

지중송전계통의 송전용량평가를 위한 토양열특성 측정에 관한 연구

강지원[°], 조성배[°], 장태인[°], 윤희형^{*}, 김대경^{**}, 정성현^{**}, 최상봉^{**}
 전력연구원[°] 한국전력공사^{*} 한국전기연구소^{**}

A Study on the Soil Thermal Property Measurement for the Current Carrying Capacity Evaluation of Underground Transmission Power Cables

J.W.Kang[°], S.B.Cho[°], T.I.Jang[°], H.H.Yoon^{*}, D.K.Kim^{**}, S.H.Jeong^{**}, S.B.Choi^{**}
 KEPRI[°] KEPCO^{*} KERI^{**}

Abstract - This paper introduces an meanings of the soil thermal properties and an probe method to analyze the soil thermal property. And its method was applied to the soils surrounding the underground transmission power cables at S/S and C/H.

토인 경우 약 0.4[°C-m/W]이고, 완전히 건조된 점토인 경우 3.0[°C-m/W]이상의 값을 가진다. 이때 허용전류는 약 1.5배이상 차이가 난다.

즉, 전력케이블의 송전용량은 토양 열저항률에 따라 큰 영향을 받기 때문에 정확한 토양 열저항률 값의 평가는 필수적이다.

1. 서 론

급증하고 있는 도심지의 전력 수요를 공급하는 것과 지중 송전 계통의 공급 신뢰도를 향상시키기 위하여 지중 송전 계통의 전압을 154 kV에서 345 kV로 격상하거나 대용량의 지중 전력 케이블을 포설하고 있다. 이때 지중 전력 케이블은 관로 혹은 전력구 형태로 지중에 각각 포설된다. 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 토양이나 대기중으로 전도, 대류 혹은 방사의 형태로 외부로 전달된다. 이 과정에서 지중 전력 케이블의 송전용량은 케이블이 포설되어 있는 깊이, 케이블의 표면 온도, 토양의 온도 및 토양의 열특성에 의해 제약을 받게 된다.

즉, 전력케이블을 에워싸고 있는 토양이 전력케이블에서 발생한 열을 얼마나 쉽게 외부로 전달할 수 있으며, 어느 정도 신속하게 에너지를 받아들이고 전도해 주는지 혹은 어느 정도까지 열적으로 안정할 수 있는가에 대한 문제가 제기되고 있으며 이는 전압의 초고압화 추세에 따라 더욱 큰 문제가 되고 있다.

따라서 본 논문은 지중 전력 케이블의 송전용량에 영향을 주는 토양 열특성에 관한 용어를 살펴보고, 토양 열특성을 측정하는 원리 및 이 원리에 의해 만들어진 토양 열특성분석기를 이용하여 실 선로 주변 토양에 대하여 토양 열특성을 측정하고 분석한 결과를 나타내었다.

2. 본 론

토양의 열특성을 나타내는 용어는 아래와 같다.

- ① 토양 열저항률
- ② 토양 열확산율
- ③ 토양 열안정도

2.1 토양 열저항률

2.1.1 의미

토양 열저항률이란 한 변의 길이가 1[m]인 정육면체의 토양에 1[W]의 열을 흘렸을 때 정육면체 전체에 1[°C]만큼 온도를 상승시키는 토양의 특성을 말하며 단위는 °C-m/W 혹은 K-m/W이다.

2.1.2 측정의 필요성

일반적으로 토양 열저항률은 수분과 밀도가 알맞은 양

2.1.3 열저항률에 영향을 미치는 요소

토양의 열특성은 토양의 구성성분, 밀도, 수분 함량에 큰 영향을 받는다.

2.1.3.1 구성성분

토양은 기체(공기), 액체(물) 및 고체(유기물 및 무기물)로 구성되어 있는 상상의 매질이다. 각 성분의 열저항률은 광물의 경우 석영은 0.11[°C-m/W], 물은 1.65[°C-m/W] 그리고 공기는 40.0[°C-m/W]에 이르기까지 큰 차이가 있으며 유기물은 광물 성분의 약 2배 값을 갖는다. 즉, 고체 성분이 물과 공기에 비해 낮은 열저항률을 가지므로 낮은 열저항률이 요구되는 곳은 토양의 대부분을 고체 성분으로 하면 된다.

