhouse conditions. Soil water content and EC were measured weekly. Survival was monitored via Kaplan-Meier analysis and final height and root length were recorded. The results showed that EC significantly influenced all measured variables. Optimal performance for all species occurred at 1-2 dS/m, with stable soil conditions, the highest survival rates, and the greatest growth. EC levels ≥4 dS/m led to rapid soil salinity accumulation, increased soil moisture, and substantial declines in survival and growth. This is, likely due to osmotic stress, ion imbalance, reduced photosynthetic efficiency, and altered carbon-nutrient allocation. *L. kaempferi* exhibited higher tolerance to elevated EC, whereas *P. densiflora* was more sensitive. These findings suggest that maintaining EC at 1-2 dS/m during nursery production optimizes seedling quality and survival, with adjustments based on species-specific tolerance.

Key words : Electrical conductivity, Osmotic stress, Nursery management, Survival analysis, Saline soil

## 1. 서 론

산림자원의 지속가능한 이용과 복원, 그리고 기후변화 대응을 위해 양묘 단계에서의 품질 관리와 생산성 향상은 필수적이다. 조림·복원 사업의 성패는 초기 묘목의 생리적 건강과 환경 적응력에 크게 의존하며(Höhl et al., 2020), 양액의 농도는 토양 내 염류 농도와 수분 포텐셜을 조절하여 뿌리의 양분 흡수, 수분 이동, 광합성 효율에 직접적인 영향을 미친다(Grattan and Grieve, 1999; Maas and Grattan, 1999).

농업 및 원예 분야에서는 양액 관리가 이미 정밀 농업 재배의 핵심 기술로 자리잡았으며, 적정 범위의 양액

Received 19 August, 2025; Revised 9 September, 2025; Accepted 10 September, 2025
*Corresponding author : Myung-Hun Lee, Department of Golf Course Management, Korea Golf University of Science & Technology, Hoengseong 25247, Korea
Phone : +82-033-810-1080
E-mail : tomsmh@naver.com


**Fig. 1.** Seedling production and laboratory view.

농도는 묘목의 생장, 엽록소 함량, 뿌리 발달을 촉진하는 반면, 고농도 양액은 삼투 스트레스와 이온 독성을 유발하여 수분 흡수와 광합성을 저해하고 장기적으로 생존율과 생장을 감소시키는 것으로 보고되었다(Chartzoulakis and Klapaki, 2000; Munns and Tester, 2008). 그러나 낙엽송(*Larix kaempferi*), 소나무(*Pinus densiflora*), 자작나무(*Betula platyphylla*) 등 우리나라 주요 조림 수종 유묘의 양액 수준별 반응을 체계적으로 분석한 연구는 드물다.

침엽수 연구에서 적정 양분 공급은 광합성 효율과 생체량을 증가시키지만, 과잉 공급은 뿌리/줄기 비율을 낮추고 양분 이용 효율을 저하시킨다는 결과가 보고되었다(Grossnickle, 2012; Chowdhury and Shoron, 2024). 활엽수의 경우도 적정 양분 공급 시 초기 생장과 잎 면적 확대에 긍정적 효과가 있으나, 고농도에서는 뿌리 발달 저하와 수분 흡수 능력 감소가 발생하는 것으로 알려져 있다(Poorter et al., 2012; Tanaka et al., 2017). 이러한 반응은 수종별 특성, 토양 환경, 기후, 재배 기간에 따라 다르게 나타난다(Hawkins and Dhar, 2012; Villar-Salvador et al., 2015).

그럼에도 불구하고 현장에서는 여전히 규격화된 관리기준 없이 경험과 관습에 의존한 EC 관리가 이루어지고 있으며, 과학적 근거에 기반한 표준화된 지침은 부족하다. 특히 고농도 양액을 지속적으로 사용하였을 때, 토양 환경(수분·염류 농도), 생존율, 생장 특성에 미치는 영향을 통합적으로 분석한 연구는 거의 없다. 따라서 산림양묘에서 양액 농도 관리의 과학적 근거를 마련하는 것은 묘목 품질 향상과 생산성 증대를 위해 필요하다.

이에 본 연구는 낙엽송, 소나무, 자작나무 유묘를 대상으로 EC 수준을 활용한 다양한 양액 농도에서 토양 환경 변화, 생존율, 생장 반응을 종합적으로 분석하여 수종별 양액의 최적 EC 범위를 제시하고, 현장에서 적용 가능한 관리 지침을 마련하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구 범위 및 대상지

본 연구는 조림 수종의 양묘과정에서 적정 양액 농도를 규명하기 위한 실험으로, 당해 5월부터 7월까지 진행되었다. 해당 시설은 충청북도 충주시 수안보면에 위치한 외부 기후로부터 차단되어 있어 실험 중 강우, 태풍 등의 변동에 의한 영향을 받지 않는 온실하우스(온도 35 ± 2℃, 상대습도 55 ± 5%) 내에서 수행되었다.

