

# 목본식물 형성층 전기저항에 영향을 주는 환경 요인

김동욱\* · 김민수\*\* · 이부용\*\*\*

\*대구가톨릭대학교 대학원 · \*\*대구가톨릭대학교 조경학과 · \*\*\*대구가톨릭대학교 환경과학과

## Effects of Environmental Factors on the Cambial Electrical Resistance of Woody Plants

Kim, Dong-Uk\* · Kim, Min-Soo\*\* · Lee, Bu-Yong\*\*\*

\*Graduate School, Catholic University of Daegu

\*\*Dept. of Landscape Architecture, Catholic University of Daegu

\*\*\*Dept. of Environmental Science, Catholic University of Daegu

### ABSTRACT

This study was conducted to analyze the effects of environmental factors such as soil moisture, light intensity, temperature and humidity on changes in cambial electrical resistance. To improve data quality, cambial electrical resistance was continuously measured at fixed points by using a data logger isolated from alternating current. The relationship between environmental factors and changes in cambial electrical resistance was also analyzed.

The results are as follows:

1. Cambial electrical resistance is highly correlated to the temperature of the measured area( $r = -0.934$ ). Therefore, temperature compensation is needed to analyze the effects of other environmental factors on cambial electrical resistance changes.
2. If temperature is compensated for, the change of cambial electrical resistance is highly correlated to water vapor pressure( $r = -0.836$ ).
3. If temperature and humidity are compensated for, the change of cambial electrical resistance is highly correlated to intensity of light( $r = -0.738$ ).
4. Diurnal deviation of soil water potential is not more significantly related than the change of cambial electrical resistance. However, in the long-term, soil water potential and cambial electrical resistance are highly correlated( $r = -0.831$ ). This indicates that soil moisture significantly influences the long-term change of cambial electrical resistance.

*Key Words: C.E.R, Soil Water Potential, Diurnal Deviation, Data Logger, Water Stress, Continuous Measurement*

### 1. 서론

McCullough and Wagner(1987)는 식물체의 형성층은 성장

조직일 뿐만 아니라 수분과 영양물질이 이동하는 통로이므로 형성층의 함수상태는 식물체의 생리적 활성을 나타내주는 지표가 되며, 형성층 전기저항은 이러한 식물체 내부의 변화를

\*: 본 연구는 한국과학재단의 지역대학우수과학자지원연구(R05-2002-000-00996-0)의 지원으로 수행되었음.

**Corresponding author:** Min-Soo Kim, Dept. of Landscape Architecture, Catholic University of Daegu, Kyeongsbuk 712-702, Korea, Tel.: +82-53-850-3187, E-mail: mskim@cu.ac.kr

간접적으로 잘 나타내어 주게 되므로 형성층 전기저항은 식물의 활력도를 알고자 할 때에 대단히 중요한 지표로 활용되고 있고, 형성층 전기저항을 이용한 진단은 기술이 간단하고, 객관적이며, 빠르고, 비 파괴적이며, 경제적이라는 장점을 가지고 있다고 하였다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 형성층 전기저항 측정치로 식물의 활력도를 나타내는 데에는 아직 부족한 점이 많이 있다. 이에 대하여 살펴보면 Blanchard *et al.*(1983)과 Shortle *et al.*(1977)은 형성층 전기저항을 측정하여 식물의 활력도를 나타내는 지표로 사용하고자 하였는데, 전기저항치가 작을수록 수목의 성장량이 많았다고 하였으나 개개의 수목에서는 저항치와 성장량과의 관계를 발견하기 어려웠고, 단지 성장이 양호한 그룹과 불량한 그룹 간에는 전기저항의 평균치에서 양자간 유의차가 있을 뿐이라고 하였다. Wargo and Skutt(1975)는 잎 시나방의 피해에 의해 잎이 떨어진 나무는 그렇지 않은 나무에 비해 형성층 전기저항이 높게 나타난다고 하였고, Shigo(1991)는 수목이 휴면기에 있거나 스트레스로 대사 활동이 둔화되면 비교적 높은 전기 저항치를 나타내며, 왕성한 성장을 보이는 수목과 많은 전해물질을 함유한 여름철에는 형성층 전기저항은 낮게 나타난다고 하였다. 그런데 이러한 연구 결과는 형성층 전기저항 측정치의 유용성을 주장하고 있으나 수목의 생육 상태에 극단적인 차이가 있는 경우에 한하여 형성층 전기저항치의 비교가 유용하다는 것을 나타내주고 있다. 이러한 한계점에도 불구하고 형성층 전기저항 측정치는 낙엽이 저서 육안으로 수목의 생육 상태를 관찰하기 어려운 경우, 수목의 고사 여부와 회복 가능성 등을 예측할 때에 유용하게 사용될 수 있으며, 측정방법과 측정치 분석방법의 개선을 통하여 그 활용범위를 넓힐 수 있는 가능성을 지니고 있다.