2.1.3.2 밀도

완전히 건조된 토양의 경우 토양내의 열전달 경로는 고체성분과 공기로만 이루어진다. 즉, 열전달은 열저항률이 낮은 고체 성분과 토양 입자와 입자 사이에 있는 열저항률이 높은 공기를 통해서 이루어지기 때문에 전체적으로 토양은 높은 열저항을 갖게 된다. 따라서, 토양과 토양사이의 빈 공간을 없애고 밀도를 높여주면 열저항률이 낮아진다.

2.1.3.3 수분함량

위에 살펴본 바와 같이 공기와 물이 토양내의 빈 공간에 어느 정도 채워져 있는가에 따라 토양의 열저항률이 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 이때 물은 공기에 비해 열저항률이 훨씬 낮을 뿐만 아니라 토양입자와 입자사이의 유효접촉면적을 넓혀주기 때문에 열저항률을 낮출 수 있다. 일반적으로 동일한 환경하에서 토양 열저항률은 수분함량에 의해 결정된다.

2.2 토양 열확산율

2.2.1 의미

토양의 열확산율이란 토양 내부에 서로 다른 온도 분포가 있을 때 전체 계의 온도는 시간이 지날수록 평형 상태에 도달하게 되는데 이때 온도분포를 균일하게 하는 토양의 특성을 말하여 단위는 [m²/sec]이다.

2.2.2 측정의 필요성

토양의 열확산율이 δ, 토양의 열저항률이 ρ인 토양 내부에 단위길이당 q의 열류를 발생하는 무한장 직선 열원을 가정하여 열원으로부터 거리 r만큼 떨어진 지점의 온도는 식(2.1)과 같이 표현된다.

$$T(t) = -\frac{H\rho}{4\pi} E_i\left(\frac{-r^2}{4\delta t}\right) \quad (2.1)$$

여기서, $T(t)$: t 초 후의 온도 [°C]
 ρ : 토양의 열저항률 [°C·m/W]
 δ : 토양의 열확산율 [m²/sec]
 r : 열원으로 부터의 거리 [m]
 H : 열류 [W/m]
 t : 시간

식(2.1)에서 보는 바와 같이 토양 내부에 무한장 직선 열원이 있을 때 토양 내부 각 지점의 온도상승은 토양의 열저항률 뿐만 아니라 토양의 열확산율에도 관계가 있음을 알 수 있다.

2.2.3 토양 열확산율에 미치는 요소

건조된 토양의 열확산율과 열저항률과의 관계는 식(2.2)와 같이 표현된다.

$$C = \frac{1}{\rho\delta\sigma} \quad (2.2)$$

여기서, C : 비열 [J/kg·°C]
 ρ : 토양의 열저항률 [°C·m/W]
 δ : 토양의 열확산율 [m²/sec]
 σ : 밀도 [kg/m³]

식(2.2)에서 보는 바와 같이 임의의 토양에 대하여 비열이 일정할 경우 토양의 열확산율은 토양의 열저항률, 밀도 및 토양의 구성성분등에 영향을 받음을 알 수 있으며, 각 구성 요소와 토양의 열확산율과의 관계는 다음과 같다.

- ① 토양의 열확산율은 토양의 열저항률에 반비례한다.
- ② 토양의 열확산율은 토양의 밀도에 반비례한다.
- ③ 토양의 열확산율을 토양의 비열에 반비례한다.

2.3 토양 열안정도

2.3.1 의미

토양의 열안정도는 어떤 단위로서 나타낼 수 있는 물리적인 양이 아니며 조사하고자 하는 토양에 따라 여러 가지 의미를 가지는 용어이다. 일반적으로 열류 주변의 토양에 지속적으로 수분이 공급되지 않으면 토양내 온도 구배에 의해 토양은 열적으로 불안정하게 되는 건조과정이 일어난다. 이 건조과정은 수분함량과 건조율, 토양 열저항률의 관계에 따라 다음과 같이 두 가지 단계로 구분되어 진다. 첫 번째의 건조과정은 점차적으로 수분함량이 감소함에 따라 토양의 열저항률이 점점 증가하는 과정으로 이것을 열적 안정상태라고 하며, 두 번째 단계의 건조과정은 열원에 접촉되어 있는 토양이 어떤 임계 수분 함량에 도달하면 건조율이 급증하면서 토양의 열저항률도 급격히 상승하게 되는데 이것을 열적 불안정상태라고 한다.