### 2.2. 실험 재료 및 처리구 구성

실험에 사용된 식물재료는 주요 산림수종으로 낙엽송(*Larix kaempferi*), 소나무(*Pinus densiflora*), 자작나무(*Betula platyphylla*)로서, 산림청 국립산림품종관리센터에서 제공된 종자를 당해 봄에 파종·발아된 1년생 유묘이다. 실험 개시 전 유묘는 생육 상태가 양호하고, 초기 생장 편차가 크지 않은 개체들로 선발하였다. 6개 처리구당 낙엽송과 소나무는 24구 플러그 트레이, 자작나무는 12구 트레이에 각각 총 360개 이식하였다(Fig. 1). 배양토는 산림양묘용(No. 2, Shinseong Mineral Co., Ltd, Korea) 혼합상토를 사용하였다. 시비에 사용된 비료는 N-P-K 비율이 20-20-20인

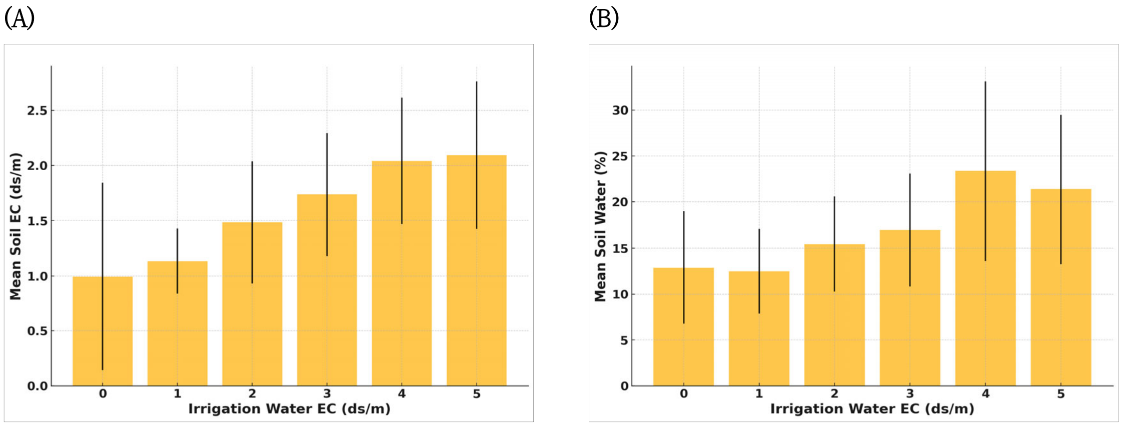


**Fig. 2.** Mean soil EC and soil water under different irrigation (nutrient solution) EC levels; (A) Mean soil electrical conductivity (EC) under different irrigation (nutrient solution) EC levels, (B) Mean soil water content under different irrigation (nutrient solution) EC levels. Two-way ANOVA showed significant differences between all EC levels ($p<0.001$).

Multipfeed® (Haifa, Haifa Chemical, Israel) 수용성 복합비료이며, 전기전도도(EC) 기반 양액 처리를 위해 사용되었다. 3차 증류수에 비료를 용해하여 EC 수준이 각각 0(Control), 1, 2, 3, 4, 5 dS/m이 되도록 제조하였다. EC 농도는 디지털 EC 미터(Eutech CON 10, Eutech Instruments, Singapore)를 사용하여 측정하였다. 트레이는 무작위로 배치하고 정기적으로 위치를 회전시켜 환경적 편향을 최소화하였다. 양액은 주 1회, 각 개체에 약 100 mL씩 관수하였으며, 수분이 부족할 경우에는 증류수를 보충하여 수분 조건을 일정하게 유지하였다.

### 2.3. 생육 및 토양 환경 조사

실험 개시 직전(5월 초)에 초기 생육 상태를 확인한 후, 주 1회 간격으로 총 9회 생육 조사를 실시하였다. 묘고(seedling height)는 지표면부터 수관 끝까지 자로 수직 측정(단위: cm)하였다. 또한, 각 주차 조사 시 고사 여부를 판단하고 고사묘 수를 기록하였다. 고사율은 누적 고사묘 수를 기준으로 산출하였으며, 모든 고사율 자료는 생존분석(survival analysis)을 위한 기초자료로 활용되었다. 실험 종료 후에는 유묘를 분리하여 뿌리 길이를 포함한 최종 생장자료도 함께 확보하였다. 토양 내 수분 함량 및 염류 축적 상태를 파악하기 위하여 생육 조사와 동일한 시점(주 1회)에서 토양 환경에 대한 정기적인 조사를 수행하였다. 토양 수분은 전자식 토양 수분 센서인 ThetaProbe ML3 (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK)를 이용하여 측정하였으며, 센서의 프로브를 배양토 중심부에 수직으로 삽입한 후 체적수분함량(volumetric water content, VWC, % 단위)을 기록하였다. 모든 측정은 오전 시간대(09:00-11:00) 내에 수행하여 일사 조건 및 온도 변화에 의한 영향을 최소화하였다. 센서는 실험 개시 전 제조사 매뉴얼에 따라 표준 수분함량 기준 시료를 이용하여 보정(calibration)을 완료하였다. 양액 처리에 따라 토양에 축적된 염류 수준은 간이 전기전도도(EC) 분석을 통해 평가하였다. 각 처리구의 트레이에서 대표적인 위치의 시료토양을 채취한 후, 이를 증류수와 1:5의 비율로 혼합하여 현탁액을 만들었다. 이후 여과지로 현탁액을 여과한 다음, 여과액의 EC를 휴대용 전도도 측정기(Eutech CON 10, Eutech Instruments, Singapore)를 이용하여 dS/m 단위로 측정하였다. 해당 분석은 양액 관수가 이루어지기 직전에 실시되었으며, 이를 통해 주차별 염류 축적 경향을 파악하였다. 최종 조사일에는 양액 처리 후 48시간이 경과한 시점에 동일한 방식으로 토양을 채취하여 최종 EC 값을 산출하였다.

