

수분함량예측기법을 이용한 토양 열특성 예측에 관한 연구

정성환\*, 김대경\*, 최상봉\*, 배정호\*, 하태현\*, 이현구\*, 조성배\*, 강지원\*, 곽방명\*\*, 윤형희\*\*  
 한국전기연구소\* 한국전기연구소\* 전력연구원° 한국전력공사\*

A Study on the Prediction of the Soil Thermal Property Using Predicting the Soil Moisture Contents

S.H.Jeong\* D.K.Kim\* S.B.Choi\* J.H.Bae\* T.H.Ha\* H.G.Lee\*, S.B.Cho°J.W.Kang° B.M.Kwag\* H.H.Yoon\*  
 KERI\* KERI\* KEPRI° KEPCO\*

**Abstract** - This paper address the prediction method of a soil thermal property depending on soil moisture contents and suggests the guideline to determine the soil thermal resistivity for the calculation of the cuurent carrying capacity of underground power cables in Korea.

$$T_w^{j-1} = j-1\text{번째 주 평균온도 } [^{\circ}\text{C}]$$

$$I = \sum [ T_m^k ]^{1.514} \quad (k=1, \dots, 12)$$

$$T_m^k = k\text{월째 월평균온도 } [^{\circ}\text{C}]$$

$$A = I\text{의 함수}$$

$$= 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1729 \times I^{-5} + 0.49239$$

1. 서 론

날로 증가하고 있는 도심지의 전력 수요의 공급과 지중 송전 계통의 공급 신뢰도 향상을 위한 지중송전망 구축을 위하여 계통 전압을 격상하거나 대용량 지중 전력 케이블을 포설하고 있다. 지중 전력 케이블의 전압 격상 및 대용량화는 케이블에서 발생하는 도체손실, 유전체 손실 및 시스 손실을 크게 하고, 이와 같은 손실은 열에너지 형태로 변환되어 케이블을 에워싸고 있는 토양중으로 주로 전도에 의해 외부로 전달된다. 이 과정에서 지중 전력 케이블의 송전용량은 케이블이 포설되어 있는 깊이, 케이블의 표면 온도, 토양의 온도 및 토양의 열특성에 의해 제약을 받게 된다.

특히 토양의 열특성은 토양이 함유하고 있는 수분함량에 따라서 크게 달라진다. 예를 들면, 일정한 밀도에서 알맞은 수분함량을 가진 양토의 경우 약 0.4K.m/W이지만, 완전히 건조된 점토인 경우 약 3.0K.m/W이상의 값을 가진다. 이 경우 동일 밀도로 가정할 때 전력케이블의 송전용량은 약 1.5배이상 차이가 난다.

본 논문은 지중 전력 케이블의 송전용량에 영향을 주는 토양 열특성에 대하여 토양내 수분의 함량을 예측기법을 이용하여 우리나라 6대 도시에 대하여 수분함량을 예측하고, 토양 시료를 분석하여 수분함량과 열저항률과의 관계곡선을 취득하여 현장에서 측정된 열저항률 값과 수분함량예측기법에 의해 예측한 값과 비교하여 우리나라 특정지역 토양에 대하여 표준열저항률 값을 제안하였다.

2. 토양의 수분함량예측 기법 및 예측

2.1 Thornthwaite의 수분함량예측 기법

미국의 농학자 Thornthwaite는 수분의 증발량과 증산량을 포함한 잠재증발산 (Potential Evapo trans-piration)이라는 개념을 도입하여 이 양을 계산할 수 있는 경험식을 식(2-1)과 같이 개발하였다. 이 잠재증발산량은 대기중으로 이동하는 실제 크기의 수분량을 나타내지는 않지만 토양중의 수분함량과 식물의 분포가 이상적이라는 가정하에서 일어날 수 있는 최대 수분출력을 나타낸다.

$$E_p^j = 3.73 \left[ \frac{10}{T} T_w^{j-1} \right]^A \quad (2-1)$$

여기서,  $E_p^j$  = j번째 주 잠재증발산 [mm]

식(2-1)은 1개월의 일수를 30일로 하고, 하루중의 일조시간을 12시간으로 가정한 것으로서 계절과 위도별 차이나는 일조시간과 한 달의 일수(28일 및 31일)를 고려한 보정계수를 적용하면 식(2-2)와 된다.

$$E_{cp}^j = C E_p^j \quad (2-2)$$

수분함량이 포장용수량이하로 떨어지면 증발산되는 수분의 양은 식(2-3)과 같이 수정된다.

