

# 木材内 電氣傳導의 理論과 影響因子\*1

장 호 양\*2

## Theories and Affecting Factors of Electrical Conduction in Wood\*1

Ho Yang Kang\*2

### 1. 序 論

목재의 전기적 성질은 함수율과 밀접한 관계가 있어 이를 이용하여 목재의 함수율을 쉽게 잴 수 있다. 대부분의 휴대용 水分計는 이러한 원리를 이용한 것으로 전기저항식(electrical resistance type), 전기축전식(capacitance type), 고주파 전력손실식(radio-frequency power loss type)의 세가지가 보편적으로 쓰인다 (James, 1963). 그 중 전기저항식이 사용하기 편리하고 水分計의 사용범위내 (함수율 6~30%)에서 비교적 정확하기 때문에 많이 쓰인다. 그러나 전기저항식 水分計는 섬유포화점 이상과 함수율 6~7% 이하에서는 부정확하다는 것이 단점이다. 그 이유는 자유수가 존재하는 섬유포화점 이상에서는 전기저항이 매우 작고, 아주 낮은 함수율에서는 전기저항이 너무 크기 때문에 전기저항 측정에 큰 오차가 발생하기 때문이다.

전기저항식 水分計의 원리는 일반적인 전기저항 측정계와 마찬가지로 목재의 두점 사이의 전기저항을 재는 것인데, 단지 전기저항 측정계와 다른 점은 그 전 저항 값을 함수율과의 관계식을 이용하여 우리가 직접 함수율로 읽을 수 있게 나타내 주는 것 뿐이다.

이 글에서는 목재내에 전기가 어떻게 이동하는가를 지금까지 발표된 전기전도 모델을 이용하여 알아보고 어떤 인자들이 목재내 전기전도에 영향을 주는가를 조사한다. 이 글 중의 전기저항 값은 저항(resistance)

단위  $\Omega$  이 아닌 저항율(resistivity)단위  $\Omega - cm$ 로 쓰였다. 저항율은 단위길이 사이의 저항을 뜻한다.

### 2. 목재내 전기전도모델

목재내 전기전도 (또는 전기저항)의 원리를 밝히기 위한 모델들이 고체물리(solid state physics)나 전기화학(electrochemistry) 분야의 이론을 이용하여 만들어졌다. 그러나 목재는 고체물리나 전기화학 연구에 사용되는 물질과 차이가 있어 그 이론들을 직접 목재에 적용하는데는 문제가 있다. 목재는 금속이나 반도체물질과는 달리 不均一性(inhomogeneity), 非結晶性(amorphism), 異方性(anisotropy) 그리고 吸濕性(hygroscopicity)을 가지고있기 때문이다.

목재내 전기전도는 導體와 같이 전자의 이동에 의한 것이 아니라 이온의 이동에 의한 것이라는 이론이 일반적으로 받아들여지고 있다. 목재내 이온 이동은 대체로 다음의 세단계로 구분할 수 있다:

- 1) 목재구조내 추출물등에 존재하는 전기적으로 불안정한 전해질이 이온으로 解離된다, 2) 解離된 이온은 解離된 지점에서 충분한 에너지를 받아 자유이온으로 변한다, 3) 자유이온은 電極을 향해 이동하는데 이 이동속도는 전류장의 세기와 매질의 점성에 영향을 받는다.

\*1. 接受 1989年 11月 1日, Received November 1, 1989

\*2. 忠南대학교 농과대학 Chung-Nam National University, Daejeon 305-764.

2.1. Clark - William 모델

Clark과 William (1933)은 목재내 전기전도는 전 자이동이 아닌 이온이동에 의해서 일어난다고 처음으로 주장한 사람 중에 하나이다. 이들의 전기전도 모델은 다음과 같다. 목재내에는 목재구조 표면에 붙어 있는 吸着이온(bound ion)과 전류장의 영향에 따라 움직이는 自由이온 (free ion)의 두종류가 존재하는데 自由이온의 수 대 吸着이온의 수의 비는 일정한 온도에서는 항상 일정하고 온도가 올라감에 따라 自由이온의 수가 증가한다. 또 吸着이온은 전기전도에 영향을 주지못하고 전기전도율은 自由이온의 수에 비례하기 때문에 온도가 증가하면 당연히 전도율도 증가한다.