### 2.4. 통계 분석

실험에서 얻어진 생육 및 토양환경 데이터는 Python (ver. 3.11)을 기반으로 분석하였다. 데이터 전처리 및 정리는 pandas와 numpy 패키지를 활용하였으며, 통

(A) (B)

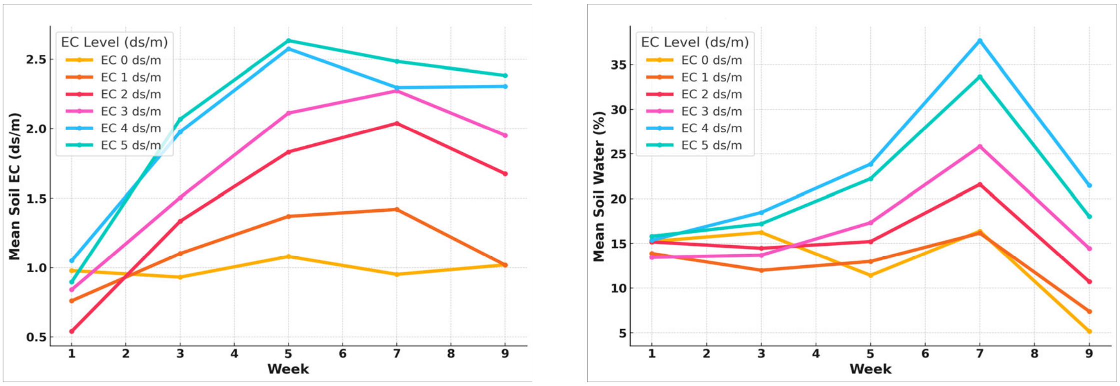


Fig. 3. Weekly changes in soil EC and soil water under different irrigation (nutrient solution) EC levels; (A) Weekly changes in soil electrical conductivity (EC) under different irrigation (nutrient solution) EC levels, (B) Weekly changes in soil water content under different irrigation (nutrient solution) EC levels. Two-way ANOVA showed significant differences among EC levels over time ($p<0.001$), with a significant interaction effect.

계 분석은 scipy.stats 및 statsmodels 패키지를 이용하여 수행하였다. 생육 반응 변수(고사율, 묘고, 뿌리길이)와 환경 요인(토양 수분함량, EC)에 대한 처리 효과 검정을 위해 이원분산분석(Two-way ANOVA)을 실시하였다. 분산분석에 앞서 각 데이터셋은 정규성(Shapiro-Wilk 검정)과 등분산성(Levene's test)의 가정을 충족하는지를 확인하였다. 분산분석 결과 처리구 간 유의한 차이가 나타난 경우, 처리 간 평균값의 유의미한 차이를 비교하기 위해 Duncan의 다중범위검정(Duncan's multiple range test)을 사후 분석으로 적용하였다. 주차별 고사율 데이터는 누적 고사 비율로 변환하여 생존분석(Kaplan-Meier survival analysis)에 활용하였으며, lifelines 패키지를 이용하여 생존곡선을 도출하고 log-rank 검정을 통해 처리 간 차이를 검토하였다. 모든 통계적 유의성 검정은 유의수준 $p<0.05$에서 판단하였으며, 분석 결과는 평균 ± 표준오차(mean ± SE)로 표기하였다. 시각화는 matplotlib 및 seaborn을 이용하여 수행하였으며, 처리 간 비교를 직관적으로 전달하기 위해 처리군별 선형추세선 및 오차 막대를 포함한 그래프를 구성하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 양액 EC 농도에 따른 토양 환경분석

