

형성층 전기 저항을 이용한 이식 혹은 전정 강도를 달리한 조경수의 건강 진단

이경준 

서울대학교 식물병원

Assessment of the Health of Landscape Trees Transplanted or Subjected to Different Levels of Pruning Using Cambial Electrical Resistance

Kyung Joon Lee 

Seoul National University Plant Clinic., Seoul 08826, Korea

요약: 본 연구는 형성층의 전기저항(CER)이 이식목의 활착 여부와 강전정목의 건강 상태를 진단할 수 있는지를 검증하기 위해 실시했다. 샤이고미터를 이용해 조경수를 대상으로 10개 수종의 생육기간 중, 그리고 30개 수종의 8월 중 전기저항의 변화를 조사하였다. 전기저항은 통계적으로 유의하게 봄철에 높고 한여름에 가장 낮았으며, 가을에 다시 증가하였다. 8월 중 전기저항은 수종 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였는데, 칠엽수, 회화나무, 은행나무, 낙우송, 백송은 3~4 kΩ으로 낮았다. 소나무, 향나무는 10~11 kΩ으로 높았으며, 측백나무는 다른 수종보다 유의하게 가장 높은 값(12.3 kΩ)을 나타냈다. 소나무, 은행나무, 측백나무, 왕벚나무의 이식목은 이식 직후 전기저항이 증가하였으나, 매년 조금씩 감소하여 5년 후 소나무와 측백나무는 건강목(무이식목)의 수치에 접근하여 활착이 거의 완료되었고, 나머지 두 수종은 활착이 아직 진행됨을 확인할 수 있었다. 소나무에 70%의 강전정을 실시한 경우 일부 가지가 고사하거나 일부 나무가 죽었으며, 전기 저항이 유의하게 증가했다. 35% 전정의 경우 고사지가 발생하지 않았고, 전기저항도 통계적으로 유의하게 증가하지 않았다. 결론적으로 형성층의 전기저항을 이용하여 이식목의 활착 여부와 강전정한 수목의 건강을 진단할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: This study investigated the utility of cambial electrical resistance (CER) measured using a Shigometer for identifying the successful rootage of transplanted trees and assessing the health of trees subjected with different levels of pruning. Ten landscape tree species were used to measure changes in CER during the growing season, and 30 species were used to compare CER among different species during mid-summer. CER was high in spring, whereas it decreased to its lowest level in summer before increasing again in the fall. CER significantly differed among 20 different species in August. Specifically, CER of *Aesculus turbinata* Blume, *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott., *Ginkgo biloba* L. *Taxodium distichum* (L.) Rich, and *Pinus bungeana* Zucc. ex Endl. ranged 3~4 kΩ, whereas that of *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. and *Juniperus chinensis* L. ranged 10~11 kΩ. CER was highest for *Platycladus orientalis* (L.) Franco at 12.3 kΩ, which significantly differed from the values for the other species. CER of the transplanted trees of *P. densiflora*, *G. biloba*, *P. orientalis*, and *Prunus x yedoensis* Matsum. increased significantly a year after transplanting, whereas that of *P. densiflora* and *P. orientalis* slowly decreased to the normal value of healthy trees 5 years after transplanting, indicating successful rootage. Severe pruning with 70% removal of needles resulted in the browning of some remaining needles or death of some trees in *P. densiflora*, resulting in a significant increase in CER. Pruning with 35% removal of needles resulted in no death of leaves or branches, and CER did not increase compared with that of unpruned trees. The findings indicate that the successful rootage of transplanted trees and the health of severely pruned trees could be assessed by measuring CER.

Key words: cambial electrical resistance, Shigometer, tree health, pruning, transplanting, tree vigor, tree rootage

* Corresponding author
E-mail: fraxinus@snu.ac.kr

ORCID
Kyung Joon Lee  https://orcid.org/0009-0005-1042-9526

서론

수목의 건강은 여러 가지 요인에 의해서 나빠진다. 이 중에서 인간에 의해서 행해지는 부적절한 이식과 강전정은 수목에 큰 스트레스를 유발한다. 이식은 뿌리를 대량으로 절단하며, 강전정은 수관을 크게 축소하여 나무의 생리적 균형이 깨지면서 건강이 악화된다(Gilman, 2011). 특히 대경목을 이식할 때 근분의 크기가 작고 관수를 제대로 실시하지 않으면 수관이 크게 훼손되거나 나무가 고사한다(Harris et al., 2004).

수목의 건강과 활력도를 측정하는 방법에는 잎의 크기, 변색, 반점, 수명, 엽량, 고사, 가지 생장량, 수관의 풍요도, 겨울눈의 상태 등 나무의 외관을 관찰하는 방법과 생리적 활력을 측정하는 방법이 있다. 생리적 활력을 검사하는 수단으로서 형성층의 전기저항(cambial electrical resistance, CER)을 활용할 수 있다. 나무가 이른 봄 겨울눈이 틀 때, 형성층은 2차 사부를 먼저 만들고, 형성층의 두께가 두꺼워지고, 양전기를 띤 전해질(예; 칼륨 이온)과 수분의 함량이 높아진다(Shigo and Shortle, 1985). 이 경우 형성층 근처에 전기를 흘려보내면 건강한 나무는 수분의 함량이 많아 전기저항이 작고, 건강하지 않은 나무는 수분 함량이 적어 전기저항이 크다. 이러한 원리를 이용해 개발된 기계가 형성층 전기저항계이며, 발명가의 이름을 따서 샤이고미터(Shigometer)라고 부른다(Shigo, 1991). 샤이고미터는 1982년 처음 국내에 도입되었으며, 지금은 국내에 유사한 제품들이 보급되어 있다.