조경식재 공사에 사용되는 수목은 굴취되어 이식되는 경우가 대부분이고, 생육환경이 열악한 곳에 식재되는 수목이 많으므로 식재후 일찍 낙엽이 지고 겨울철을 지난 후에도 새잎이 늦게 나오는 경우가 많다. 이러한 경우, 수목의 고사 여부 및 회복 가능성에 대한 판단과 회복을 위한 여러 조치들이 효과를 나타내고 있는지를 판단하는 것은 매우 중요해지게 된다. 그런데 낙엽이 진 수목의 생육상태를 육안으로 관찰하여 판단하기는 매우 어려운 경우가 많다. 따라서 형성층 전기저항치로 이러한 수목의 생육상태를 알아보고자 하게 되는데, 종래의 방법으로는 측정할 때마다 측정부위가 다르게 되고 측정점을 삽입하는 깊이가 달라지는 등의 문제점이 있어 형성층 전기저항치로 수목의 생육상태를 판단하기가 곤란하였다. 김민수(1995)는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 측정침을 한 군데에 고정시키고, 컴퓨터를 이용한 자동연속계측을 실시하였다. 이 측정방법은 컴퓨터에 장착된 DA Converter를 이용하여 교류의 펄스 주기보다 짧은 시간 동안 직류 전기를 흘려보낸 후, AD

Converter를 이용하여 즉시 피측정체의 전기저항을 측정함으로써 피측정체에서 전기분해가 일어나는 것을 막고, 짧은 시간 내에 측정을 완료함으로써 열에 의한 저항 변화를 최소화하는 특징을 가지고 있었다. 또한, 연속자동계측으로 획득된 형성층 전기저항의 변화를 판독하여 수목이 수분스트레스에 의해 영구위조점에 도달하는 것을 예측하고자 하였다. 그러나 이러한 방법은 형성층 전기저항의 일중(日中) 변화폭이 커서 측정치의 변화로부터 수목의 수분 스트레스에 대한 반응을 면밀하게 판독하기는 곤란하다고 하였다.

본 연구는 컴퓨터에 의한 자동연속계측이 AC 전원으로부터 유입되는 노이즈를 차단하기 어렵다는 점을 감안하여 Data Logger로 형성층 전기저항을 측정하여 측정 오차를 줄이고자 하였다. 한편, 형성층 전기저항의 일변화(日變化)가 큰 것은 온도, 습도, 광도, 토양수분 등의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 파악되었고, 형성층 전기저항의 측정치에서 이러한 환경요인의 영향을 배제하거나 보정할 수 있다면 측정치로부터 각종 스트레스에 대한 수목의 반응을 면밀하게 분석할 수 있게 될 것이라고 예상하였다. 따라서 본 연구는 형성층 전기저항의 변화로부터 스트레스에 대한 수목의 반응 정도를 판독하기 위한 진단 계로 환경요인이 형성층 전기저항의 일변화(日變化)에 어느 정도의 영향을 미치는지를 분석하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 형성층 전기저항 측정용 전극

형성층 전기저항 측정용 전극은 직경 1.05mm, 전극 간격 6.90±0.1mm, 높이 4.0±0.1mm의 스테인리스 침 베이스를 기판에 부착하여 사용하였으며, 기판에 수분이 부착되어 미세 전류가 누전될 가능성을 배제하기 위하여 침과 침 사이의 바깥쪽 기판은 실리콘을 도포하여 절연시키도록 하였다(그림 1 참조).



그림 1. 전기저항 측정용 전극

## 2. 공시 식물 및 토양

공시식물은 조경수목으로 많이 사용되는 왕벚나무(*Prunus yedoensis*)로 선정하였으며, 경산시 하양읍내 조경수 재배 농장에서 생산된 4년생 왕벚나무 중 수고 2±0.3m, 수간 직경 4±0.3cm의 생육상태가 비교적 좋고, 병충해의 피해가 없는 개체를 선발하여 사용하였다. 선발된 수목은 가로 40cm, 세로 40cm, 높이 70cm의 플라스틱 용기에 이식하였다. 플라스틱 용기의 깊이는 토양수분 센서(TDR)가 충분히 묻힐 수 있는 깊이로 하였으며, 가로·세로의 폭은 운반이 가능한 크기로 제한하였다. 포트 내의 토양은 5mm 체를 통과한 미사질 양토를 사용하였다.

## 3. 형성층 전기저항 연속 측정 방법

- 1) 형성층 전기저항의 변화를 측정하기 위하여 토양 표면에서 위쪽으로 60cm 떨어진 지점의 목질부와 형성층 사이에 전극을 꽂았다.
- 2) 형성층 전기저항의 측정은 Campbell Scientific사의 데이터 로거인 CR10X를 사용하였다. 그림 2에서와 같이 측정용 전극과 기준저항에 D/C 2.5V를 15분마다 0.01초 동안 인가함과 동시에 측정용 전극의 전압을 측정하였고, 측정 전압은 식 1에 따라 전기 저항치로 변환하였다.

$$\text{측정 저항} = \frac{\text{기준 저항} \times \text{측정 전압}}{(\text{인가 전압} - \text{측정 전압})} \quad (\text{식 1})$$

## 4. 외부 환경요인의 측정

형성층 전기저항에 영향을 미치는 환경요인 측정 장치는 그림 3과 같이 구성하였다. 토양 수분 측정은 Automata INC의 Aqua-tel-TDR 센서, 온도 및 습도는 Campbell Scientific사의 HMP45C Model, 광도는 SDEC France사의 P.A.R. Sensor (JYP 1000), 풍속은 RM-young사의 5103Model, 형성층 전기저항 측정 부위의 온도는 K타입의 열전쌍 센서를 사용하였다. 각센서의 신호는 Data Logger(CR10X)에 15분 간격으로 저장하