본 연구는 양액 EC 농도와 시간이 토양 환경 요소인 토양 수분과 토양 전기전도도에 미치는 영향을 분석하였다(Fig. 2). 양액 EC 농도는 토양 수분에 유의미한 영향을 미쳤다($F(5, 690)=115.88$, $p<0.001$). 사후 분석 결과, EC 농도 0과 1 사이의 평균 차이는 통계적으로 유의하지 않았으나($p>0.05$), 다른 농도 간에는 유의미한 차이가 있었다. 특히 EC 농도 4 (Mean: 23.38%) 및 5 (Mean: 21.39%)는 가장 높은 토양 수분을 나타냈으며, EC 농도 증가와 함께 뚜렷한 수분 증가 추세를 보였다. 양액 EC 농도의 주효과가 매우 유의미하였다($F(5, 690)=160.02$, $p<0.001$). 모든 EC 농도 간 비교에서 거의 유의미한 차이가 나타났다. EC 농도 0 (Mean: 0.99 dS/m)과 EC 농도 5 (Mean: 2.09 dS/m)의 평균 EC 값 차이가 가장 크게 나타나, EC 농도 증가가 토양 내 염분 농도를 명확히 증가시키는 것으로 나타났다. 주차별 분석을 통해 EC 농도 증가가 시간이 지남에 따라 토양 환경에 미치는 영향을 더욱 명확히 관찰할 수 있었다($F(4, 690)=183.52$, $p<0.001$)(Fig. 3). 특히 높은 EC 농도 수준(4, 5 dS/m)에서 시간이 경과함에 따라 토양 수분과 EC 값의 변화폭이 확대되는 현상이 관찰되었다. 이는 높은 EC 농도의 지속 유지 시 토양 내 염분과 수분의 과잉 축적이 발생할 수 있음을 시사하며, 이에 따라 EC 농도의 지속가능한 관리가 필수적임을 강조한다. 주차별 분석을 통해 토양 수분 함유량의 변화를 살펴본 결과, 시간이 지남에

따라 유의미한 변화가 나타났다(F(4, 690)=160.79, *p<0.001*). 양액 EC 농도가 높을수록 수분 함량의 증가폭이 현저하였으며, 특히 EC 농도가 낮은 그룹(0, 1, 2 dS/m)은 상대적으로 변화가 작았으나, EC 농도 3 이상에서는 뚜렷한 증가 추세가 나타났다. 이는 높은 EC 농도 관리 시 과습 상태로 인한 배수 장애나 작물 생육 환경 악화 등 추가적인 환경적 고려가 필요함을 시사한다. 이와 같은 경향은 EC 농도가 수분 이동성과 이온 전도 특성에 병합적으로 작용하는 토양-수분 시스템의 물리화학적 메커니즘과 부합하며(Thompson et al., 2007; Mu et al., 2024), 일정 수준 이상에서는 작물의 생리적 스트레스를 유발할 수 있음이 보고된 바 있다. 실제로 다양한 작물에서 EC 농도 1-3 dS/m 범위는 생육 및 수량 증가에 긍정적인 영향을 주지만, 그 이상에서는 수분 흡수 저해, 광합성 억제 등의 부정적 효과가 나타난다(Rosadi et al., 2014; Okudur and Tuzel, 2023). 또한, EC 농도 3 dS/m 이상에서 토양 내 암모니아화 및 질산화 반응이 억제되며, 이는 이온 이용률 저하와 밀접히 연관됨을 보고하였다(Mahrous et al., 1983). 이에 따라, 양액 EC 농도의 체계적 조절은 실무적 토양 관리에서 핵심 전략으로 간주되며, 특히 1-3 dS/m 범위 내에서의 유지가 작물 생육 안정성과 토양 환경 보존을 동시에 달성할 수 있는 최적 조건으로 판단된다.

### 3.2. 양액 EC 농도에 따른 유묘의 생존분석

본 연구의 생존분석 결과, 전역 로그-랭크 검정에서 EC 처리구 간 생존곡선 차이가 통계적으로 매우 유의하게 나타났으며($\chi^2$= 70.19, df = 5, *p<0.001*), 이는 처리된 EC 수준이 유묘 생존에 결정적인 영향을 미친다는 것을 의미한다(Fig. 4). Kaplan-Meier 곡선 분석에서는 EC 5 dS/m 처리구가 초기부터 생존확률이 급격히 감소하여 최종 생존율이 가장 낮았고, EC 4 dS/m 또한 중·후반기에 뚜렷한 생존율 저하를 보였다. 반면 EC 1-3 dS/m 및 대조구(CON)는 전체 기간 동안 완만한 감소 경향을 유지했으며, pairwise 로그-랭크 검정에서 1-3 dS/m과 CON 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 특히 5 dS/m 처리구는 1, 2, 3 dS/m 및 CON과, 4 dS/m 처리구는 1, 2 dS/m 및 CON과 각각 *p<0.001* 수준의 유의차를 보였다. Cox 비례위험모형은 1 dS/m 처리구를 기준군으로 설정하여 EC 수준 상승이 고사 위험에 미치는 영향을 평가하였다. 분석 결과, 3 dS/m, 4 dS/m, 5 dS/m 처리군의 위험비(HR)는 각각 1.25, 1.50, 1.80으로 나타나 EC 수준이 높을수록 고사 위험이 증가하는 경향을 보였다. 이는 고사 발생 시점 차이에 따른 결과 해석이 필요하며, Kaplan-Meier 곡선에서 확인된 장기 생존율 저하 경향과 함께 고려해야 한다. 수종 × EC처리 상호작용 분석에서는 대부분의 조합이 유의하지 않았지만, *Pinus densiflora*의 5 dS/m 처리에서 HR 1.65(*p<0.05*)로 고사 위험 증가 경향이 관찰되었으며, *Larix kaempferi*는 고농도에서도 상대적으로 낮은 HR을 보여 염분 내성 가능성을 시사하였다.