Wargo and Skutt(1975)는 잣이나방의 피해를 받은 밤나무와 참나무류의 스트레스 정도를 나타내는 지표로 CER을 처음 사용하였다. Smith et al.(1976)은 백자작나무의 간벌목과 무간벌목의 생리적 차이를 CER로 측정하였다. 사탕단풍나무의 쇠퇴 현상을 CER로 측정하였으며(Newbanks and Tattar, 1977), 스트로브잣나무에서 형성층과 사부의 전기저항과 수목 활력과의 상관관계를 평가하기도 했다(Kosta and Sherald, 1982). 이러한 원리는 전나무의 주기적 생장에도 활용되었으며(Blanchard et al., 1983), 전나무의 수분퍼텐셜과 CER과의 관계에도 응용되었다(Gagnon et al., 1987). 그 밖에 탄광폐석지의 수목(Plamping et al., 2009)과 참나무류에도 적용되었다(Paysen et al., 1992).

국내에서는 대경목을 이식하는 사례가 잦은데, 이식목의 활착 정도를 형성층의 전기저항으로 조사한 사례가 거의 없다. 본 연구는 이식목의 활착 과정과 강전정을 실시한 나무의 건강 상태를 샤이고미터를 이용해 진단할 수 있는지를 밝히기 위해 실시했다. 부수적인 목적으로 건강한 조경수의 형성층의 전기저항을 수종별로 그리고 계절

별로 측정함으로써 국내에서 개발한 전기저항계를 이용하여 쇠약목을 진단하는 기초자료를 제공하기 위함이다.

재료 및 방법

대학교 캠퍼스에서 조경수로 흔히 심는 30개 수종을 연구대상으로 하였다. 이 중에서 더 흔하게 심는 10개 수종은 봄부터 가을까지 5회에 걸쳐서 샤이고미터를 이용해 형성층의 전기저항(CER)을 측정하였다. 추가로 20개 수종은 CER이 낮은 시기인 여름철(8월 중순)에 측정하여 수종간 차이를 상호 비교하였다. 오래 전에 식재되었고, 충분한 직경(20 cm 이상)으로 자란 건강한 수목을 수종당 5~10 그루 이상 반복으로 사용하였다. Table 1에 본 연구에서 사용한 나무들의 크기(직경, 수고, 수관 폭)와 측정 한 반복수(개체수)를 나타냈다.

이식목의 연구에는 2004년 6월에 이식한 소나무, 은행나무, 느티나무, 왕벚나무를 각 4그루 씩 선정하여 2009년까지 5년간 매년 6월 초에 CER을 측정하였다. 개체별로 흉고 높이에서 동서남북 네 곳을 측정하여 평균치를 구했다. 소나무 이식목의 경우에는 2019년 10월 말 이식한 12 그루를 대상으로 5년간 같은 요령으로 CER의 변화를 추적하였다. 측백나무의 경우에는 서울시 광화문 옆 옛 경기도청 자리에서 근대사의 산증인인 100년생 측백나무(수고 13 m, 근원경 76 cm, 수관폭 8 m)를 2018년 4월 경기도 수원시 영통구 광고역사박물관으로 이식한 후, 2024년까지 6년간 CER의 변화를 조사하였다. 같은 시기에 대학교 캠퍼스에서 자라고 있는 건강목(무이식목) 5그루의 CER을 이식목의 측정치와 상호 비교하였다.

강전정이 소나무의 활력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 대학교 캠퍼스 내에서 수령이 40~50년 되는 소나무 45주를 대상으로 조사하였다. 11월 초에 70% 정도(강전정에 해당), 혹은 35% 정도(중전정에 해당) 수관을 제거한 개체와 인근에 전정을 전혀 하지 않은 개체를 대상으로 이듬해 봄 일부 가지가 고사하는 것을 확인한 후 5월 말에 CER을 측정하였다.

위의 모든 CER 측정은 샤이고미터를 이용하였는데, 이 기계는 0과 200 k Ω 의 보정을 마친 후 사용하였으며, 모든 측정은 오전 일찍 수행하여 하루 중 나타날 수 있는 변이를 최소화하려고 노력했다. 많은 강우가 기록된 경우 2일 이상 기다려 수피가 완전히 마른 다음에 사용했다. 매번 같은 깊이로 수피 틈새를 찾아서 수직 방향으로 탐침(전극)을 딱딱한 목부조직이 느껴질 때까지 밀어 넣었다. 건강한 개체의 경우 예외적으로 아주 높은 수치(예; 25 k Ω 이상)를 보이는 곳의 자료는 배제하였다.

Table 1. A list of trees used in this experiment and their DBH, height, crown width and number of trees for each species for replications.

Species name	DBH (cm)	Height (m)	Crown width (m)	Replications
<i>Aesculus turbinata</i> Blume	38-42	9-11	6-8	5
<i>Prunus x yedoensis</i> Matsum	38-48	8-10	6-9	9
<i>Acer palmatum</i> Thunb.	18-38	7-10	6-10	5
<i>Platanus occidentalis</i> L.	38-51	15-20	10-12	5
<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino	20-45	5-18	5-12	9
<i>Ginkgo biloba</i> L.	18-60	12-20	4-8	9
<i>Pinus strobus</i> L.	41-45	12-15	8-10	5
<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & Cheng	34-60	15-25	4-10	5
<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	19-40	5-15	5-9	35
<i>Juniperus chinensis</i> L.	16-20	4-5	3-4	5
<i>Taxodium distichum</i> (L.) Richard	35-50	18-25	5-8	4
<i>Styphnolobium japonica</i> (L.) Schott.	23-30	10-14	8-10	4
<i>Salix pseudolasiogynae</i> H. Lev.	23-59	8-10	6-9	4
<i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl.	30-40	10-12	7-9	4
<i>Abies holophylla</i> Maxim.	31-45	10-15	6-8	4
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.	35-40	15-20	7-9	4
<i>Acer pictum</i> var. <i>mono</i> Maxim. et Franch.	30-35	8-12	5-8	4
<i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	31-35	12-16	7-9	4
<i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.	20-35	8-12	6-8	4
<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	32-40	10-14	7-9	4
<i>Betula pendula</i> Roth	18-25	10-12	6-7	5
<i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.	20-25	6-8	4-5	4
<i>Pinus parviflora</i> Siebold & Zucc.	29-31	6-8	6-7	4
<i>Cercidiphyllum japonicum</i> Siebold & Zucc.	23-26	8-10	4-6	5
<i>Chionanthus retusus</i> Lindl. & Paxton	16-19	8-10	5-6	4
<i>Fraxinus chinensis</i> Roxb. var. <i>rhynchophylla</i> (Hance) Hemsl.	30-45	10-12	5-8	4
<i>Acer triflorum</i> Kom.	21-25	8-9	6-8	4
<i>Chamaecyparis pisifera</i> (Siebold & Zucc.) Endl.	25-35	10-12	5-8	4
<i>Carpinus laxiflora</i> (Siebold & Zucc.) Blume	30-40	8-10	6-8	4
<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco	22-60	8-13	4-13	6

