

실시간 지중 전력케이블 용량 평가를 위한 토양 열 특성 및 온도 측정 시스템 개발

정성환\*, 김대경, 최상봉  
한국전기연구원

Development of the Soil Thermal Property and Temperature Measurement System for the Real-time Ampacity Estimation of Underground Power Cables

Seong Hwan Jeong\*, Dae Kyeong Kim, Sang Bong Choi  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper introduces the real-time soil thermal property analyzer and temperature measuring system which is combined with radio telecommunication technique. To measure the thermal parameters in real-time, the radio telecommunication technique are used the personal communication service (PCS) which is in the world-wide serviced commercially firstly by CDMA. The thermal property analyzer has an ability of measuring thermal resistivity, thermal diffusivity and thermal stability. To estimate the soil thermal properties, the curve fitting algorithm by means of the least square method are used. TCP/IP protocol and MTM are used to install the real-time soil thermal property and temperature measurement system at multiple locations along routes of the underground power cables and to reduce the cost of telecommunication.

1. 서 론

지중 전력 케이블의 정상상태와 과도상태 허용전류는 전력케이블과 주변 매질에 대한 열적 파라메타에 의해 결정된다. 전력케이블의 최고허용온도와 열적 파라메타는 제조사 또는 전력회사의 사양으로 규정되고 있으나 전력케이블의 주변 매질, 즉 토양의 열 특성은 토양의 고유 특성인 구성성분, 밀도와 수분함량과 하루를 주기로 변동하는 부하전류에 의해 변동하고 있다.

최근, 이와 같이 시시각각으로 변동하고 있는 각종 열적 파라메타를 실시간으로 측정하여 동적 열회로 모델링을 이용하여 과도상태 허용전류를 계산함으로써 비상시 선로운용과 첩두부하 관리에 활용하는 실시간 동적 열용량 평가기술이 개발되고 있다.

본 논문은 동적 열 용량 평가 기술에 필수적인 실시간 토양 열특성 측정 및 온도 측정 시스템 개발을 소개하였다. 실시간 토양 열특성 측정기는 시시각각 변동하고 있는 토양의 열 특성을 실시간을 측정하기 위하여 고전적인 토양 열특성 분석기에 무선 통신 기술을 접목하였다. 또한, 토양의 열특성 측정기는 전통적인 토양의 열 저항률, 열 확산률 및 열 안정도를 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 2단계 가열 주기를 이용하여 탐침의 초기건조시간을 계산하여 부하변동에 따른 지중 전력케이블의 초기건조시간을 결정하는 기술을 개발하였다. 무선통신 기술은 한국에서 세계최초로 상용화된 CDMA 개인이동 통신 기술을 이용하였다.

2. 본 론

과도 탐침법의 이론적 배경으로부터 토양의 열 특성을 측정하는 기본 식을 유도하고 개발된 실시간 토양 열특

성 및 온도측정 시스템은 다음과 같다.

2.1 토양 열 특성 측정 이론

열 확산률이  $\delta$ 인 어떤 매질내에 길이가 무한대인 선 열원이 있을 때, 선 열원으로부터 반경  $r$ 인 임의의 점에서 발열 후 시간  $t$  에 대한 온도  $T$ 는 원통형 좌표 계로 식(2.1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \delta \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

여기서,  $\rho$ 는 열 저항률이다. 식(2.1)의 해는 다음과 같다.

$$T = \frac{\rho Q}{4\pi} [E_i(-\chi)] \quad (2.2)$$

여기서,  $\chi = -\frac{r^2}{4\delta t}$

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

여기서,  $Q$ 는 단위시간당 단위 길이에서 발생한 열량이다. 식(2.1)과 식(2.2)는 탐침의 길이가 무한대이고 탐침이 삽입될 토양의 열 저항률과 확산률은 같은 매질로 가정하며, 탐침이 표면과 외부 입자간에 접촉저항이 없는 경우에 성립한다. 또한 선 열원의 직경이 무한 소인 경우를 가정하였다. 그러나, 탐침의 직경과 길이가 제약을 받으므로 위의 가정은 반경  $r$ 과 열 확산률이  $\delta$ 인 어떤 매질내에서 충분한 시간이 경과한 경우로 하여 근사화할 수 있다. 즉,  $\frac{r^2}{4\delta t}$ 가 충분히 작다면 식(2.2)는 다음과 같이 된다.

$$T = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[ \ln \frac{4\delta}{r^2} - \lambda + \frac{2}{rH\rho} + \ln t \right] \quad (2.3)$$