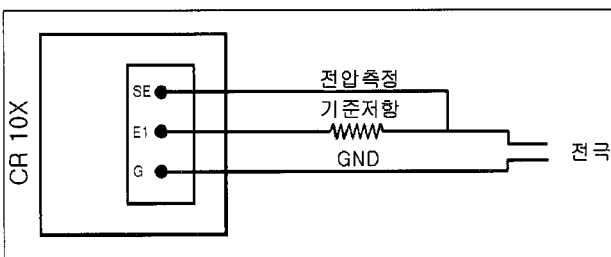


그림 2. 형성층 전기저항 측정 회로

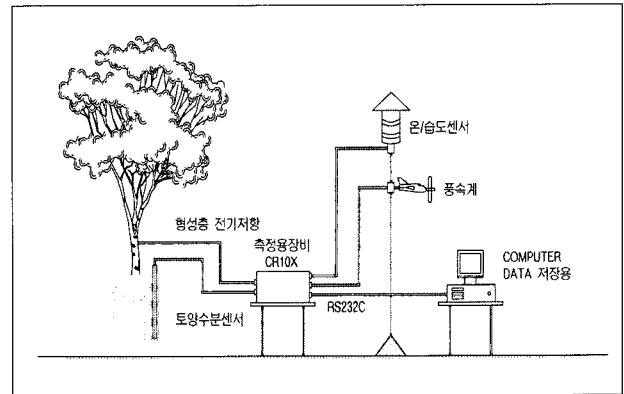


그림 3. 형성층 전기저항과 외부 환경 요인의 측정 장치 구성

였다.

## 5. 형성층 전기저항의 온도 보정

### 1) 형성층 전기저항 온도 보정용 공시체

형성층 전기저항의 측정이 완료된 왕벚나무 줄기에서 측정용 전극이 부착된 부분을 자른 후 절단 부위를 파라핀으로 밀봉하여 온도 보정 실험에 사용하였다.

### 2) 항온고 내의 온도 제어

그림 4와 같은 장치에서 항온고의 온도를 6°C에 맞추어 놓고, 스티로폼 박스 내에 피측정체를 넣고 피측정체의 온도가 제어 시작 온도가 될 때까지 방치하였다. 피측정체의 온도 제어는 P.I.D. 온도 컨트롤러(OMRON사의 E5AX-A01)를 사용하였고, 온도 컨트롤러의 온도 설정 변경은 제어용 컴퓨터의 RS232통신을 이용하였다. 전극이 꽂혀 있는 피측정체의 온도는 열전쌍(K-Type)을 부착하여 전압과 함께 1분 간격으로

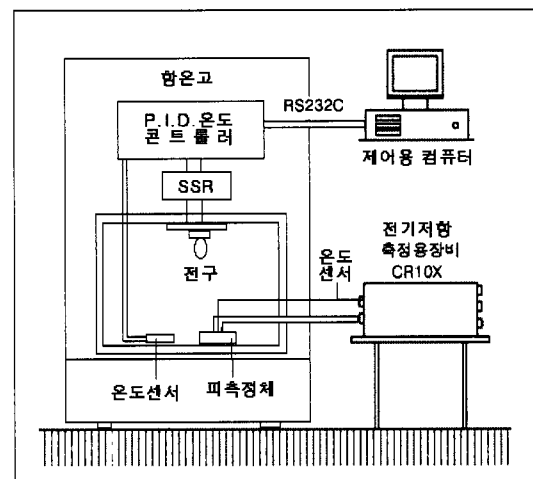


그림 4. 온도 제어 및 형성층 전기저항 측정용 장비

CR10X로 읽어 들였으며, 측정된 전압은 식 1에 따라 저항치로 변환하였다. 형성층 전기저항과 온도의 회귀분석을 통하여 유의성을 검증하고 회귀식을 이용하여 온도 보정을 하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 환경요인과 형성층 전기저항의 변화

##### 1) 환경요인과 형성층 전기저항의 일변화

공시식물의 일중 환경요인과 형성층 전기저항 변화를 그림 5, 6, 7에 나타내었다. 일중 형성층 전기 변화는 일출 후 낮아지기 시작하여 11시부터 12시경이 가장 낮아지고 이후 서서히 상승하는 경향이 나타났다. 형성층 전기저항이 낮아지는 11시부터 12시경은 측정 기간 중 온도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 광도가 높아지는 시기이기도 하고 상대습도가 낮아지며, 풍속이 증가하기 시작하는 등 외부 환경 요인이 급격하게 변화하기 시작하는 시기이기도 하다. 외부 환경 요인과 형성층 전기저항과의 관계를 살펴볼 때 형성층 전기저항의 변화는 외부 환경 요인이 복합적으로 작용하여 나타난다는 것을 알 수 있다. 따라서 외부 환경 요인이 형성층 전기저항에 미치는 영향을 분석하기 위하여 외부 환경 요인(온도, 습도, 토양수분, 풍속, 조도)