$$E_a^j = \frac{M^{j-1}}{F_c} E_{cp}^j \quad (2-3)$$

여기서,  $E_a^j$  = j번째 주 실질증발산량 [mm]  
 $M^{j-1}$  = j-1번째 주 평형수분량 [mm]  
 $F_c$  = 토양의 포장용수량 [mm]  
 $E_{cp}^j$  = j번째 주 보정된 잠재증발산량 [mm]

따라서 j번째 주 현재 평형수분함량은 식(2-4)와 같다.

$$M^j = M^{j-1} + P^j - E_a^j \quad (2-4)$$

여기서,  $P^j$  : j번째 주 강수량 [mm]

위 식을 정리하면 Thornthwaite의 잠재증발산량을 계산하는 흐름도는 (그림 2-1)과 같다.

2.2 토양 수분함량예측 기법

Thornthwaite의 수분함량예측 기법은 일년을 단위로 하여 수분함량을 예측하는 것으로서 연간 최저 수분함량을 계산할 수 있으나 수십 혹은 수백년에 한 번 발생할 수 있는 기상이변현상은 반영할 수 없다. 그래서, 가능한 한 많은 기상자료를 활용하여 이것을 통계분석하여 기상이변 현상이 발생했을 때의 수분함량을 예측할 수 있어야 한다.

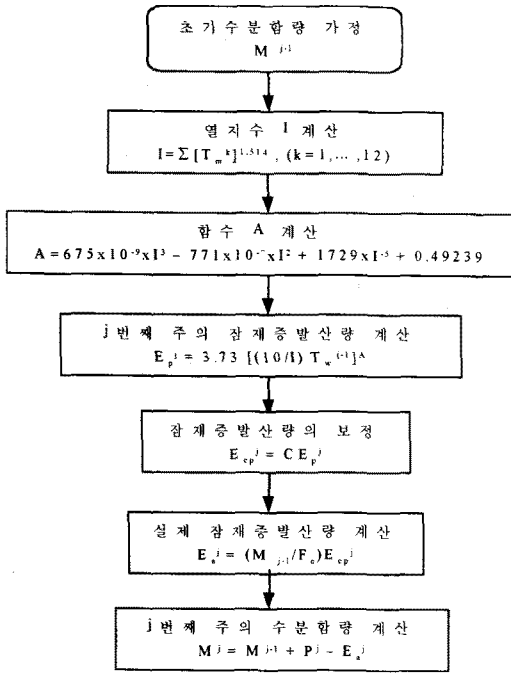
따라서 기상이변 현상과 토양 특성을 참고로 해서 종합화한 토양수분 함량예측 알고리즘은 (그림 2-2)와 같다.

3. 토양 시료의 분석과 열저항률

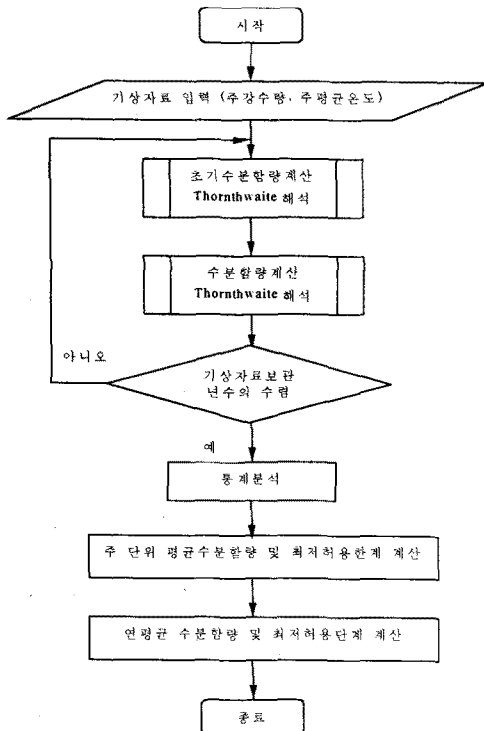
3.1 토양 시료 분석

토양 시료는 표토층(지표에서 약 30cm)을 대상으로 토양 유형별로 서울 2개소에 시료 2개, 부산의 연지 C/H에서 1개소 및 송전용 되매움재로 많이 쓰이는

강모래 시료 1개를 채취하여 입자 분석을 하였으며 분석결과는 <표 3.1>과 같다.