자료의 통계 분석은 R-studio version 4.2.3를 사용하여 Shapiro-Wilk Test로 정규성을 검정하고, Levene's Test로 등분산성을 검정하였다. Table 2와 3의 수종별, 날자별 비교와 Table 7의 강전정의 피해 여부 검정은 one-way ANOVA 후 Tukey HSD 사후검정을 실시했다. Table 4, 5, 6의 이식목과 무이식목 간의 연차별 비교에는 one-way repeated ANOVA 검정 후 Bonferroni 사후검정을 실시했다.

결 과

1. 건강한 수종 간의 전기 저항 변이

조경수로 흔히 심는 활엽수 5개 수종과 침엽수 5개 수종

의 계절별 CER의 변화를 Table 2에 표시했다. 통계 분석 결과 은행나무와 스트로브 잣나무를 제외한 대부분의 수종에서 조사 날자에 따른 차이가 있었으며, 대부분의 수종에서 10월 20일의 값이 가장 높았다. 10개 수종의 평균 CER은 5월 하순에 6.07 k Ω 이었으며, 6월 중순에 가장 낮은 5.35 k Ω 을 기록하고, 8월에 6.56 k Ω 으로 약간 상승하다가 10월 하순에 10.39 k Ω 으로써 가장 낮은 6월 중순 수치보다 94% 증가했다. 이러한 결과는 Lee et al.(1997)이 조경수 20개 수종을 3월부터 11월까지 조사한 결과와 비슷한 경향이였다.

Table 2. Seasonal changes in cambial electrical resistance(CER) of five angiosperm and five gymnosperm landscape tree species. Each number is an average of five or more trees, and a standard deviation is shown in parenthesis. Results of one -way ANOVA for seasonal changes within a species were expressed in p-values and small letters, while differences between species within a date was expressed in capital letters (unit: kΩ).

Date of measurement	Species names										Mean/p-value
	<i>Aesculus turbinata</i>	<i>Prunus x yedoensis</i>	<i>Acer palmatum</i>	<i>Platanus occidentalis</i>	<i>Zelkova serrata</i>	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Juniperus chinensis</i>	
5.22	2.3 (1.19)	6.4 (1.66)	6.3 (0.98)	7.1 (2.72)	9.8 (1.59)	3.1 (1.60)	3.7 (0.84)	4.0 (2.16)	9.5 (1.61)	8.5 (1.75)	6.07
	ab/ D	ab/BC	b/ BC	b/ AB	b/ A	a/ CD	a/ BCD	b/ BCD	ab/ A	c/ AB	bc/1.61 e-11
6.14	1.5 (0.50)	6.1 (1.03)	6.3 (1.77)	4.7 (1.89)	8.7 (2.77)	2.9 (2.70)	4.5 (1.41)	2.0 (1.00)	8.9 (1.34)	7.9 (0.48)	5.35
	b/ D	ab/ ABC	b/ AB	b/ BCD	b/ A	a/ CD	a/ BCD	b/ D	b/ A	c/ AB	c/ 4.16 e-9
8.18	1.9 (0.55)	5.4 (1.55)	8.1 (3.04)	8.6 (2.78)	9.4 (3.05)	2.0 (0.66)	4.4 (1.89)	3.6 (2.02)	10.6 (3.45)	11.6 (0.85)	6.56
	b/ C	b/ BC	ab/ AB	ab/ AB	b/ AB	a/ C	a/ BC	b/ BC	ab/ A	b/ A	c/ 5.52 e-9
9.26	4.0 (1.32)	7.5 (1.96)	10.0 (1.0)	14.8 (1.66)	12.0 (2.34)	3.0 (1.12)	6.8 (3.20)	3.8 (1.48)	12.9 (2.56)	13.1 (2.39)	8.79
	a/ CD	ab/BC	ab/ AB	a/ A	ab/ A	a/ D	a/ BCD	ab/ CD	a/ A	b/ A	ab, 6.33 e-11
10.20	2.5 (0.58)	9.4 (1.18)	12.2 (2.02)	14.8 (5.84)	15.5 (1.51)	4.4 (1.95)	6.5 (2.83)	8.8 (3.22)	12.8 (3.17)	17.0 (2.12)	10.39
	ab/ E	a/ BCD	a/ ABC	a/ AB	a/ AB	a/ DE	a/CDE	a/ BCD	a/ AB C	a/ A	a/ 5.82 e-8
	2.44	6.96	8.58	10.0	11.08	3.08	5.18	4.44	10.94	11.62	7.43
Mean/p-value/	0.0261/ F	0.0168/ CDE	0.0033/BCD	0.0004/ A BC	0.0001/ AB	0.201/ F	0.227/DEF	0.0064/ EF	0.0049/ AB	3.8e-06/ A	2.08 e-7/ 9.25e-35

Table 3. Comparison of CER between 20 landscape tree species measured in August. Each number is an average of four or more trees and a standard deviation is shown in parenthesis Result of one-way ANOVA for species changes is shown in capital letters (unit: k Ω).