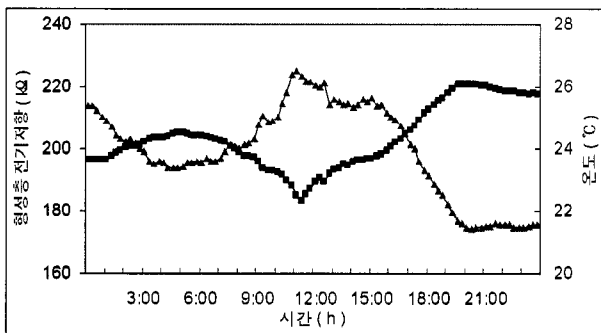


그림 5. 온도의 일 변화에 따른 형성층 전기저항의 변화  
 범례: ■: 형성층 전기저항 ▲: 온도

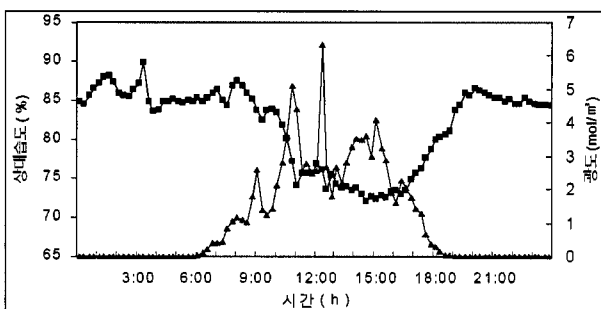


그림 6. 습도와 광도의 일변화  
 범례: ■: 상대습도 ▲: 광도

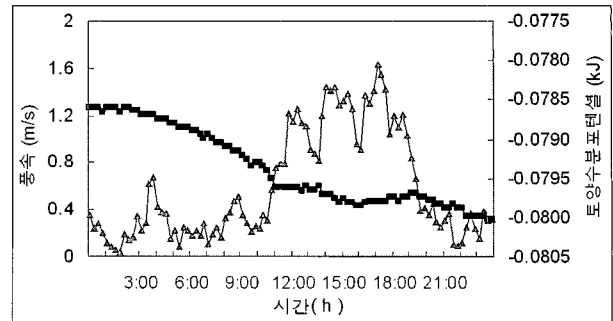


그림 7. 풍속과 토양수분 포텐셜의 일변화  
 범례: ■: 토양수분 포텐셜 ▲: 풍속

표 1. 환경요인과 형성층 전기저항의 상관관계 분석

	C.E.R.	토양수분	온도	상대습도	풍속	광도
C.E.R*	1					
토양수분	-0.3821	1				
온도	-0.9663	0.2586	1			
상대습도	0.4225	0.5243	-0.5886	1		
풍속	-0.2082	-0.5210	0.3951	-0.8727	1	
광도	-0.6603	-0.3139	0.7354	-0.7801	0.5970	1

\*: C.E.R.: Cambial Electrical Resistance

과의 상관분석을 실시하였다(표 1 참조).

##### 2) 환경 요인과 형성층 전기저항의 상관분석

형성층 전기저항과 외부 환경 요인과의 상관 분석을 한 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1의 상관분석 결과를 살펴보면 전기저항과 온도( $r = -0.966$ ), 광도( $r = -0.660$ )의 순서로 높은 부의 상관을 나타내었고, 형성층 전기저항과 상대 습도( $r = 0.4225$ ), 토양수분( $r = -0.382$ ), 풍속( $-0.208$ ) 순서로 낮은 상관을 나타내었다. 이러한 상관 분석결과는 형성층 전기저항의 온도 의존성이 매우 높다는 것을 나타내 주고 있는데, 형성층 전기저항은 기후조건 중에서도 특히 온도와 밀접한 상관성을 가지고 있다고 한 하태주와 마용우(2001)의 연구 결과와도 일치한다고 할 수 있다. 일반적으로 고체의 전기저항은 온도가 상승하면 저항치가 높아지는 것에 비하여 형성층 전기저항의 경우는 온도가 높아지면 전기저항이 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 형성층 전기저항이 액체로서의 전기저항 특성을 가진다는 것을 알 수 있다. 문경만(2000)은 액체의 전기저항은 용액에 포함된 전리된 이온의 농도와 이온의 이동속도에 따라 달라진다고 하였는데, 온도가 상승하면 이온의 전리도가 높아지고, 또한 이동속도가 빨라지므로 전기저항이 낮게 나타난다는 것을 알 수 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 형성층 전기저항은 온도 이외에도 여러 가지 환경 요인의 영향을 복합적으로 받고 있는 것으로 사료되는데, Piene *et al.*(1984)은 수목은 온도가 상승하면 더 많은 물질을 생산하며, 광합성에 요구되는 필수 이온이 증가되고 뿌리에서 무기염의 능동적 흡수가 촉진된다고 하였다. 무기염의 흡수로 형성층 내의 수분 포텐셜과 유동 이온의 증가로 전기저항은 감소되며, 수목의 활력은 높아지게 된다. 이러한 물질의 이동은 수목의 생육 기간과 관련되며, 형성층 전기저항의 측정값을 비교 시에는 온도의 대한 고려가 요구된다고 하였다. 따라서 형성층 전기저항에 영향을 미치는 온도의 효과를 보정해 주지 않을 경우, 다른 환경 요인이 형성층 전기저항에 미치는 영향을 분석하기 곤란해지므로 온도에 의한 보정 후 외부 환경 요인과 형성층 전기저항과의 관계를 고찰할 필요가 있다.

3) 형성층 전기저항의 온도 보정

Dixon *et al.*(1977)은 형성층 전기저항의 온도 보정을 위하여 수목의 가지를 물속에서 자른 후 16시간 동안 충분히 물에 적셔 놓았고, 전극과 온도 센서를 설치 후 10℃의 냉장고에 넣은 후 피 측정체의 온도가 냉장고의 온도와 같을 때까지(약 1시간 이상) 방치한 후 피 측정체의 온도와 형성층 전기저항의 변화를 측정하였다. 측정 결과, 전기저항치의 대수(logarithm)는 온도에 반비례하게 나타났으며, 이를 온도 보정에 사용하였다. 이러한 측정방법은 피 측정체를 냉장고에 넣었을 때 온도 변화가 급격히 일어나게 되고 시간이 지남에 따라 온도 변화가 서서히 일어나게 된다는 점을 감안할 때 온도 구배에 따라 온도 보정 계수가 달라진다는 것을 나타내고 있다.