이러한 결과는 EC 수준이 유묘 생존과 생육 품질에 큰 영향을 미친다는 기존 연구들과 일치한다. Carballo-Méndez et al.(2023)은 피망과 토마토 절편묘 연구에서 EC 1.25–1.50 dS/m 범위에서 생존과 품질 지표가 최적화되었으며, 고농도에서는 발근율과 생육이 저하된다고 보고하였다. Nguyen et al.(2021) 역시 차조기에서 EC 1 dS/m이 가장 우수한 생육과 항산화 물질 함량을 보였고, EC 6 dS/m에서는 성장이 억제되고 무기원소 함량이 감소한다고 밝혔다. Kentelky et al.(2022)는 팬지에서 5 mS/cm의 EC가 단기 생육에는 긍정적 영향을 미쳤다고 보고하였으나, 이는 장기 생존율 분석이 아닌 단기 생장 지표에 기반한 결과로, 본 연구와 같이 장기간의 생존곡선 분석에서는 고농도 EC의 부정적 효과가 더 명확히 나타날 수 있다. 또한, 종별 EC 민감도 차이에 대한 연구도 본 결과와 맥락을 같이한다. Oh et al.(2014)은 세 가지 약용식물에서 적정 EC가 종별로 상이하며, 일부 종은 상대적으로 높은 EC에서도 품질이 유지되지만 대부분의 경우 중저농도에서 생육이 최적화된다고 보고하였다. Schmitt et al.(2016)은 딸기 묘주 재배에서 EC가 0.8-1.1 dS/m 범위일 때 러너 생산과 활착률이 가장 높다고 밝혀, 본 연구에서 확인된 1-3 dS/m 범위의 안정적 생존 결과를 뒷받침한다. Shawon et al.(2023) 역시 병풀(Centella asiatica)에서 EC 1.2 dS/m 처리 시 생장과 기능성 성분 함량이 극대화되었으며, 고농도에서 품질이 저하된다고 보고하였다.

종합하면, 본 연구와 선행연구들은 유묘 단계에서 EC 1-3 dS/m 범위가 안정적인 생존과 양호한 생육을 보장하며, EC 4 dS/m 이상에서는 생존율 저하와 고사 위험 증가가 뚜렷하게 나타남을 시사한다. 따라서, 실무적 토양·양액 관리에서는 초기 활착기와 생장 초기에 EC를 낮게 유지하고, 이후 단계에서 점진적으로 조절