Species name	Mean	St. Dev.	Species name	Mean	St. Dev.
<i>Taxodium distichum</i>	3.4 ^C	2.82	<i>Betula pendula</i>	7.5 ^{ABC}	2.83
<i>Styphnolobium japonica</i>	3.4 ^C	0.75	<i>Taxus cuspidata</i>	7.5 ^{ABC}	0.91
<i>Salix pseudolasiogynae</i>	3.8 ^C	1.26	<i>Pinus parviflora</i>	7 ^{BC}	2.16
<i>Pinus bungeana</i>	3.8 ^C	2.27	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	9.1 ^{AB}	2.96
<i>Abies holophylla</i>	5.1 ^{BC}	1.08	<i>Chionanthus retusus</i>	8.3 ^{ABC}	1.53
<i>Picea abies</i>	6.2 ^{BC}	1.26	<i>Fraxinus chinensis</i> var. <i>rhynchophylla</i>	8 ^{ABC}	2.29
<i>Acer pictum</i> var. <i>mono</i>	6.2 ^{BC}	3.25	<i>Acer triflorum</i>	9.6 ^{AB}	2.91
<i>Larix kaempferi</i>	6.5 ^{BC}	1.96	<i>Chamaecyparis pisifera</i>	10.5 ^{AB}	0.78
<i>Koelreuteria paniculata</i>	7 ^{ABC}	1.80	<i>Carpinus laxiflora</i>	10.8 ^{AB}	2.84
<i>Quercus acutissima</i>	6.9 ^{BC}	1.39	<i>Platycladus orientalis</i>	12.3 ^A	2.58
Total Mean			7.15	1.98	

통계 분석 결과 CER은 수종별로도 큰 차이가 있는 것으로 나타났는데, 그 중 향나무가 가장 높고, 은행나무와 칠엽수가 가장 낮았다. 활엽수 중에서 가장 낮은 수치를 보인 것은 칠엽수로서 5개월 평균으로 2.44 k Ω 을 나타냈으며, 느티나무는 11.08 k Ω 으로서 칠엽수보다 높았다. 침엽수도 활엽수와 마찬가지로 6월 중 CER이 가장 낮았으며, 은행나무는 3.08 k Ω 으로 향나무의 11.62 k Ω 보다 훨씬 낮아서 수종 간에 큰 차이가 있는 것은 활엽수와 같았다. 최근 가장 많이 심는 소나무의 CER은 10.94 k Ω 로 다른 수종보다 높은 편이었다. 이러한 수종간 변이는 수종 고유의 특성으로 판단된다.

Table 2에 열거한 10개 수종을 제외한 다른 20개 수종을 대상으로 형성층 저항이 낮은 8월 중 CER을 Table 3에 표시했다. 수종간 차이를 검증하기 위해 R-studio로 One-way ANOVA를 수행한 결과 p=3.94e-09로 유의한 차이를 보였으며, Tukey HSD 사후검정 결과를 평균치 옆에 표시했다. 저항이 가장 낮은 낙우송과 회화나무(3.4 k Ω)부터 가장 높은 측백나무(12.3 k Ω)까지 저항치가 점진적으로 증가하였는데, 측백나무만 통계적으로 다른 수종보다 유의하게 높은 저항치를 가진 것으로 판명되었다. 20개 수종의 8월 중 평균은 7.15 k Ω 이었다. Table 1과 Table 2의 30개 수종을 모두 합친 평균치는 8월 중에 6.95 k Ω 이었다.

위와 같이 수목의 CER은 생육 기간에 해당하는 5월부터 10월까지 측정하여 수목의 건강도를 가늠할 수 있지만, 계절별로 변화하므로, 측정 대상 수목(스트레스를 받고 있는 개체)의 저항치를 항상 같은 시기의 건강한 수목(대조구에 해당함)의 수치와 비교하여 해당 수목의 건강도를 해석해야 한다.

2. 이식목의 연차별 전기저항 변화

4개 수종의 이식 후 5년간 CER의 변화를 Table 4에 나타냈다. 수종별 연도와 이식 처리에 따른 차이를 검증하기 위해 R-studio를 사용하여 4개 수종의 One-Way Repeated ANOVA를 수행하였다. 전체 평균은 처리 간에는 p=0.007, 년도별로는 p=0.0001 그리고 상호작용도 p=0.0001로 계산되어 이식목(TT)과 무이식목(NT) 간에 유의한 차이가 있었다. 또한 상호작용이 유의한 것으로 나타났는데, 2005년에서 2008년까지는 연도 간에 차이가 인정되었으나, 2009년에는 p=0.7284로 차이가 없어 이식목의 활착이 진행되는 것으로 해석할 수 있다.

수종 간 차이를 비교하기 위해 One-Way Repeated ANOVA를 수행하였다. 소나무는 처리 간에는 p=0.0216, 년도별로는 p=3.38e-08 그리고 상호작용도 p=0.00004로 나타나서 이식목과 무이식목 사이에도 유의한 차이가 있었으며, 년도별로도 유의한 차이를 보여서 이식 이후 차이가 점점 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 상호작용이 유의한 것으로 나타나서 2005년에서 2008년까지는 처리 간에 차이가 났지만, 2009년에는 차이가 없어 소나무 이식목이 무이식목(건강목) 수준으로 활착되었다고 해석할 수 있다.

은행나무는 처리 간에는 p=0.0001, 년도별로는 p=0.0295이지만, 상호작용이 p=0.3686로 나타나서 2009년까지도 이식목이 완전히 활착하지 않은 것으로 해석되었다. 느티나무는 처리 간에 p=0.5764로 차이가 없고, 년도별로는 p=0.0001로 차이가 있었다. 상호작용은 p=0.00019가 나와서 사후 검정을 실시한 결과, 2005년에서 2008년까지는 차이가 없고, 2009년에는 무이식목(NT)이 이식목(TT)보다

Table 4. Comparison of CER of transplanted trees(TT) with that of non-transplanted trees(NT) measured for five years after the transplanting. Each number is an average of four trees with four measurements for each tree and a standard deviation is shown in parenthesis (Unit: k Ω).