Gagnon *et al.*(1987)은 Shigometer(Model OZ 67)을 이용한 실험에서 12시간동안 3℃에서 30℃까지 온도 변화를 주고 측정 한 측정치를 바탕으로 온도보정계수를 가문비나무에서 -0.27, 잣나무에서 -0.28로 결정하였다. Gagnon *et al.*(1987)이 구한 온도보정계수는 온도와 형성층 전기저항과의 관계가 선형적이라는 것을 인정하고 있는데, 이는 Dixon *et al.*(1977)의 보정계수와는 차이를 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 그림 4와 같은 장치에서 P.I.D. 온도 컨트롤러를 이용하여 11℃에서 38℃까지 일정한 비율로 온도를 올리는 방법을 사용하였다. 매1분 단위로 형성층 전기저항을 측정하고, 측정치를 이용하여 형성층 전기저항과 온도와의 단순회귀분석을 실시하였다(그림 8 참조).

형성층 전기저항과 온도와의 단순회귀 분석 결과, 상관계수는(r=0.9985) 결정계수 R<sup>2</sup>=0.9970로 나타났으며, p=0.0001로 고도의 유의성이 인정되어 온도가 형성층 전기저항에 높은 의존성을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 온도 보정계수는 k= -2.4037로 나타났다(그림 8 참조). 이러한 온도 보정계수를 이용하여 식 2와 같이 형성층 전기저항 측정값에 대한 온도

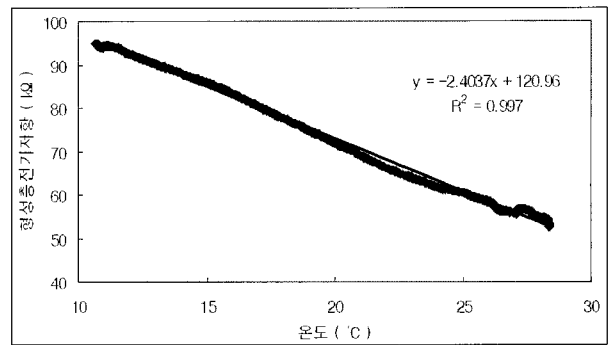


그림 8. 형성층 전기저항과 온도의 회귀분석

표 2. 온도보정 형성층 전기저항과 환경요인과의 상관관계

	온도보정 C.E.R.	토양수분	상대습도	풍 속	광 도
온도보정 C.E.R.*	1				
토양수분	-0.4375	1			
상대습도	0.3225	0.5243	1		
풍속	-0.1029	-0.5211	-0.8727	1	
광도	-0.6022	-0.3139	-0.7801	0.5970	1

\*: C.E.R: Cambial Electrical Resistance

보정을 실시하였다.

$$R = R_1 + 2.4037 \times (T_1 - T_2) \tag{식 2}$$

R: 온도 보정저항, R<sub>1</sub>: 측정 저항, T<sub>1</sub>: 온도, T<sub>2</sub>: 일중 평균온도

4) 온도보정 후 형성층 전기저항과 환경 요인과의 관계  
온도 보정 계수로 보정된 형성층 전기저항과 환경 요인과의 상관관계를 분석하기 위하여 상관분석을 실시하였다(표 2 참조).

온도 보정된 형성층 전기저항과 외부 환경 요인과의 상관관계를 살펴보면 온도와 상관성이 높은 광도 및 상대습도의 상관 계수가 보정 전에 비하여 다소 떨어지는 것으로 나타난 것을 알 수 있다.

식물의 증산에 많은 영향을 미치는 것으로 알려진 풍속(r=-0.1029)은 상관성이 매우 낮은 것으로 나타났는데, 이러한 현상은 비교적 토양수분의 공급이 원활할 경우에는 형성층 전기저항이 증산량의 영향을 적게 받고 있다는 것을 나타내 주고 있다.

온도 보정된 형성층 전기저항은 광도(r=-0.6022)와 높은 부의 상관을 보이고 있는데, 광도의 영향을 받고 있는 동안은 공중 습도의 영향도 함께 받고 있으므로, 이러한 영향을 배제

하기 위해서는 일몰 후 광도의 영향을 받지 않는 동안 공중습도의 영향을 분석한 후 광도의 영향을 고려할 필요가 있다.

온도 보정된 형성층 전기저항과 토양수분과의 상관관계( $r = -0.4375$ )는 보정 전( $r = -0.3821$ )에 비하여 더 높게 나타났는데, 토양수분과 온도와의 상관관계가 낮았기 때문이고, 온도 보정에 의하여 토양수분의 영향이 좀 더 명확하게 나타났다는 것을 알 수 있다. 또한, 형성층 전기저항과 토양수분과의 상관관계가 다른 환경 요인에 비하여 낮게 나타난 것은 토양수분의 일변화가 다른 환경 요인에 비하여 변동 폭이 작았기 때문인 것으로 판단된다.

하태주(2000)는 형성층 전기저항은 온도와 밀접한 상관성을 가지고 있고 습도와는 상관성을 보여 주지 않았다고 하였으나, 대기 중의 순수증기량을 나타내는 수증기압은 온도의 영향을 적게 받으므로 수증기압과 형성층 전기저항과의 상관관계를 분석해 볼 필요가 있다.

## 2. 습도가 형성층 전기저항에 미치는 영향

형성층 전기저항은 형성층 내의 수액에 포함된 수분량의 영향을 많이 받기 때문에 공기 중의 수증기 절대량과의 상관관계가 높을 것으로 예상되므로, 수증기압과 형성층 전기저항과의 상관관계를 분석하고자 하였다.