(그림 2-1) Thornthwaite의 잠재증발산량 계산 흐름도



(그림 2-2) 토양수분함량 예측 알고리즘

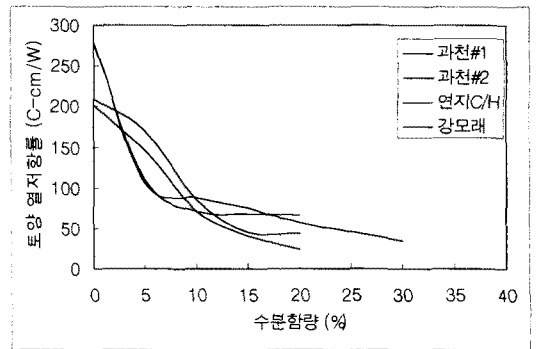
### 3.2 수분함량에 대한 토양 열저항률 곡선

<표 3.1>의 열저항률 값을 시료를 채취하기 전 혹은 시료를 채취 한 후 토양열특성분석기를 이용하여 현장에서 실측한 것이다.

<표 3.1> 입자 분석 결과

시료	심도 (0-30cm)	색	USCS	함수율 (%)	진비 중 (%)	가비 중 (%)	공극률 (%)	열저항률
과천#1	표토	적갈색	SM	6.36	2.64	1.74	34.28	87.5
과천#2	"	적갈색	ML	5.11	2.61	1.69	36.25	66.9
연지C/H	"	황갈색	CL	21.52	2.63	1.83	31.01	57.3
강모래	"	은백색	SW-SM	3.30	2.65	1.31	50.53	282.6

함수비에 따른 열저항률의 변화를 알아보기 위하여 채취한 토양 시료의 함수량 증가에 따른 열저항률의 변화를 관찰하였다. 시료에 대한 함수량의 변화에 따른 열저항률은 (그림 3.1)과 같다. 토양시료의 열저항률은 전체적으로 함수량이 증가함에 따라 감소함이 관측되었다. 그림에서 보는 바와 같이 토양의 유형과 종류에 관계없이 함수량에 따른 열저항률의 변화는 비슷한 경향을 보였는데, 함수비가 낮을수록 급격한 열저항률의 증가가 나타났으며, 함수량이 포화상태에 이르렀을 때는 열저항률의 변화가 거의 없었다. 즉, 함수율이 약 5%에 이르기까지는 급격한 감소를, 약 15%까지는 보다 완만한 감소를, 그 이상 완전히 포화상태가 될 때까지는 더욱 완만한 감소 경향을 나타내었다.



(그림 3.1) 토양 시료에 대한 열저항률 측정 결과

### 3.3 토양 수분함량 예측

우리나라 토양의 대부분이 양토 혹은 사양토이므로 수분함량계산에 있어서 포장용수량은 사양토 (19.9%)를 기준으로 토양 수분함량을 예측하였으며 그 결과는 <표 3.2>와 같다.

<표 3.2>에서 보는 바와 같이 우리나라 전체 토양의 평균수분함량은 15.58mm, 즉 7.56% (사양토 기준)이며 최저허용한계는 7.56mm, 즉 3.92%이다. 이때 계산과정에서 확률은 자료년수에 따른 Return Period (1-1/자료년수)값을 사용하였으며 신뢰도는 95%로 계산하였다.

한편, 토양의 열특성을 실측한 부산의 연지 C/H의 1개 지역과 수도권 1개 지역에 대한 포장 용수량은 각각 21.5%와 19.9%를 사용하였으며, 평균수분함량 및 최저허용한계를 각각 주단위로 계산하여 년평균 수분함량 및 최저허용한계를 계산하였다.

〈표 3.2〉 년평균 수분함량과 최저허용한계

지역명	년평균수분함량		최저허용한계		자료 년수
	mm	%	mm	%	
서울	15.20	8.07	5.62	2.98	37
(과천)*	15.40	9.00	5.63	3.29	43
부산	17.38	9.23	8.41	4.47	30
(연지)*	17.4	9.50	8.45	4.61	36
인천	13.99	7.43	6.15	3.26	39
대전	16.19	8.60	7.24	3.58	22
대구	11.95	6.34	6.22	3.30	50
광주	17.20	9.13	9.17	4.47	30
제주	17.15	9.11	10.16	5.39	50
전체	15.58	8.27	7.56	3.92	

주) \* 1999년까지 기상자료를 이용한 것임.

### 3.4 토양열저항 값 예측

#### 3.4.1 Salomone에 의한 토양열저항률 값 예측

토양의 표준 열저항률을 제시하기 위해서는 우리나라 모든 토양에 대하여 토성별로 샘플을 채취하여 이 샘플에 대하여 수분함량을 변화시켜가며 열저항률을 측정하여야 한다. 그런데 1979년 Salomone와 그 동료들이 작성한 수분함량대 열저항률 곡선으로부터 우리나라 토양의 건조밀도(가비중)와 비슷한 1.6~1.8[g/cm<sup>3</sup>]의 토양을 이용하여 <표 3.2>와 같이 예측된 수분함량에 대한 열저항률 값은 <표 3.3>과 같이 예측된다.