Year	<i>Pinus densiflora</i>		<i>Ginkgo biloba</i>		<i>Zelkova serrata</i>		<i>Prunus x yedoensis</i>	
	NT	TT	NT	TT	NT	TT	NT	TT
2005	12.5 (1.65)	18.2 (2.30)	6.7 (0.97)	11.9 (1.44)	6.1 (1.43)	7.8 (1.59)	8.6 (1.07)	13.5 (2.08)
2006	12.4 (1.40)	15.9 (2.34)	6.7 (1.13)	11.6 (1.33)	5.9 (1.33)	7.9 (1.30)	8.9 (1.46)	12.4 (2.13)
2007	9.9 (1.25)	13.9 (1.49)	6.1 (1.14)	10.6 (1.70)	5.9 (1.02)	7.8 (1.40)	8.9 (1.53)	11.6 (1.99)
2008	14.9 (1.52)	18.3 (1.75)	8.4 (1.05)	12.6 (2.25)	9.6 (1.26)	9.9 (1.68)	9.6 (1.45)	11.6 (1.87)
2009	14.8 (1.48)	14.3 (1.69)	8.9 (1.11)	11.5 (1.19)	12.2 (2.24)	8.5 (1.23)	9.5 (1.31)	12.6 (1.41)
Mean	12.9 (1.46)	16.1 (1.91)	7.4 (1.08)	11.6 (1.58)	7.9 (1.46)	8.4 (1.43)	9.1 (1.36)	12.3 (1.90)

더 높은 수치로 나와서, 무이식목의 환경이 이식목에 비하여 원래 나뉘었던 것이 아닌가 생각된다.

왕벚나무의 경우 처리 간에는 $p=0.0042$, 년도별로는 $p=0.789$ 그리고 상호작용도 $p=0.386$ 으로 계산되어 처리 간에만 차이가 있고 나머지는 차이가 없어 5년 후에도 아직 이식목이 활착되지 않았다고 해석할 수 있다. 위의 자료를 근거로 하면, 이식목의 CER은 첫해에 무이식목(건강목) 보다 5~6 k Ω 정도 높아진다고 해석할 수 있으며, 이 수치를 이식목의 건강 상태 혹은 활착 여부를 진단하는 기초자료로 사용할 수 있다.

동시에 이식한 소나무 12그루의 5년간 활착 과정을 Table 5에 표시했다. 5년 간의 차이를 보기 위해 R-Studio를 사용하여 Repeated Measure of ANOVA를 수행한 결과, $p=1.1e-12$ 로 유의한 차이를 보였으며, Bonferroni 사후 검정을 통해 평균값 옆에 표시한 첨자 대문자처럼 2021년과 2022년까지는 CER이 유의하게 감소하지 않았지만, 2023년, 2024년에는 유의하게 감소하여 활착이 진행됨을 알 수 있었다.

이식 2년 후 12그루의 CER 평균은 15.8 k Ω 이었다. 이 수치는 Table 2의 소나무 평균치 10.9 k Ω 보다 4.9 k Ω (45% 증가) 높아 이식 스트레스를 받고 있는 것으로 판단된다. 그러나 이식 소나무의 저항치는 점진적으로 작아져 5년 후인 2024년 5월에 통계적으로 유의한 7.46 k Ω 으로 감소하여 건강한 소나무의 수치(Table 2의 평균치 10.9 k Ω)보다도 더 낮아져 이식목의 활착이 성공적으로 이루어졌다고 판단할 수 있다. 실제로 전문가들이 현장에서 소나무의 건강 상태를 진단할 때 신초(1년생 가지)의 길이와 엽량을

주로 관찰하게 되는데, 본 실험에서 개체별로 엽량을 정량화하지 못 했지만, 외관상 엽량이 많아 활착이 양호하다고 추정되는 개체는 이를 CER로 검증할 수 있음을 시사하고 있다.

Table 6은 100년생 측백나무의 이식 후 6년간 활착 과정을 보여주고 있다. R-studio를 사용하여 Repeated Measure of ANOVA를 수행해 일단 전체적으로 이식목과 건강목 간의 차이가 있는지 검증한 결과 $p=2.268e-08$ 로 유의하게 차이가 나타났다. 이어서 각 날짜별로 t-test를 수행한 결과 2019년 이식 후 2022년까지 이식목과 건강목 간에 저항치에서 차이가 있었으나, 2023년 이후 연속적으로 3회에 걸쳐서 차이를 보이지 않아서 이식목의 건강이 회복된 것으로 해석할 수 있다.

이식 당년에 이식목과 건강목 간에 통계적으로 유의한 5.3 k Ω 의 차이를 보였지만, 이식 초기에는 스트레스를 적게 받은 것으로 보인다. 그러나 2년 후인 2020년 5월 이식목의 CER이 20.9 k Ω 까지 상승하여 건강목보다 통계적으로 유의하게 9.6 k Ω (85% 증가) 높아 건강이 나빠졌다고 판단되었다. 건강을 회복시키기 위해 즉시 관리자 측에서 엽면시비를 여러 차례 실시하였다. 그 결과 6년 후(2024년 6월)에는 이식목의 저항치가 12.8 k Ω 으로 낮아졌으며, 건강목의 11.4 k Ω 과 비교하여 통계적으로 유의적인 차이가 없어 활착이 거의 이루어진 것으로 판단되었다. 실제로 밑동과 근분 근처에서 잔뿌리가 많이 생성되었음을 확인하였지만, 노령목인 관계로 엽량이 눈에 띄게 더 많아지지 않았다.

Table 5. Changes in CER of 12 *Pinus densiflora* trees for five years after transplanting(Nov. 2019) Each number is an average of two or more measurements, and a standard deviation is shown in parenthesis. Results of one-way ANOVA for annual means is shown in capital letters (Unit: k Ω).