### 1) 상대 습도와 수증기압과의 관계

식 3을 이용하여 상대습도가 측정된 시점의 온도에 대한 포화수증기압을 구한 다음, 식 4를 이용하여 수증기압으로 변환하였다.

$$e^*(Ta) = 6.1078 \times 10^{(7.5 \times Ta) / (237.3 + Ta)} \quad (\text{식 3})$$

$e^*(Ta)$ : 포화수증기압,  $Ta$ : 온도(°C),

$$e = \frac{e^*(Ta) \times RH}{100} \quad (\text{식 4})$$

수증기압:  $e$ (hPa),  $RH$ : 상대습도(%)

상대습도를 수증기압으로 변환하여 그림 9에 상대습도와 수증기압의 일변화를 나타내었다. 온도의 영향을 많이 받는 상대습도에 비하여 공중의 수증기량을 나타내는 수증기압은 완만하게 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

### 2) 수증기압과 형성층 전기저항과의 관계

형성층 전기저항과 수증기압의 일변화는 그림 10에 나타내었다. 수증기압이 높아지면 형성층 전기저항은 낮아지는 것으로 나타나고 있으며, 수증기압의 변화보다 1시간 정도 늦게 형성층 전기저항이 변화되고 있는 것으로 나타나 수증기압의 변

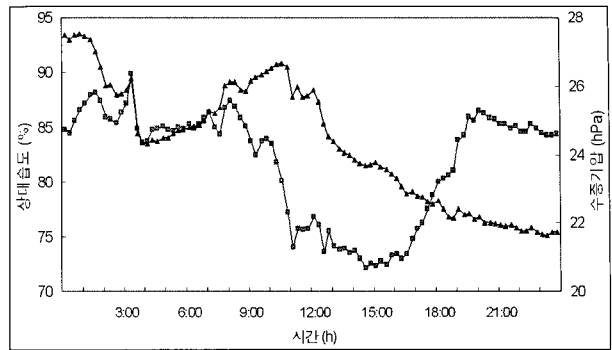


그림 9. 상대습도와 수증기압과의 관계  
 범례: ■: 상대습도 ▲: 수증기압

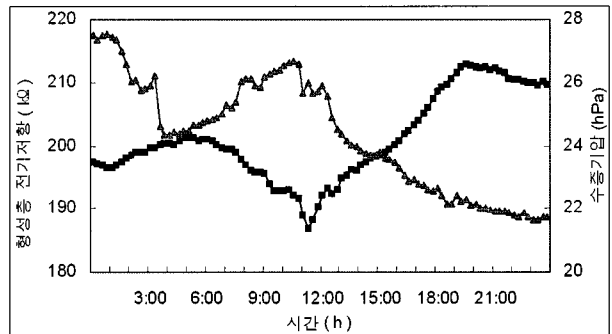


그림 10. 형성층 전기저항과 수증기압과의 관계  
 범례: ■: 형성층 전기저항 ▲: 수증기압

화에 대한 형성층 전기저항의 변화는 약간의 지연 효과를 가지고 있는 것으로 나타났다.

형성층 전기저항과 수증기압( $r = -0.8365$ )은 높은 부의 상관관계를 나타내는데 비하여 상대습도( $r = 0.3225$ )는 정의 상관관계를 나타내고 있는 것으로 나타났다(표 3 참조). 이러한 현상은 형성층 전기저항이 공중의 수증기량에 직접적인 영향을 받는 것에 비해, 온도의 영향을 많이 받는 상대습도는 온도가 높을 때 상대습도가 낮게 나타나고, 온도가 높을 때는 형성층 전기저항이 낮게 나타나기 때문에 정의 상관관계를 나타내고 있는 것으로 분석된다. 따라서 형성층 전기저항은 상대습도보다는 수증기압의 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

표 3. 수증기압과 형성층 전기저항과의 상관관계

	온도 보정 C.E.R.*	상대습도	수증기압
온도 보정 C.E.R.*	1		
상대습도	0.3225	1	
수증기압	-0.8365	0.1670	1

\*: C.E.R.: Cambial Electrical Resistance

3) 일몰 후 수증기압의 영향

광도가 영향을 미치고 있는 주간에는 형성층 전기저항이 수증기압과 광도의 영향을 동시에 받게 되므로 이를 분리하여 분석할 필요가 있다. 일몰 후에는 광도의 영향을 받지 않으므로 일몰 후의 수증기압과 형성층 전기저항과의 관계를 분석하고, 광도의 영향을 받는 주간에 형성층 전기저항에서 수증기압의 영향을 배제하면 광도가 형성층 전기저항에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

표 4에 의하면 일몰 후의 수증기압( $r = -0.9268$ )은 주간 수증기압( $r = -0.8365$ )에 비하여 보다 높은 형성층 전기저항과의 상관성을 나타내고 있어 광도의 영향이 배제된 일몰 후의 형성층 전기저항은 수증기압의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다.