〈표 3.3〉 지역별 토양의 열저항률

지역명	연평균 열저항률 [°C-cm/W]	최저 허용한계 [°C-cm/W]
서울	55	80
부산	50	70
인천	60	80
대전	55	80
대구	65	80
광주	50	70
제주	50	70
전체	55	76

#### 3.4.2 연지 C/H와 과천지역의 토양열저항 값 예측

연지 C/H와 수도권 지역의 과천지역의 토양 시료를 채취하여 수분함량에 변화시켜가며 열저항률 값을 측정 한 (그림 3.1)을 이용하여 예측된 열저항률 값은 <표 3.4>와 같다.

〈표 3.4〉 연지 C/H 및 수도권 시료에 대한 열저항률

지역명	연평균 열저항률 [°C-cm/W]	최저 허용한계 [°C-cm/W]
과천	95 (42)	175 (55)
연지 C/H	83 (35)	130 (48)

\*()Salomone의 토양 건조밀도에 대한 토양의 수분함량대 열저항률

### 3.5 토양열저항 값의 실측치와의 비교

연지C/H와 수영변전소에서 실측한 열저항률 값은 <표 3.5>와 같다. <표 3.5>의 실측치는 수분함량 예측기법에 의해 예측된 <표 3.4>의 열저항률 값을 비교해 보면 연평균 열저항률 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

〈표 3.5〉 토양열특성 실측

사례	S 변전소 토양		Y C/H 토양		비고
	열저항률 [°Ccm/W]	열확산율 [cm <sup>2</sup> /s]	열저항률 [°Ccm/W]	열확산율 [cm <sup>2</sup> /s]	
1	-	-	76.1	1.183	
2	-	-	80.9	0.346	
3	-	-	88.2	0.275	
4	76.1	0.883	94.2	0.614	
5	79.2	0.583	75.5	15.320	
6	60.4	0.608	75.0	0.412	
7	70.2	0.142	63.2	0.765	
8	56.1	0.584	-	-	
9	56.8	0.187	73.7	0.079	
10	61.5	0.232	80.1	0.359	
11	63.9	1.278	76.5	0.045	
12	53.4	2.242	56.3	0.209	
13	69.4	1.735	62.6	0.034	
14			86.8	0.026	
15	63.9	1.085	58.8	0.626	
16	68.2	0.333	61.2	0.825	
17	71.0	0.141	68.5	0.384	
18			65.9	0.225	

## 4. 결 론

토양수분함량을 예측하는 알고리즘을 이용하여 우리나라 토양의 표준 열저항률 값 제시에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지역별 년평균 열저항률의 분석결과 (표 3.5)의 실측결과 (30 cm 깊이)와 잘 일치한다.

(2) <표 3.4>에서 보는 바와 같이 연평균 열저항률의 최저허용한계는 실측에 의한 것은 과천과 연지 C/H의 경우 175 [°C-cm/W]와 130[°C-cm/W]이지만 Salomone의 토양 수분함량대 열저항률 값은 각각 55 [°C-cm/W]와 48[°C-cm/W]이다. 이와 같은 차이가 나는 것은 (그림 3.1)에서 보는 바와 같이 수분함량이 7%미만일 때 정확한 열저항률 값을 측정할 수 없었기 때문인 것으로 사료된다.

(3) <표 3.5>에서 보는 바와 같이 실측한 값은 년중 변동폭이 크지 않고 측정 깊이가 30cm에서 했기 때문에 케이블이 포설되는 60cm이상에서는 일사에 의한 수분의 이동이 크기 않기 때문에 연평균 열저항률 값을 사용해도 문제가 없을 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구의 결과를 이용할 때 과천 시료에 대해서는 100[°C-cm/W]를, 연지 C/H의 시료에 대해서는 90[°C-cm/W]를 적용할 수 있음을 알 수 있다.

### 〔참 고 문 헌〕

- [1] "Underground Cable Thermal Backfill", Pergamon Press, 1982
- [2] "동적모델에 의한 지중배전선로의 열적 용량평가에 관한 연구, 한국전력공사, 1993
- [3] "송전케이블의 허용전류산정 프로그램 개발", 한국전력공사, 2000
- [4] 강지원, 조성배의 "우리나라 토양에 대한 수분함량 예측에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999