Tree number	Period of measurement				Mean
	Sep, 2021	Aug, 2022	June, 2023	May, 2024	
1	18.5 (2.12)	14.5 (2.12)	11 (1.41)	7 (0.0)	12.8 (1.41)
2	14.5 (2.12)	13 (0.0)	12.5 (2.12)	6.5 (0.71)	11.6 (1.24)
3	15 (0.0)	18 (0.0)	12 (1.41)	9 (2.83)	13.5 (1.06)
4	12 (0.0)	13.5 (0.71)	13.5 (0.70)	6 (0.0)	11.4 (0.35)
5	16 (2.83)	16.5 (0.71)	13.5 (0.71)	9 (1.41)	13.8 (1.41)
6	13.3 (4.16)	13 (0.0)	9.5 (0.71)	8 (1.41)	11.0 (1.57)
7	21.5 (1.92)	22 (3.0)	16 (0.0)	8 (0.0)	16.9 (1.23)
8	18.5 (3.54)	18 (1.0)	18 (1.73)	8 (0.0)	15.6 (1.57)
9	14 (1.41)	14 (0.0)	14.3 (2.31)	9.5 (0.71)	12.9 (1.11)
10	15.5 (0.71)	17.3 (3.06)	11 (1.41)	6.5 (0.71)	12.6 (1.47)
11	16 (1.41)	13 (0.0)	11 (0.0)	7.5 (0.71)	11.9 (0.53)
12	14.5 (0.71)	11 (1.41)	8 (1.41)	4.5 (2.12)	9.5 (1.41)
Mean	15.8^A	15.3^A	12.5^B	7.46^C	12.8

Table 6. Changes in CER of a 100-year-old *Platycladus orientalis* tree compared with those of five healthy trees during the six years of rootage period. Each number is an average of 12 measurements (Unit: k Ω).

A transplanted tree			Healthy trees		t-test	Remark
Date of Measurement	Mean	St. Dev.	Mean	St. Dev.		
2018. 5. 10	13.5	1.33	11.2	1.79	n,s p=0.229	Two weeks after the transplanting.
2018. 7. 26	17.4	0.58	12.1	1.75	p=0.00283	Hot summer induced some stress.
2018. 9. 18	15.1	0.76	12.5	0.96	p=0.0156	Heat stress was reduced.
2019. 5. 15	12.8	1.29	10.2	1.24	p=0.0301	New shoots improved the health.
2019. 10. 11	18.3	1.50	13.8	0.76	p=0.0014	The CER increased toward autumn.
2020. 5. 14	20.9	2.06	11.3	1.85	p=0.00006	The health became worsen. Frequent foliar sprays were performed.
2020. 9. 21	18.4	0.93	13.4	1.03	p=0.0005	The health was not improved.
2021. 5. 20	11.3	1.89	11.0	1.45	n,s p=0.830	New shoots improved the health.
2021. 10. 28	21.4	1.40	17.7	2.78	n,s p=0.104	The CER increased toward autumn.
2022. 5. 25	16.2	0.72	11.5	1.30	p=0.0211	The formation of new shoots was delayed.
2022. 10. 21	17.3	0.76	17.3	1.26	n,s p=0.982	The CER increased toward autumn.
2023. 5. 19	11.6	0.25	10.0	1.08	n,s p=0.275	The health was recovered in five years.
2023. 10. 13	12.1	1.01	15.3	1.17	n,s p=0.285	The health was recovered in five years.
2024. 6. 14	12.8	1.91	11.4	0.96	n,s p=0.370	Interpreted as successful rootage.

3. 강전정 실시 소나무의 전기저항

강전정이 소나무의 활력에 미치는 영향을 조사한 결과가 Table 7에 표시되어 있다. 11월 초에 전정을 실시한 개체의 이듬해 5월 하순 CER 조사에서 무전정한 개체는 정상치인 9.5 k Ω 을 보인 반면, 수관을 70% 강전정한 개체는 19.4 k Ω (무전정보다 104% 증가)을 보였으며, 35% 전정한 개체는 13.3 k Ω 을 나타냈다. 강전정한 45개 모든 개체는 예외 없이 일부 가지가 고사하였으며, 그중 4개체는 1년 혹은 2년 내 나무 전체가 완전히 고사하였다.

R-studio를 사용하여 One-way ANOVA를 수행하였으며, $P=0.00000194$ 로 처리간 차이가 유의하게 나타나서, 이후 Tukey HSD 사후검정을 실시하였다. 70% 강전정은 35% 혹은 무전정과 비교하여 통계적으로 유의한 차이가 인정되었으나, 35%와 무전정 간에는 $p=0.0572$ 로 차이가 나타나지 않았다. 즉, 70% 전정은 수목에 큰 피해를 유발하였으나, 35% 전정은 고사지를 초래하지 않았으며, 형성층 전기 저항치에서 무전정과 통계적으로 유의한 차이를 보여 주지 않았다.

이로써 전정 강도가 높아짐에 따라서 수목의 CER이 통계적으로 유의한 수준까지 높아지고, 수목의 건강이 악화된다고 해석할 수 있다. 70% 전정한 모든 개체들은 일부 가지(전체 가지의 1/4-1/3 정도)가 갈색으로 고사하고 있어 강한 전정의 후유증을 육안으로도 확인할 수 있었다. 반면, 35% 전정한 개체들에서는 고사지를 거의 발견할 수 없었다. 위의 결과를 바탕으로 소나무의 경우 1회 35% 전정을 허용해도 된다는 결론을 얻었으나, 이 보다 더 낮은 수준으로 전정을 실시하는 것이 바람직하다.

고 찰

형성층 전기저항(CER)은 계절별로 변화하는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 1997; Hwang and Kim, 2016; Park et al., 2021). 봄에 수액 이동이 시작하면서 새순이 나오면 CER은 감소하기 시작하여, 여름에 최저치를 보이고, 가을에는 다시 증가함을 본 연구에서도 확인하였다. 전기저항의 변화는 수목의 건강과 관련된 여러 분야에 응용된다. 유럽의 흰전나무에서 스트레스로 수관이 축소되는 병징이 나타나기 전에 연륜 폭이 먼저 감소하는데, 이때 CER이 증가하였으며(Toller et al., 1999), 복사나무에서 성장량과 CER 간에 상관관계가 있는 것으로 밝혀졌다(Wisniewski et al., 1985).