수증기압의 영향을 배제한 광도의 영향을 분석하기 위하여, 일몰 후의 수증기압과 형성층 전기저항과의 회귀분석을 하였고, 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 회귀분석 결과를 바탕으로 습도 보정계수를  $k = -2.7271$ 로 하였다.

$$R = R_1 + 2.7271 \times (h_1 - h_2) \quad (\text{식 5})$$

R: 습도 보정 저항,  $R_1$ : 측정저항,  $h_1$ : 수증기압,  $h_2$ : 일중 평균수증기압

3. 광도가 형성층 전기저항에 미치는 영향

1) 온습도 보정 후 광도가 형성층 전기저항에 미치는 영향  
 습도 보정계수( $k = -2.7271$ )와 식 5를 이용하여 보정한 형성층 전기저항과 광도와의 상관분석을 한 결과를 표 5에 나타내

표 4. 일몰 후 수증기압과 C.E.R.과의 상관관계

	온도 보정 C.E.R.*	일몰 후 수증기압
온도 보정 C.E.R.	1	
일몰 후 수증기압	-0.9268	1

\*: C.E.R.: Cambial Electrical Resistance

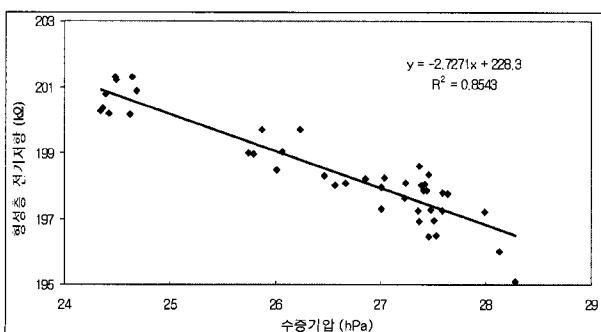


그림 11. 형성층 전기저항과 일몰 후 수증기압과의 회귀분석

표 5. 온습도 보정 후 광도와 형성층 전기저항과의 상관분석

	온습도 보정 C.E.R.*	광도
온습도 보정 C.E.R.*	1	
광도	-0.7381	1

\*: C.E.R.: Cambial Electrical Resistance.

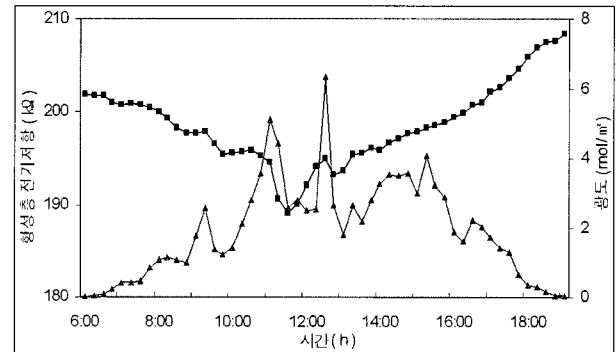


그림 12. 광도와 형성층 전기저항과의 관계

법례: ■: 형성층 전기저항 ▲: 광도

었다. 습도보정 전( $r = -0.6022$ )보다 보정 후( $r = -0.7381$ )가 상관성이 더욱 높아진 것을 알 수 있다. 광도의 측정치는 구름 등의 영향으로 그 편차가 심한 측정치라는 것을 감안할 때, 상관계수 0.7381라는 것은 광도가 형성층 전기저항의 변화에 많은 영향을 미치고 있다는 것을 나타내고 있다.

온·습도로 보정한 형성층 전기저항과 광도와의 관계를 그림 12에 나타내었다. 광도가 높아지는 시점에 비하여 형성층 전기저항이 낮아지는 시점은 15분에서 30분 정도 늦게 나타난다는 것과 광도의 변화는 기복이 많은 데 비하여 형성층 전기저항의 변화는 서서히 일어나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 광도가 형성층 전기저항의 변화에 직접적인 영향을 미치고 있다기보다는 간접적인 영향을 미치고 있다는 것을 나타내고 있다.

4. 토양 수분이 형성층 전기저항에 미치는 영향

1) 일중(日中) 토양수분의 변화와 형성층 전기저항의 변화  
 토양수분의 변화와 형성층 전기저항과의 관계(그림 13 참조)는 오전 중에는 토양 수분 포텐셜이 감소함에도 불구하고 형성층 전기저항이 감소하고 있는 것으로 나타나고 있으며, 오후에는 토양 수분 포텐셜의 변화와는 무관하게 형성층 전기저항이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 일중의 형성층 전기저항은 토양수분보다는 다른 외부 환경요인의 영향을 더 많이 받고 있는 것으로 보인다.

일반적으로 토양 수분 포텐셜이 저하하면 형성층 전기저항

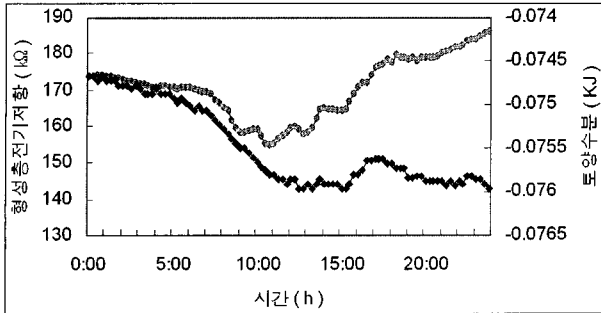


그림 13. 일중 토양수분의 변화와 형성층 전기저항과의 관계  
 범례: ●: 형성층 전기저항 ◆: 토양수분 퍼텐셜

은 증가할 것으로 예상되지만, 토양 수분 퍼텐셜의 일중 변화는 미미하고 장기적으로 서서히 변화가 일어난다는 점을 감안할 때 토양수분이 형성층 전기저항에 미치는 영향은 장기적인 관측을 할 필요가 있다.

2) 장기적인 토양수분 변화의 영향

8일간의 토양 수분 퍼텐셜의 변화와 형성층 전기저항의 변화 결과를 그림 14에 나타내었다. 형성층 전기저항과 토양 수분퍼텐셜의 상관관계는  $r = -0.8301$ 으로 높은 부의 상관관계를 나타내었다(표 6 참조). 이는 온도, 습도, 광도 등과 같은 외부 환경요인은 매일 반복되는 변화치 인데 비하여, 형성층 전기저항의 장기적인 변화는 토양 수분 퍼텐셜의 영향을 받게 된다는 사실을 나타내고 있다.