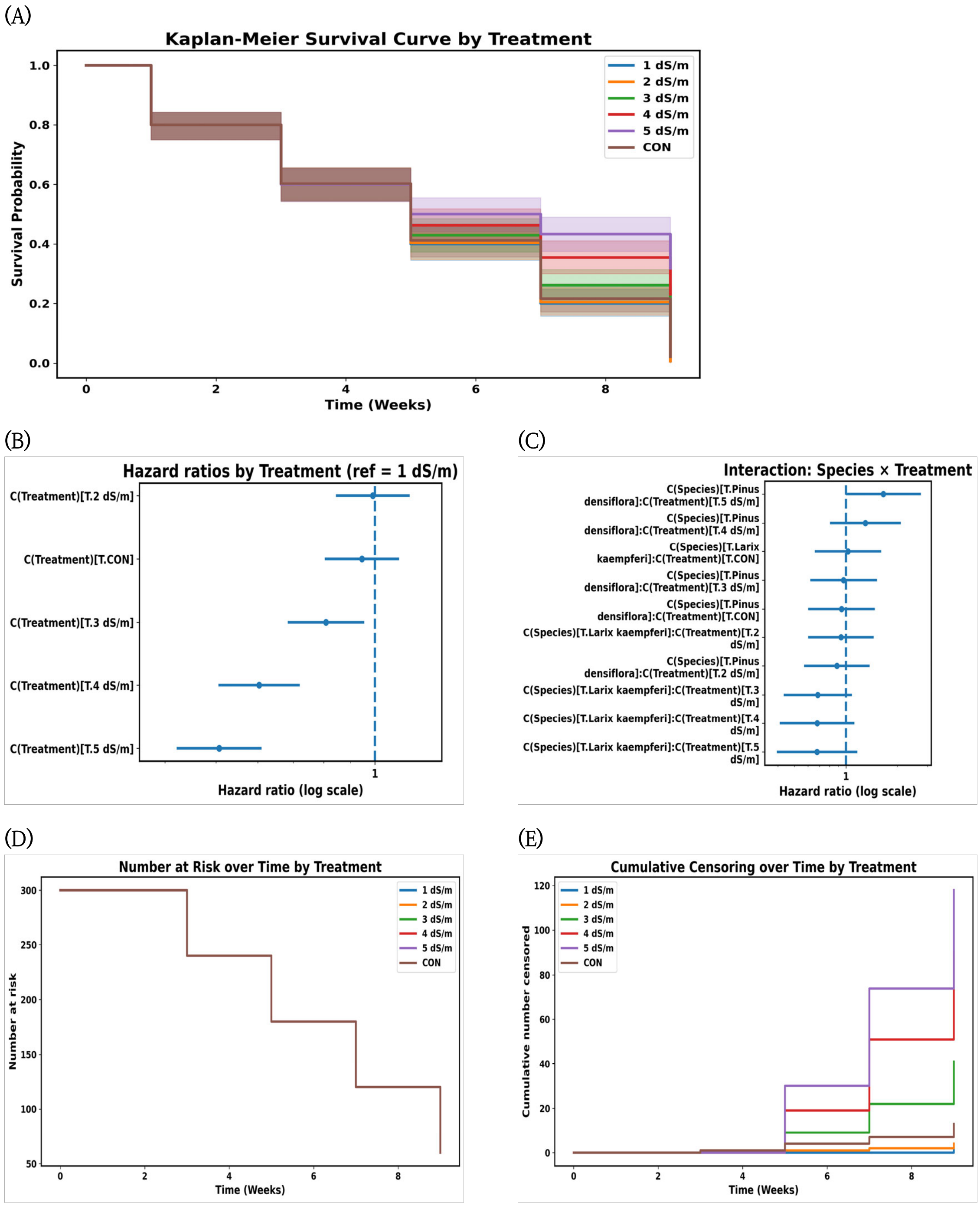


Fig. 4. Survival analysis results of seedlings under different nutrient solution EC treatments: (A) Kaplan-Meier survival curves, (B) hazard ratios from Cox proportional hazards model for EC treatments, (C) hazard ratios for interactions between species and EC treatments, (D) number-at-risk table for EC treatment groups over the study period, and (E) cumulative censoring curves for EC treatment groups.

Table 1. Final seedling growth of *Larix kaempferi*, *Pinus densiflora*, and *Betula platyphylla* under different nutrient solution EC levels

| Species | Part (cm) | EC level (dS/m) | | | | | | *F* | *p-value* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| *Larix kaempferi* | Height | 10.8b | 11.8a | 9.2c | 9.6c | 7.6d | 6.4e | 28.42 | <.001 |
| | Root length | 7.8b | 9.8a | 6.7c | 6.1c | 4.9d | 3.7e | 35.17 | <.001 |
| *Pinus densiflora* | Height | 6.1c | 7.4a | 7.1a | 6.5b | 6.1bc | 5.4d | 19.56 | <.001 |
| | Root length | 5.1b | 4.8b | 5.3a | 4.1c | 3.4d | 3.1d | 24.83 | <.001 |
| *Betula platyphylla* | Height | 36.1a | 36.8a | 30.7b | 27.8c | 31.2b | 31.4b | 41.72 | <.001 |
| | Root length | 15.8b | 21.8a | 22.2a | 14.6c | 11.6d | 12.4d | 38.95 | <.001 |

Values represent mean height and root length at the end of the experiment. Different letters within a column indicate significant differences among EC treatments according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). Statistical results from one-way ANOVA ($F$-and $p$-values) are presented in the last row.

하는 방식이 바람직하며, 복합 환경 스트레스와 종별 내성 차이를 고려한 맞춤형 관리 전략이 필요하다.