본 연구는 이식이나 강전정으로 나무의 건강이 나빠질 때 CER로 스트레스 수준을 진단할 수 있음을 입증하였다. 이러한 결과는 미국에서 전나무와 가문비나무가 뿔나무버섯 뿌리썩음병, 천공성 해충, 겨울살이, 순나방의 피해를 받은 나무의 고사율을 조사했던 연구와 같은 결과라고 판단된다(Filip et al., 2002). CER은 전나무 순나방 해충(Davis et al., 1980), 수분부족(Lindberg and Johansson, 1989), 밀식 피해(Smith et al., 1976), 등 각종 스트레스가 건강에 미치는 영향을 분석할 수 있는 수단으로 쓰일 수 있음을 보여주고 있다. 그 밖에 Wargo et al.(2002)는 사탕단풍나무에서 석회 시비로 수관 활력도가 증가할 때 CER이 감소한다고 하였으며, Shortle et al.(1977)은 상처 치유 속도와 CER과의 부의 상관관계를 밝혔다. 위와 같이 CER 측정은 수목의 건강이 악화되는 경우와 건강이 증진되는 경우 모두 건강 상태를 진단하는 수단으로 활용될 수 있는

Table 7. The CER of *Pinus densiflora* trees treated with 70% or 35% removal of needles in November, and their CER measured in the following May. Each number is an average of four measurements. Results of one-way ANOVA for treatment means are shown in capital letters (Unit: k Ω).

Replications	Very severe pruning (70% removal of needles)	Severe pruning (35% removal of needles)	No pruning
1	13	15	8
2	25.5	15.5	13
3	20.7	10.5	11
4	21.5	12.5	9
5	17.5	13	7
6	18		9
7-45	Tree mortality rate was 8.9%.		
Mean	19.4 ^A (st. dev. 4.24)	13.3 ^B (st. dev. 2.02)	9.5 ^B (st. dev. 2.17)
Remark	All 45 pruned trees showed dead branches, and four individuals were killed. Needles or branches were not damaged.		

유용한 진단법이라고 판단된다.

이식목은 뿌리가 대량으로 절단되는 순간부터 생리적 불균형 상태에 놓이며, 수분 부족으로 인하여 이식 스트레스를 겪게 된다(Harris et al., 2004). Table 3에서 이식 1년 후 4개 수종 이식목의 평균 CER은 12.9 k Ω 인데 비교하여 건강목은 8.5 k Ω 이었다. 본 연구를 수행하기 전에 다른 소나무를 대상으로 한 예비 조사에서 뿌리를 대량으로 자른 후 CER이 5-6 k Ω 증가한 것을 관찰하였는데, 본 연구는 이를 재확인한 셈이다.

소나무는 뾰뻗한 침엽을 가져 평소에 수분 스트레스를 받아도 눈에 가시적인 병징을 나타내지 않는다(La et al., 2009). 이식한 소나무 혹은 다른 상록침엽수들은 수분 부족이 지속되어도 활엽수처럼 잎이 아래로 처지는 경우를 볼 수 없으며, 스트레스가 오랫동안 지속되면 마지막에 별안간 색깔이 변하며, 일단 변색이 되면 결코 회복되지 않는다. 이러한 독특한 성질 때문에 이식한 소나무의 관수 적기를 놓쳐 나무가 고사하는 경우를 자주 볼 수 있다.

육안으로 구별할 수 없는 소나무와 측백나무의 이식 스트레스 정도와 활착 여부를 CER은 본 실험에서 정확하게 그 수치로 보여주고 있다. 이런 원리를 바탕으로 전기저항계를 활용하여 평소에 소나무 이식목의 건강과 활착 여부를 진단할 수 있다고 판단된다. 소나무를 대상으로 한 이러한 진단이 다른 침엽수, 예를 들면 주목이나 향나무에 활용할 수 있는지는 추가 자료가 없어 여기에서 논할 수 없으며, 추후 실험을 통해서 확인할 필요가 있다.

전정을 과도하게 하면 수목에 피해를 유발한다. Gilman (2011)은 수령에 따른 1회 최대 전정 강도를 제거되는 잎의 양으로 제시하였다. 유령목은 50%, 중령목은 25%, 성숙목은 10% 이상 제거할 경우 맹아가 많이 발생하거나 수목에 피해를 줄 수 있다고 기술하였으며, 매년 혹은 격년으로 조금 씩 약전정을 실시할 것을 권장하고 있다. Table 7은 소나무에 강전정을 실시할 경우 어떤 결과를 가져오는지를 명확하게 보여주고 있다. 35%의 중전정은 나무에 가시적 피해를 거의 주지 않았지만, 70%의 강전정은 일부 가지를 고사시키거나 나무 전체를 죽게 했다.

상록침엽수는 평소에 눈에 많은 에너지와 양분을 저장하고 있으며, 한겨울에도 광합성을 수행한다(Pallardy, 2008). 약전정은 적은 양의 잎을 제거하기 때문에 수목에 피해를 주지 않는다(Gilman, 2011). 소형 소나무를 만드는 전정을 할 경우 일본에서 상식화된 것처럼 1회에 20% 이하로 실시하는 것이 안전하다. 이는 잎을 그 이상 제거할 경우, 특히 가을철 강전정을 실시할 경우, 나머지 잎의 광합성량이 부족하여 살아 있는 조직에 에너지를 충분히 공급하지 못하면, 일부 잎과 가지가 고사하기 때문이다. 국

내에서 소나무 전정 시 40% 혹은 50% 이상 과도하게 전정하는 경우를 자주 볼 수 있다. 이는 살아 있는 가지를 훼손시키거나 나무를 고사시킬 가능성이 높기 때문에 자제해야 함을 본 연구는 증명하고 있다.