2.3.2 평가의 필요성

전력케이블의 예상 경과지에 대한 토양의 열안정도를 평가하는 것은 전력케이블의 적정 송전용량 유지 및 사고예방에 필수적이다. 임계수분함량 부근에 있는 토양은 열적 불안정상태에 있기 때문에 열원에 접한 부분의 토양은 건조율이 급증하면서 높은 열저항률의 건조한 토양층을 형성하게 된다. 이와 같이 토양이 건조해지면 건조된 토양이 가지는 아주 높은 값의 열저항률에 의해 전력케이블의 열방산이 제한되며 이에 따라 도체온도가 상승하여 결국 사고로 진행될 수 있다.

2.3.3 열안정도에 영향을 미치는 요소

토양의 열안정도에 영향을 미치는 요소들은 어떤 정성적 혹은 정량적 분석보다는 실험이나 경험을 통해 밝

혀져 왔다. 초기 연구단계에서는 수분함량만이 토양의 열안정도에 영향을 주는 것으로 생각해 왔으나 그 후 여러 가지 실험을 통하여 다음과 같은 요소와도 관련이 있는 것으로 밝혀졌다.

- ① 초기수분함량
- ② 밀도 및 입자 크기 분포
- ③ 단위 길이당 열전달률
- ④ 열원의 직경
- ⑤ 케이블간의 간격

그 밖의 다중케이블 구조에서는 케이블 간의 간격이 토양의 열안정도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 있다.

2.4 토양의 열특성 측정 이론

토양의 열특성이라 할 때 주로 토양의 열저항률 및 열확산율을 의미하며 본 절에서는 열특성의 측정원리 및 측정기기에 대하여 살펴본다.

2.4.1 탐침법의 측정 이론

탐침법은 카슬로와 재거의 이론을 1980년 보그와 그 동료들이 개발한 방법으로써 열저항률, 열확산율 및 열안정도를 비교적 빠르고도 정확하게 측정할 수 있다.

열확산율이 δ 인 어떤 매질내에 길이가 무한대인 선 열원이 있을 때 선열원으로 부터 반경 r 인 임의의 지점에서의 온도 T 는 발열후 시간 t 에 대하여 원통좌표계에서 식(2.3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \delta \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.3)$$

식(2.3)의 해는 식(2.4)과 같다.

$$T = \frac{\rho Q}{4\pi} E_i(-\chi) \quad (2.4)$$

여기서, δ : 열확산율
 Q : 단위시간당 단위 길이에서 발생한 열량
 ρ : 열저항률

$$\chi = \frac{r^2}{4\delta t}$$

$$E_i(-\chi) = \int_{\chi}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

카슬로와 재거의 이론에서 도출한 식(2.4)를 전개하면 식(2.5)와 같다.

$$T(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{4\delta t}{r^2} - \gamma + \frac{1}{1!1} \frac{r^2}{4\delta t} - \frac{1}{2!2} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^2 + \frac{1}{3!3} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^3 - \frac{1}{4!4} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^4 + \dots \right] \quad (2.5)$$

여기서, γ : Euler 상수 (=0.5772)

식(2.5)는 첫째 탐침의 길이가 무한대이고, 둘째 열저항률 및 열확산율이 균일한 토양으로 가정하고, 셋째 탐침의 표면과 외부입자 사이에 접촉저항이 없고, 넷째 선열원의 직경이 무한소인 경우에 성립한다. 그러나, 탐침의 직경과 길이가 일정한 경우 충분히