### 3.3. 양액 EC 농도에 따른 유묘의 생장분석

본 연구의 양액 EC 농도가 낙엽송(*Larix kaempferi*), 소나무(*Pinus densiflora*), 자작나무(*Betula platyphylla*) 유묘의 수고와 뿌리길이에 미치는 영향을 분석한 결과, 모든 수종에서 처리구 간 유의한 차이가 확인되었다 (Table 1). 낙엽송의 경우, 수고($F$ (5, 174) = 28.42, $p<0.001$)와 뿌리길이($F$ (5, 174) = 35.17, $p<0.001$) 모두 1 dS/m에서 최대치(11.8 cm, 9.8 cm)를 보였으며, EC 3 dS/m 이상에서는 급격히 감소해 5 dS/m에서 최저치(6.4 cm, 3.7 cm)를 기록했다. 이는 *Larix kaempferi* 유묘에 외부 삼투포텐셜 및 이온 불균형 스트레스를 처리했을 때 수분 상태(NWI) 악화, 광합성 효율 저하, 생존율과 생장률 감소가 나타난 연구(Zhang et al., 2025)와 유사하다. 고농도 EC 조건에서도 삼투포텐셜 저하와 이온 불균형으로 유사한 생리·형태 반응이 일어난 것으로 해석된다. 소나무는 수고($F$ (5, 174) = 19.56, $p<0.001$)와 뿌리길이 ($F$ (5, 174) = 24.83, $p<0.001$) 모두 1-2 dS/m에서 우수했으며, EC 4-5 dS/m에서 크게 감소하였다. 이는 같은 소나무과 수종에서 적정 질소·인 시비가 광합성과 세포 신장 관련 유전자를 활성화하지만, 과잉 공급 시 뿌리/줄기 비율이 감소하고 양분 이용 효율이 저하된다는 보고(Xu et al., 2025)와 동일한 경향이다. 자작나무는 수고($F$ (5, 174) = 41.72, $p<0.001$)와 뿌리길이($F$ (5, 174) = 38.95, $p<0.001$) 모두 처리 간 차이가 뚜렷했다. 수고는 1 dS/m(36.8 cm), 뿌리길이는 2 dS/m(22.2 cm)에서 최대였으며, EC 3 dS/m 이상에서는 뿌리 발달이 급격히 감소해 4 dS/m에서 11.6 cm로 떨어졌다. 이는 활엽수 유묘 메타분석에서, 고농도 시비가 초기 지상부 생장을 촉진하나 장기적으로 뿌리 생체량과 흡수 효율을 저하시키는 결과(Carate Tandalla et al., 2024)와 일치한다.

세 수종 모두 EC 1-2 dS/m에서 생육이 가장 우수했으며, EC 4-5 dS/m 고농도 처리에서는 (1) 삼투포텐셜 저하, (2) 이온 독성, (3) 광합성 효율 저하 및 (4) 탄소·양분 분배 불균형이 복합적으로 작용해 생장이 억제된 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구는 양액 농도에 따른 EC 수준이 낙엽송, 소나무, 자작나무 유묘의 토양 환경, 생존율, 생장 특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였다. 실험 결과, EC가 1-2 dS/m 범위일 때 세 수종 모두에서 토양 수분과 염류 농도가 안정적으로 유지되었으며, 생존율과 생장 지표(수고, 뿌리길이) 또한 가장 우수하게 나타났다. 반면, EC 4-5 dS/m 고농도 처리에서는 시간이 지남에 따라 토양 염류가 급격히 축적되고 수분 변화 폭이 커졌으며, 생존곡선이 빠르게 하락하고 수고와 뿌리길이도 유의하게 감소하였다. 이러한 결과는 고농도 EC가 삼투포텐셜 저하, 이온 불균형, 광합성 효율 저하, 그리고 탄소·양분 분배 불균형을 유발하여 유묘 생육 전반에 부정적인 영향을 미친다는 것을 시사한다. 따라서 양묘 단계

에서는 EC를 1-2 dS/m 수준으로 유지하는 것이 생존과 생장을 동시에 확보할 수 있는 최적의 관리 범위로 판단된다. 다만 본 연구는 단기간의 실험과 제한된 수종 및 환경 조건을 대상으로 수행되어, 다양한 기후·토양 조건이나 장기 재배 환경에서의 반응을 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 향후 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 다양한 기후와 토양 조건에서의 장기 재배 시험과 종별 내성 차이를 고려한 맞춤형 EC 관리 기준 수립이 필요하다.

## REFERENCES


Cárate Tandalla, D., Homeier, J., Batáry, P., 2025, Responses of tropical tree seedlings to nutrient addition: A Meta-analysis to understand future changes in tropical forest dynamics, Curr. For. Rep., 11, 1-15.

Carballo-Méndez, F. J., Urrestarazu, M., Rodríguez-Ortiz, J. C., Morales, I., 2023, Electrical conductivity of the nutrient solution on the vegetative propagation of bell pepper and tomato, Ciênc. Rural, 53(2), e20210730.

Chartzoulakis, K., Klapaki, G., 2000, Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages, Sci. Hortic., 86(3), 247-260.

Chowdhury, M. I. H., Shoron, M. F. A., 2024, Enhancing Pine growth: A Meta-analysis of fertilizer and treatment effects on Pine species, Scientific Reports in Life Sciences, 5(4), 13-30.

Grattan, S. R., Grieve, C. M., 1999, Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops, Sci. Hortic., 78(1-4), 127-157.

Grossnickle, S. C., 2012, Why seedlings survive: Influence of plant attributes, New Forests, 43, 711-738.

Höhl, M., Ahimbisibwe, V., Stanturf, J. A., Elsasser, P., Kleine, M., Bolte, A., 2020, Forest landscape restoration - What generates failure and success?, Forests, 11(9), 938.

Hawkins, B. J., Dhar, A., 2012, Nutrient management in forest nurseries, in: Dumroese, R. K., Luna, T., Landis, T. (eds.), Proc. Forest and Conservation Nursery Associations, U.S. Dep. Agric. For. Serv., 26-33.