일정한온도에서 自由이온의 수와 吸着이온의 수 사이에 평형이 존재하는 것을 식으로 표시하면 식<1>이 되는데 吸着이온은 전기전도에 영향을 미치지 않기 때문에 상수라고 가정하면 식<2>가 된다.

I<sub>f</sub> / I<sub>b</sub> = k ..... (1)

I<sub>f</sub> = I<sub>b</sub> x k = K ..... (2)

- I<sub>f</sub>: 自由이온의 수
I<sub>b</sub>: 吸着이온의 수
k : 상수
K : 평형상수

식[2]에서 自由이온의 수, I<sub>f</sub>는 전기전도율에 비례하므로 평형상수 K도 전기전도율에 비례한다. 평형상수와 온도의 관계를 나타내는 일반식 (Clausius - Clapeyron 식)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

d lnk / dT = ΔH / R T² ..... (3)

- ΔH : 活性化에너지 (cal)
T : 절대온도 (K)
R : 이상기체상수 (1.9872 cal/mole)

식[3]에서 ΔH가 상수라고 가정하고 적분하면 식 [4]를 얻을 수 있다.

ln K = ΔH / RT + C ..... (4)

C : 상수

몇개의 온도 수준에서 평형상수 (즉 전기전도율)를 알면 식[4]를 이용하여 活性化에너지 ΔH를 구할 수 있다. 그러나 여기서 구한 ΔH는 목재내에 전류가 흐르는데 필요한 活性化에너지라기 보다는 自由화 에너지 즉 1 mole의 吸着이온을 1 mole의 自由이온으로 만드는데 필요한 에너지라고 할 수 있다.

2.2. Hearle의 모델

또 다른 전기전도 모델은 Hearle(1953)이 섬유에 적용하여 만들었는데 이 모델을 Brown 등 (1963)이 목재에 적용시켰다. Brown 등 (1963)이 적용시킨 모델에서는 목재내 전기전도율에 영향을 미치는 요인을 두가지로 보았다. 목재내에 존재하고 있던 전해질의 解離도와 이온의 流動性 (mobility) 즉 이온이 얼마나 빨리 움직일 수 있는냐 하는 것이다. 이것을 식으로 표시하면 아래와 같다.

K = c x d x u x f ..... (5)

- K : 전기전도율
c : 전해질의 농도 (g/cm³)
d : 전해질의 解離度
u : 이온의 流動性 (cm/sec/V/cm)
f : Faraday (1 mole 전자의 전하, =9648 C/mole)

전기전도율에 영향하는 위의 네요소 중에 전해질의 농도 c는 온도나 함수율에 거의 영향을 받지 않고 Faraday F는 상수이므로 나머지 두요소, 전해질의 解離度 d나 이온의 流動性 u 중의 하나 또는 둘다 온도나 함수율에 영향을 크게 받는다고 추측할 수 있다. Hearle은 전해질의 解離도와 이온의 流動性 중에 전해질의 解離도가 전기전도율에 더 큰 영향을 미친다고 보았는데 그 이유는 전기전도율은 온도나 함수율의 작은 변화에도 큰 차이를 나타내는데 비해 같은 변화에 대해 이온의 流動性은 그리 크게 변하지 않으나 전해질의 解離도는 크게 변하기 때문이다.

2.3. Lin의 모델

Lin(1965)은 순수하게 목재를 이용한 실험을 통하여 전기전도모델을 만들었다. 그의 모델은 4가지 가정에 바탕을 두고 있다. 첫째, 다른 연구자의 주장과 마찬가지로 목재내 전류는 이온에 의해 운반되는데 이온은 원래 존재하는 목재내 회분(ash)이나 목재를 구성하는 고분자가 근원지가 된다. 둘째, 최초에 이온은 목재세포벽의 이온 吸着点(ion-generating site)에 가장 낮은 에너지상태로 붙어 있다. 셋째, 이온 吸着点에 있는 이온은 충분한 에너지를 흡수하여 解離를 하는데 이때 필요한 에너지를 解離에너지(dissociation energy)라 한다. 넷째, 解離된 이온은 한 이온 吸着点에서 다른 이온 吸着点으로 이동을 하는데 이때 필요한 에너지를 이동에너지(energy of mobility)라 한다.