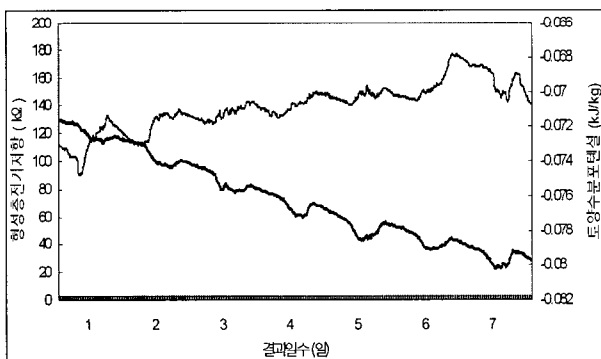


그림 14. 장기적 토양 수분의 변화와 형성층 전기저항과의 관계  
 범례: ●: 형성층 전기저항 ◆: 토양 수분 퍼텐셜

표 6. 장기적인 토양 수분 변화와 형성층 전기저항과의 상관관계

	C.E.R.*	토양수분변화
C.E.R.*	1	
토양수분변화	-0.8301	1

\*: C.E.R.: Cambial Electrical Resistance

IV. 결론

본 연구는 토양수분, 광도, 온도, 습도 등의 환경요인이 형성층 전기저항의 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다. 형성층 전기저항에 대한 기존의 측정법을 개선하기 위하여 교류 전원이 차단된 Data logger를 이용하여 고정점에 대한 연속측정을 실시하고, 측정치의 변화에 영향을 미친 환경요인과의 관계를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 형성층 전기저항은 측정 부위의 온도와 높은 상관성( $r = -0.934$ ) 나타냈다. 따라서 타 환경요인이 형성층 전기저항 변화에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 측정치에 대한 온도 보정이 필요한 것으로 나타났다.
2. 온도보정 후의 형성층 전기저항 변화는 수증기압과의 상관성( $r = -0.836$ )이 높게 나타났다.
3. 온·습도 보정 후 형성층 전기저항 변화는 광도와 높은 상관성( $r = -0.738$ )을 나타내었다.
4. 토양 수분 퍼텐셜의 일변화(日變化)는 형성층 전기저항의 변화에 비해 미미하게 나타나지만 장기적인 토양 수분 퍼텐셜과 형성층 전기저항의 변화는 높은 상관관계( $r = -0.831$ )를 나타내고 있어 형성층 전기저항의 장기적인 변화는 토양수분의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다.
5. 형성층 전기저항 측정치의 활용도를 높이기 위해서는 향후 온도의 영향을 상쇄시키거나 식물을 절단하지 않고도 온도 보정을 할 수 있는 방안이 강구되어야 할 것이다.

형성층 전기저항의 측정 목적은 스트레스에 대한 수목의 반응 정도를 간접적으로 알아내고자 하는 데에 많은 비중을 두고 있다. 본 연구의 결과, 얻어진 환경요인과 형성층 전기저항 변화에 대한 분석 자료는 전기저항을 통하여 수목 내부의 생리적 변화를 간접적으로 알고자 하는 연구에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

인용문헌

1. 김민수(1995) 목본식물의 형성층 전기저항에 의한 영구위조점 예측에 관한 연구. 한국조경학회지 22(4): 75-80.
2. 문경만(2000) 실용전기화학. 효성출판사.
3. 하태주(2000) 조경수목의 형성층 전기저항과 광합성 량의 측정으로 본 수목의 활력에 관한 연구. 상명대학교 석사학위 논문.
4. 하태주, 마용우(2001) 조경수목의 조경수목의 외적 스트레스에 의한 형성층 전기저항의 변화에 관한 연구. 상명대학교 대학원 상명논집8권 pp. 365-374.
5. Blanchard, R. O., W. C. Shortle and W. Davis(1983) Mechanism relating cambial electrical resistance to periodic growth rate of balsam fir. Can. J. For. Res. 13: 472-480.
6. Dixon, M. A., R. G. Thompson and D. S. Fensom(1977) Electrical resistance measurement of water potential in avocado and white spruce. Can. J. For. Res. 8: 73-80.
7. Gagnon, R. R., E. Bauce and M. Pineau(1987) Relation between air water potential and cambial electrical resistance of balsam fir and



- white spruce after budbreak. Can. J. For. Res. 17: 105-108.
8. McCullough, D. G. and M. R. Wagner(1987) Evaluation of four techniques to asses vigor of water-stressed ponderosa pine. Can. J. For. Res. 17: 138-145.
  9. Piene, H., D. S. Fensom, J. E. Mcisaac, R. G Thompson and K. G. Alexanrer(1984) Electrical resistance and capacitance measurements on young, spaced and unspaced, defoliated and protectd, balsam fir trees. Can. J. For. Res. 14: 811-817.
  10. Shigo, A. L.(1991) Modern Arboriculture. Shigo and Trees Assoc. Durham, New Hampshire. p. 424.
  11. Shortle, W. S., A. L. Shigo, P. Berry and J. Abusamra(1977) Electrical resistance in tree cambium zone: relationship to rates of growth and wound closure. For Sci. 23: 326-329.
  12. Wargo, P. M. and H. R. Skutt(1975) Resistance to pulsed electric current: an indicator of in forest trees. Can. J. For. Res. 5:557-561.

---

원 고 접 수: 2007년 6월 8일  
 최종수정본 접수: 2007년 8월 1일  
 3 인 의 명 심 사 필