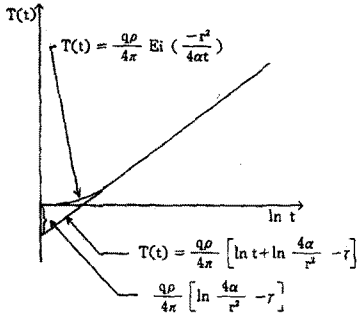
한 시간이 경과하면 $\frac{r^2}{4\delta t}$ 은 충분히 작아지고, 이 때문에 식(2.5)의 3항이하를 무시할 수 있기 때문에 식(2.5)를 식(2.6)과 같이 근사화할 수 있다.

$$T(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{4\delta t}{r^2} - \gamma \right] \quad (2.6)$$

식(2.6)에서 자연대수부분을 시간 항과 상수 항으로 분리하면 식(2.7)와 같이 된다.

$$T(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln t + \ln \frac{4\delta}{r^2} - \gamma \right] \quad (2.7)$$

식(2.7)을 사용하여 x축을 $\ln t$ 로, y축을 온도로 하는 그래프를 그려보면 그림(2.1)과 같이 된다.



그림(2.1) 온도와 시간 곡선

이때 열저항률은 그래프의 기울기 ($Q\rho/4\pi$)로부터 구할 수 있다. 즉, 시간 t_1 과 t_2 에 대해 온도가 각각 T_1, T_2 일 때 그 온도차 ΔT 는 식(2.8)과 같이 되며,

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{t_2}{t_1} \right] \quad (2.8)$$

따라서 열저항률은 식(2.9)와 같이 된다.

$$\rho = \frac{4\pi}{Q} \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (2.9)$$

2.4.2 토양열특성 분석기(TPA 6000+)

탐침법의 원리를 적용하여 제작된 것이 토양 열특성 분석기이며 주요 사양은 표(2.1)와 같다. 토양열특성 분석기(TPA 6000+)를 이용하여 토양열특성을 측정하는 장면은 그림(2.2)와 같다.

표(2.1) TPA6000+의 주요사양

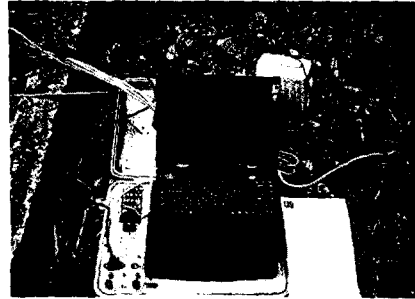
측정범위	20~9999 °C-cm/W
온도측정 범위	-100°C ~ +200°C
동작 온도	-10°C ~ +50°C
온도 입력 갯수	6개
온도센서 형태	열전대 혹은 열저항센서
온도 분해능	0.1°C
절대정확도	±1.5°C
Drift	0.2°C/hr이하

2.4.3 토양열특성의 실측 및 분석

지중 전력케이블이 포설되어 있는 수영변전소 및 연지 C/H 주변의 토양에 대하여 토양 특성을 측정하였으며 그 결과는 표(2.2)와 같다. 토양 열특성 측정은 약 1년 간을 측정하였는데, 연중 열저항률 값은 53[°C-cm/W]에

서 94[°C-cm/W]정도임을 알 수 있다.

즉, 토양 열특성을 실측한 지역에서의 지중송전케이블에 대한 송전용량 평가를 할 때, 토양 열저항률 값을 최대 95[°C-cm/W]를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 만일 토성이 다른 곳에 케이블이 포설될 경우 개별 토양에 대한 열특성을 실측하여 송전케이블의 송전용량을 평가하는데 사용하여야 한다.



그림(2.2) TPA 6000+을 이용한 토양열특성 측정

표(2.2) 토양열특성 실측

사례	S 변전소 토양		Y C/H 토양		비고
	열저항률 [°Ccm/W]	열확산율 [cm²/s]	열저항률 [°Ccm/W]	열확산율 [cm²/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	

3. 결 론

본 논문에서는 토양의 열특성 및 측정원리를 정립하였으며, 실선로 주변 토양에 대하여 토양 열특성 분석기를 이용하여 실측을 하였다. 측정된 값은 기존 지중송전케이블의 송전용량 평가시 적용하고 있는 열저항률 값 100[°C-cm/W]보다 낮으며, 만일 지역별 토성에 대한 열저항률 값을 측정할 수 있으면 측정치를 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