위의 가정에 근거한 Lin의 모델을 식으로 표시하면 아래와 같다.

$$K = n \times u \times e \dots \dots \dots (6)$$

- K : 전기전도율
- n : 단위부피당 이온수
- e : 1 전자의 전하 (= 1.602×10<sup>-19</sup> C)
- u : 이온의 流動性 (cm/sec/V/cm)

단위부피당 이온수 n 은 Hearle의 모델에서는 전해질의 농도 c 와 解離度 d 에 의해서 구해질 수 있으므로 Lin의 모델은 거의 Hearle의 모델과 같다고 할 수 있다. 그러나 Lin의 모델과 앞의 두 모델의 차이는 앞의 두모델에서는 전해질의 解離度가 전기전도에 큰 역할을 한다고 본 반면 Lin의 모델에서는 전해질의 解離度와 이온의 流動性的의 중요도를 같은 비율로 보았다. 그리하여 Lin (1965)은 많은 실험 후에 함수율 0-20% 범위에서는 解離된 이온의 숫자가 전기전도율에 큰 영향을 미치나 함수율이 높을 때는 이온의 解離度는 충분히 크기 때문에 이온의 流動性에 따라 전기전도율이 좌우된다고 결론을 맺었다.

3. 목재전기저항의 영향인자

3.1. 함수율

Stamm(1927)이 목재의 전기저항을 함수율 측정에 이용할 수 있다고 밝힌 이후 목재내 전기전도에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다 (Clark and William, 1933 ; Lin, 1965). 대략적으로 목재의 전기저항율은 실내온도 일때 섬유포화점에서 10<sup>4</sup>-10<sup>3</sup>Ω-cm 이던 것이 全乾되었을 때는 10<sup>17</sup>-10<sup>18</sup> Ω-cm 로 늘어난다 (Brown et al., 1963). 목재의 저항율의 대수 (Log r)와 함수율의 대수 (Log M) 사이에는 대략 직선 관계가 있다 (James, 1963). 목재의 저항율과 함수율의 관계식은 보통 실험에 의해 구하는데 아래의 Simens 와 Halle 식은 15 °C에서 유럽 수종을 이용하여 얻은 것이다 (Keylwerth and Noack, 1956).

$$\text{Log (Log r-4)} = -0.0322 M + 1.009 \dots \dots (7)$$

r = 전기저항율 (Ω-cm)  
M = 함수율 (%)

식 [7]은 비교적 정확하여 Douglas-fir의 실험 자료 (James, 1963)와도 잘 일치한다.

그러나 저항율과 함수율의 관계가 모든 함수율 범위에서 식 [7]을 만족하지 않는다. 저항율과 함수율의 관계는 함수율 범위에 따라 섬유포화점이상, 섬유포화점에서 함수율 6-8% 까지, 함수율 6-8% 이하의 세가지 범위로 나눌 수 있다(Brown et al., 1963). 섬유포화점 이상에서는 함수율에 따른 저항율의 차이가 거의 없으나 섬유포화점에서 함수율 6-8%까지는 함수율에 따른 저항율의 변화가 뚜렷하다. 섬유포화점에서 함수율 6-8% 범위에서 저항율과 함수율의 관계는 직선은 아니지만 James (1963)가 밝힌 것과 같이 저항율의 대수 (Log r)와 함수율의 대수 (Log M)의 관계는 직선적이다. 그러나 함수율 6-8% 이하에서 Log r은 함수율 M이 감소함에 따라 全乾때까지 직선적으로 증가한다.

3.2. 온도

함수율을 제외하고 목재의 전기저항에 가장 크게 영향을 미치는 것은 온도이다. 목재 전기저항율의 대수 (Log r)와 절대온도의 역수 (1/T)사이에는 직선관계가 존재한다 (Clark and William, 1933 ;

Murphy et al., 1937 ; Davidson, 1958). 이러한 직선관계는 목재내 전류의 흐름이 온도의 영향을 크게 받는 활성화진행 (activated process)임을 나타내는 것이다.