결론

수목의 형성층 전기저항(CER)은 수종과 계절 따라서 변화하지만, 건강한 수목을 대상으로 측정 환경의 변이를 최소화하면서 기본자료를 확보하면, 이를 근거로 하여 형성층 전기저항계(예; 샤이고미터)를 이용하여 건강이 나쁜 수목의 활력도와 건강 상태를 진단하는 수단으로 활용할 수 있다. 이 샤이고미터의 연구 결과를 국내에서 최근에 개발한 전기저항측정기에 응용할 수 있다고 판단된다. 특히 소나무와 측백나무 이식목의 CER은 이식 초기에 증가하지만, 활착이 진행되면서 점진적으로 감소하여 5-6년 후에는 건강한 수목의 수치에 접근하며, 이를 토대로 이식목이 활착한 정도를 진단할 수 있었다. 소나무에 70%의 강전정을 실시하면, 일부 가지가 고사하거나 나무 전체가 죽기도 했으며, 건강도를 CER로 파악할 수 있었다. 35%의 중전정을 실시하면 가시적인 피해를 주지 않으므로, 이를 허용해도 될 것으로 판단하였다.

References

- Blanchard, R.O., Shortle, W.C. and Davis, W. 1983. Mechanism relating cambial electrical resistance to periodic growth rate of balsam fir. *Canadian Journal of Forest Research* 13(3): 472-480.
- Davis, W., Shortle, W. and Shigo, A. 1980. Potential hazard rating systems for fir stands infested with budworms using cambial electrical resistance. *Canadian Journal of Forest Research* 10(4): 541-544.
- Filip, G.M., Ganio, L.M., Oester, P.T., Mason, R.R. and Wickman, B.E. 2002. Ten year effect of fertilization on tree growth and mortality associated with *Armillaria* root disease, fir engravers, dwarf mistletoe, and western spruce budworm in Northeast Oregon. *Western Journal of Applied Forestry* 17(3): 122-128.
- Gagnon, R.R., Bauce, E. and Pineau, M. 1987. Relation between air water potential and cambial electrical resistance of balsam fir and white spruce after budbreak. *Canadian Journal of Forest Research* 17(2): 105-108.
- Gilman, E.F. 2011. An illustrated guide to pruning. 3rd ed. Cengage Learning, Stamford, Connecticut. U.S.A. pp. 352.
- Harris, R.W., Clark, J.R. and Matheny, N.P. 2004.

- Arboriculture. 4th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. pp. 578.
- Hwang, D.K. and Kim, D.Y. 2016. Assessment of landscape tree vigor using cambial electrical resistance. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3(4): 302-306.
- Kosta, S. and Sherald, J.L. 1982. An evaluation of electrical resistance as a measure of vigor in eastern white pine. *Canadian Journal of Forest Research* 12(2): 2-15.
- La, Y.J., Woo, K.S. and Lee, K.J. 2009. Diseases, insect pests, and abiotic disorders of landscape trees in Korea. Seoul National University Press. pp. 578.
- Lee, K.J., Han, S.H. and Jeong, Y.S. 1997. Differences between species and seasonal changes in cambial electrical resistance of twenty ornamental tree species. *Journal of Korean Forest Society* 86(4): 415-421.
- Lindberg, M. and Johansson, M. 1989. The use of electrical resistance of cambium and phloem as a measure of tree vigor. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 4(2): 175-185.
- Newbanks, D. and Tattar, T. 1977. The relationship between electrical resistance and severity of decline systems in *Acer saccharum*. *Canadian Journal of Forest Research*. 14(2): 177-180.
- Pallardy, S.G. 2008. Physiology of woody plants. 3rd ed. Academic Press, Amsterdam. pp. 454.
- Park, J.H., Seo, D.H., Son, J.Y., Park, J.H., Kwon, O.K., and Kim, K.W. 2021. Measurement of cambial electrical resistance for the vitality inspection of *Metasequoia*. *Institute of Agricultural and Life Science, Gyeongsang National University* 55(2): 75-82.
- Paysen, T.E., Narog, M.G. and Zavala, M.A. 1992. Monitoring electrical resistance in canyon live oak using a Shigometer. Symposium on ecology and management of oak and associated woodlands: Perspective in the SW United States and New Mexico Symposium. April 27-30, 1992. Siera Vista, AZ., U.S.A.
- Plamping, K., Haigh, M.H., Cullis, M.J. and Jenkins, R.E. 2009. Evaluation of cambial electrical resistance for the appraisal of tree vitality on reclaimed coal lands. *International Journal of Mining, Reclamation, and Environment* 23(1): 21-32.
- Shigo, A.L. 1991. Modern arboriculture. Shigo & Trees. Durham, New Hampshire. U.S.A. pp.424.
- Shigo, A.L. and Shortle, W.C. 1985. Spruce budworms handbook: Shigometry, a reference guide. USDA Agricultural Handbook 646: 1-49. U.S.A.
- Shortle, W.S., Shigo, A.L., Berry, P. and Abusamra, J. 1977. Electrical resistance in tree cambium zone: relationship to rates of growth and wound closure. *Forest Science* 23(3): 326-329.
- Smith, D.A., Shigo, A., Shafford, L. and Blanchard, R. 1976. Resistance to a pulsed electric current reveal differences between non-released, released and released-fertilized paper birch trees. *Forest Science* 22(4): 471-472.
- Toller, N., Shortle, W.C., Cufar, K., Ferlin, F. and Smith, K.T. 1999. Detecting changes in tree health and productivity in silver fir in Slovenia. *European Journal of Forest Pathology* 29(3): 189-198.
- Wargo, P.M. and Skutt, H.R. 1975. Resistance to pulsed electric current: An indicator of stress in forest trees. *Canadian Journal of Forest Research* 5(4): 557-561.
- Wargo, P.M., Minocha, R., Wong, B.L., Long, R.P., Horsley, S.B. and Hall, T.J. 2002. Measuring changes in stress and vitality indicators in limed sugar maple in the Allegheny Plateau in north-central Pennsylvania. *Canadian Journal of Forest Research* 32(4): 629-641.
- Wisniewski, M., Bogle, A.L. and Wilson, C.L. 1985. Seasonal variation in cambial electrical resistance and its relation to growth in two cultivars of peach. *Canadian Journal of Plant Science* 65(3): 345-350.

Manuscript Received : December 2, 2024

First Revision : February 17, 2025

Second Revision : March 26, 2025

Accepted : April 15, 2025