Kentelky, E., Székely-Varga, Z., Morar, I. M., Cornea-Cipcigan, M., 2022, Morphological responses of Viola accessions to nutrient solution application and electrical conductivity, Plants, 11(11), 1433.

Maas, E. V., Grattan, S. R., 1999, Crop yields as affected by salinity, in: Skaggs, R. W., van Schilfgaarde, J. (eds.), Agricultural drainage, ASA, CSSA & SSSA, Madison, WI, 55-108.

Mahrous, F. N., Mikkelsen, D. S., Hafez, A. A., 1983, Effect of soil salinity on the electro-chemical and chemical kinetics of some plant nutrients in submerged soils, Plant Soil, 75, 339-348.

Mu, W., Han, N., Qu, Z., Mi, Z., Shan, Y., Guo, X., Sun, Y., Mu, Y., 2024, ECWS: Soil salinity measurement method based on electrical conductivity and moisture content, Agronomy, 14(7), 1345.

Munns, R., Tester, M., 2008, Mechanisms of salinity tolerance, Annu. Rev. Plant Biol., 59, 651-681.

Nguyen, T. K. L., Yeom, M. S., Oh, M. M., 2021, Effect of a newly-developed nutrient solution and electrical conductivity on growth and bioactive compounds in *Perilla frutescens* var. *crispa*, Agronomy, 11(5), 932.

Oh, H. J., Park, J. E., Park, Y. G., Jeong, B. R., 2014, Growth and quality of plug seedlings of three indigenous medicinal plants as affected by ionic strength of the nutrient solution, Hortic. Environ. Biotechnol., 55(3), 229-237.

Okudur, E., Tüzel, Y., 2023, Effect of EC levels of nutrient solution on glasswort (*Salicornia perennis* Mill.) production in floating system, Horticulturae, 9(5), 555.

Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., Mommer, L., 2012, Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control, New Phytol., 193(1), 30-50.

Rosadi, R. A. B., Senge, M., Suhandy, D., Tusi, A., 2014, The effect of EC levels of nutrient solution on the growth, yield, and quality of tomatoes (Solanum lycopersicum) under the hydroponic system, J. Agric. Eng. Biotechnol., 2(1), 7-12.

Schmitt, O. J., Andriolo, J. L., Schultz, E. E., Lerner, M. A., Souza, J. M., Dal Picio, M., 2016, Produção de estolhos de cultivares de morangueiro em função da condutividade elétrica da solução nutritiva, Hortic. Bras., 34(2), 190-196.

Shawon, M. R. A., Azad, O. K., Ryu, B. R., Na, J. K., 2023, The electrical conductivity of nutrient solution influenced the growth, centellosides content and gene expression of Centella asiatica in a hydroponic system, Agriculture, 13(12), 2236.

Tanaka, Y., Sakamoto, Y., Kitajima, K., 2017, Root growth and architecture of tropical tree seedlings: Interactive effects of phosphorus supply and light, Tree Physiol., 37(5), 663-674.

Thompson, R. B., Gallardo, M., Fernandez, M. D., Valdez, L. C., Martinez-Gaitan, C., 2007, Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor, Soil Sci. Soc. Am. J., 71(6), 1703-1710.

Villar-Salvador, P., Uscola, M., Jacobs, D. F., 2015, The role of stored carbohydrates and nitrogen in the growth and stress tolerance of planted forest trees, New Forests, 46, 813-839.

Xu, J., Li, X., Chen, S., Chen, L., Tang, J., Chen, P., Cai, N., Xu, Y., 2025, Integrative analyses of morpho-physiological, biochemical, and transcriptomic reveal the seedling growth response of Pinus yunnanensis to nitrogen and phosphorus fertilization, Front. Plant Sci., 16, 140563.

Zhang, X., Wang, S., Zhou, Q., Li, J., Hou, Q., Ren, L., Luo, Y., 2025, Phenotypic changes in Pinus thunbergii, *Larix kaempferi*, *Picea koraiensis*, and *Abies holophylla* seedlings inoculated with pine wilt nematode: Revealing the resistance, Forests, 16(1), 137.

• Post doctor researcher. Jae-Hyun Park
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
jh2344@korea.kr
• Post doctor researcher. Han-Na Seo
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
caragana2@korea.kr
• Senior research officer. Hyo-In Lim
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
iistorm@korea.kr
• Doctorate course. Han-Gil Kim
Department of Green Technology Convergence, Graduate School, Konkuk University
tlsdlqtod2233@kku.ac.kr
• Master's course. Hyun-Woo Joo
Department of Green Technology Convergence, Graduate School, Konkuk University
speedrunner@naver.com
• Master's course. Seok-Jun Lee
Department of Green Technology Convergence, Graduate School, Konkuk University
seokjun24@naver.com
• Professor. Myung-Hun Lee
Korea Golf University of Science & Technologym, Department of Golf course management
tomsmh@naver.com