Lin (1965)은  $-60 \sim 165$  °C 온도범위에서 목재의 저항율과 온도의 관계를 비교적 포괄적으로 연구하였다. 그의 실험결과에 의하면 전기저항율의 대수와 절대온도의 역수 사이의 관계가 함수율 10% 이상에서는 항상 직선이 아니고 온도가 증가함에 따라 저항율이 예상한 것 만큼 낮아지지 않았는데 그 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다 (Lin (1965)의 그림 6~12 참조)

목재의 온도가 1 °C 증가하면 섬유포화점이 0.1% 씩 떨어지는 원인 (Stamm and Loughborough, 1956)과 마찬가지로 목재의 온도가 증가하여 결합수의 활동이 활발해 지면 세포벽을 구성하는 분자들이 물분자를 더이상 잡고 있지 못하게 되어 물분자는 세포벽을 뚫고 나와 세포내강에 응축하여 자유수가 된다. 자유수는 결합수보다 전기전도율이 높으나 이 경우 세포내강에 응축된 자유수는 불연속적이기 때문에 전기전도에 아무 도움이 되지 못한다. 따라서 전체적으로 전기전도에 이용되는 수분의 양은 온도가 증가함에 따라 줄어들게 되고 그에 비례하여 전기를 운반하는 자유이온의 수도 감소한다.

또 Lin의 실험결과를 가지고 전기전도의 활성화에너지를 구해보면 높은 온도범위에서 구한 활성화에너지가 낮은 온도범위에서 구한 활성화에너지보다 적은 것을 알 수 있다. 이는 온도가 올라가면 목재를 구성하는 분자들이 열팽창하여 분자간의 간격이 커지기 때문에 자유이온들이 한 이온 吸着点에서 다른 이온 吸着点으로 적은 활성화에너지를 갖고도 쉽게 이동할 수 있기 때문이라고 설명할 수 있다.

### 3.3. Evershed 효과

사용하는 전기의 전압에 따라서 목재의 전기저항 측정값이 달라지는 현상을 Evershed 효과 라고하는데 높은 전압을 사용할 수록 측정된 전기저항은 줄어든다. Skaar (1964)는 1~100볼트 범위의 직류 전기저항율을 조사한 결과, 10볼트이하의 직류에서는

Evershed 효과가 뚜렷하지만 60 헤르쯔의 교류에서는 거의 나타나지 않는다고 발표하였다.

Evershed 효과가 어떻게 일어나는가에 대해서 아직 정확하게 밝혀지지 않았으나, 대략 다음과 같이 유추해 볼 수 있다. 전기전도모델에서 언급한 바와 같이 전기전도에 영향을 주는 인자는 크게 전해질의 解離度와 이온의 流動性의 두가지로 볼 수 있다. 그중 解離度는 온도의 영향을 받지만 전류장의 세기에는 영향을 받지않는 것이 확실하므로 이온의 流動性이 Evershed 효과와 관계가 있으리라고 짐작할 수 있다. 이온의 이동속도는 전류장의 세기에 비례하므로 (Atkins, 1982) 전류장의 세기가 증가할 수록 전기저항률은 감소한다.

그러나 전류장의 세기가 증가하다고 무한정 전기저항율이 감소하는 것이 아니고 오히려 높은 전압에서는 Evershed 효과를 무시할 정도라는 것이 많은 연구자들 (Brown et al., 1963 ; Skaar, 1964 ; Lin 1965와 1967)에 의해 밝혀졌다. 따라서 Evershed 효과에 대해 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다. Evershed 효과는 이온의 流動性이 전류장의 세기에 비례하기 때문에 나타나는데 전기전도율을 이온의 流動性이 좌우하는데는 어느 한계점이 있어 이 한계점을 넘어서면 이온의 流動性이 너무크기 때문에 전기전도율은 전해질의 解離度에 의해 좌우된다.

### 3.4. 측정방향

섬유방향의 저항율은 섬유직각방향보다 확실히 작다. 그이유는 목재내 cellulose의 주행방향이 섬유방향과 비슷하여 cellulose의 수산기는 섬유직각방향보다 섬유방향으로 움직임이 자유롭기 때문이다 (Yavorsky, 1951). 섬유방향으로 늘어선 cellulose의 수산기와 그곳에 붙어있는 물분자들이 이온이 섬유방향으로 움직이는 것을 도와준다고 볼 수 있다.

같은 섬유직각방향이라도 접선방향과 방사방향의 저항율은 차이를 나타낸다. Stamm (1964)은 8종의 미국산수종을 이용하여 섬유방향에 대한 접선방향과 방사방향의 저항율비가 각각 1.86과 1.68인 것과 함수율 10~15% 사이에서 저항율은 24배가 변하는데 비해 측정방향사이의 저항율비는 변화가 없음을 발

전하고 접선방향과 방사방향사이의 저항율차이는 목재의 해부학적 구조차이에서 온다고 주장하였다. 즉 방사조직은 방사방향으로 길게 늘어나 있기 때문에 방사방향의 전기전도를 원활하게 하나 막공은 대부분 경사단면에 위치하여 경사단면에 많은 공극을 만들기 때문에 접선방향의 전기전도를 방해한다. 위의 원인외에 침엽수에 있어서 세포들이 방사방향으로는 정렬하여 있지만 접선방향으로 정렬하여 있지 못한 것도 접선방향의 전기저항율이 높은 원인의 하나가 된다 (Hart, 1964).

### 3.5. 비중

목재의 비중이 증가하면 단위부피당 세포벽이 차지하는 비율이 커져서 두 電極사이통로의 단면적이 넓어지기 때문에 이론적으로 전기저항율이 감소한다. 그러나 실제로 측정을 해보면 비중에 따른 차이가 별로 나타나지 않는다. 한수종내에는 비중차이는 크지 않기 때문에 비중에 따른 저항율차이가 없다고 하더라도 다른 수종들 사이에는 비중차이가 크기 때문에 저항율의 큰 차이를 보일 수 있으나 이온의 농도와 流動性의 차이가 더 큰변수로 작용하기 때문에 비중의 영향은 무시될 수 있다 (Beall, 1979).

실제로 측정해 보면 전기저항율은 비중과 무관하다는 사실은 Skaar (1964)의 실험결과에 의해 더욱 뒷받침 될 수 있다. 그는 두 電極사이의 각지점에서 저항을 재서 전체저항의 50%가 電極사이거리의 1/4 내에 존재하고 電極사이거리를 2배로 늘리더라도 저항은 25% 밖에 증가하지 않는다는 것을 밝혀내었다. 즉 전기저항은 대부분 電極주위에 몰려있기 때문에 실질적으로 저항율은 비중과 무관하다고 할 수 있다.

### 3.6. 수종

같은 함수율에서도 목재의 저항율이 수종마다 다른 이유는 아직 확실하게 밝혀지지 않았지만 그 중 하나는 추출물의 종류와 양이 수종마다 다르기 때문이다. 서로 다른 추출물의 종류와 양은 이온의 농도와 流動性의 차이를 나타낸다. 그 때문에 저항식 水分

計는 보통 비슷한 저항율을 가지는 수종끼리 묶어 몇개의 그룹으로 나누어 그룹별 補正표를 만들어 수종에 따라 補正하도록 되었다.

### 3.7. 기타

직류를 사용할 경우에 발생하는 문제로, 발열효과 (ohmic heat effect)와 분극효과 (polarization effect)가 있는데 이 두효과는 서로 상반된 결과를 나타낸다. 직류를 통하게 되면 시간이 경과함에 따라 電極주위에 열이 발생하여 전기전도를 촉진시키나 동시에 반대극성을 갖는 이온들이 電極주위에 모여들어 전기전도를 방해한다. Skaar (1964)는 red oak를 이용한 실험에서 이 두효과가 어떻게 나타나는지 그림을 통하여 자세히 설명하였다 (Skaar (1964)의 그림 1 참조). 목재의 온도는 초기에 발열효과에 의해 증가하고 이에따라 저항율은 감소하나 약 10분 후에는 분극효과가 발열효과를 능가하므로써 온도는 감소하고 저항은 점차 증가하게 된다. 발열효과와 분극효과를 배제하고 정확한 저항율을 재기 위해서는 전기를 통한 뒤 빠른 시간안에 저항율을 재어야 하고 분극효과는 교류전류를 사용하므로써 줄일 수 있다.

그 밖에 壓電氣 (piezoelectricity) 즉 물리적인 변형에 의해 발생하는 전기도 감안해 주어야 한다. 발생하는 전기량은 적으나 목재내에 침투된 電極이 주위의 목재세포들에 의해 압축을 받으므로 생길 수 있다.

## 4. 결론

목재의 두가지 전기적성질 — 電氣抵抗과 電氣誘電 — 중에 전기저항적 성질에 관해서 목재내 전기전도의 이론과 전도율에 영향하는 인자를 알아보았다. 전기저항식 水分計를 많이 쓰고 있으면서도 水分計의 정확도에 대해서 의문을 가질 때가 많이 있다. 특히 水分計의 바늘이 不安定할 때 그런 의문을 갖게된다. 이런 경우 위에 열거한 여러 영향인자를 생각해보고 이에 따른 補正을 해준다면 간편한 휴대용 水分計를 이용하여 정확한 함수율을 잴 수 있을 것이다. 한 예로 건조기술의 발전에 따라 건조중

시험편의 함수율을 건조실 밖으로 꺼내지 않고 젤 수 있는 방법이 많이 발달했는데 그중 많이 쓰이는 방법이 시험편에 電極을 꽂아 건조중에 저항율을 재서 함수율의 변화를 계속 조사하는 것이다. 이때 측정된 저항율은 반드시 변하는 시험편의 온도에 따라 계속적으로 補正해주어야만 올바른 함수율을 젤 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Atkins, P.W. 1982. Physical Chemistry, 2nd edition, pp. 895-897. Oxford University Press.
2. Beall, F.C. 1979. HR and MC Instrumentation in Symposium on Wood Moisture Content, Temperature and Humidity Relationships. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA.
3. Brown, J.H. et al. 1963. Mechanism of electrical conduction in wood. FPJ 13(19): pp. 455-459.
4. Clark, J.D., and J.M. Williams. 1933. The electrical conductivity of commercial dielectrics and its variation with temperature. J. Phys. Chem 17(1): pp. 119-131.
5. Davidson, R.W. 1958. The effect of temperature on the electrical resistance of wood. FPJ 8(5): pp. 160-164.
6. Hart, C.A. 1964. Theoretical effect of gross anatomy upon conductivity of wood. FPJ 14(1): 25-32.
7. Hearle, J.W.S. 1953. The electrical resistance of textile materials: IV. theory. J. Text. Inst. Trans. 44: T177-T198.
8. James, William L. 1963. Electric moisture meters for wood. U.S. Forest Serv. Res. Note FPL-08. FPL, Madison, WI. 24pp.
9. Keylwerth, R., and D. Noack. 1956. The influence of higher temperatures when electrically measuring wood moisture content according to the resistance method. Hols als Rohund Werkstoff 14(5).
10. Lin, R.T. 1965. A study on the electrical conduction on wood. FPJ 15(11): pp.506-514.
11. \_\_\_\_\_. 1967. Review of the electrical properties of wood and cellulose. FPJ 17(7): pp. 54-61.
12. Murphy, E.J., and S.O. Morgan. 1937. The dielectric properties of insulating materials. Bell System Tech. J. 16: pp. 493-512.
13. Skaar, Christen. 1964. Some factors involved in the electrical determination of moisture gradient in wood. FPJ 14(6): pp. 239-243.
14. Stamm, A.J. 1927. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. Industrial and Engineering Chemistry 19(9): pp. 1021-1025.
15. \_\_\_\_\_. 1964. Wood and Cellulose Science, pp. 395-385. Ronald Press, New York.
16. \_\_\_\_\_, and W.K. Loughborough. 1956. Thermodynamics of the swelling of wood. Forest Prod. Lab. Report No. R1215, Madison, WI.
17. Yavorsky, John M. 1951. A view of electrical properties of wood. Tech. Pub. No. 73. State Univ. of NY, Syracuse.