여기서,  $\lambda$ 는 Euler의 상수(=0.5772)이며,  $H$ 는 접촉전도 계수이다. 만일, 충분한 시간이 흐르면, 온도  $T$ 와  $\ln t$ 의 곡선은 근사적으로 직선이 된다. 이때, 시간  $t_1$ 과 시간  $t_2$ 에서 측정된 온도가 각각  $T_1$ 와  $T_2$ 일 때, 그 온도차  $\Delta T$ 는 다음과 같이 되며,

$$\Delta T = \frac{Q\rho}{4\pi} \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2.4)$$

따라서, 열 저항률  $\rho$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{4\pi}{Q} S \quad (2.5)$$

여기서, S는 온도 T와 ln t곡선의 기울기이다. 곡선의 기울기 S가 구해지면 온도 T와 ln t 곡선에서 ln t축과 교차하는 점을 I라고 하면 열 확산율 δ는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{\gamma^2}{4} \left[ \lambda - \frac{2}{rHp} - I \right] \quad (2.6)$$

온도 T와 시간 ln t곡선은 실험적인 데이터로부터 얻어지며, 온도상승이 포화하는 충분히 긴 시간이 지나면 최소상승법에 의해 기울기 S와 교차점 I를 쉽게 구할 수 있다.

또, 식(2.5)와 식(2.6)에서 토양의 열 저항률과 열 확산율을 각각 알 수 있으면 토양의 열 용량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C = \frac{1}{\delta\rho} \quad (2.7)$$

### 2.2 초기 건조시간의 결정

실험 데이터로부터 초기 건조시간을 정의하는 방법은 그림(2.1)과 같이 다음 세가지 방법이 있다.

첫 번째 방법은 1977년 Hartley와 Black에 의해 제안된 것으로 계속해서 탐침에 열을 인가하면 탐침 표면에는 수분의 이동이 일어나서 수분함량이 임계수분 함량에 도달하게 되어 그림(2.1)의 1에서 보는 바와 같이 탐침의 열응답이 초기 경사와 차이가 나기 시작하는데 이때의 시간을 초기 건조시간으로 정의하였다.

두 번째 방법은 1979년 Bush, Balck과 Martin에 의해 제안된 것으로 그림(2.1)에서 보는 바와 같이 탐침 주변에 건조 토양이 형성된 후 열 응답은 다시 한번 더 선형이 되는데 이때의 첫 번째 직선과 두 번째 직선이 교차하는 점(2)을 평균건조시간으로 정의하고 이것을 초기건조시간으로 정의하였다.

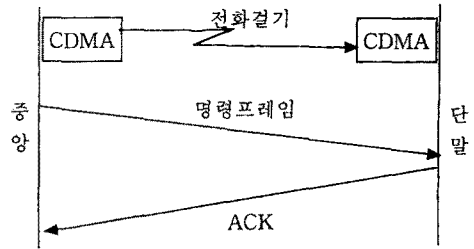
세 번째 방법은 도표법을 이용하여 초기건조시간을 결정하는 것이다. 이 방법은 그림(2.1)에서와 같이 열응답은 첫 번째 직선의 온도와 온도상승분 ΔT를 합한 값을 지나며, 이때의 시간을 초기건조시간으로 하였다.

## 2.3 CDMA 무선통신 프로토콜

CDMA 무선통신 프로토콜의 흐름은 다음 2가지로 구분된다.

### 2.3.1 명령 처리

그림(2.2)는 명령 처리 흐름을 나타낸 것으로 중앙에서 명령을 보내면 단말은 명령 프레임 정상적으로 받았다는 확인(ACK)만을 응답(reply)한다. 명령의 종류와 기능은 <표 2.1>과 같다.



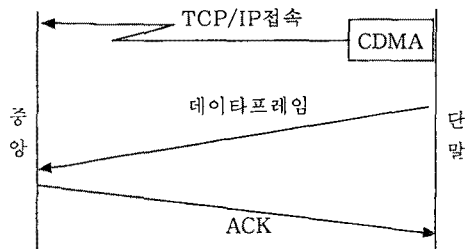
그림(2.2) 명령 처리

<표 2.1> 명령의 종류 및 기능

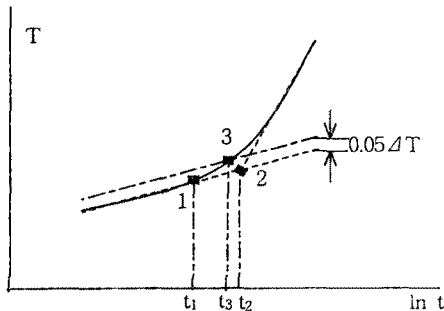
명령	기능
CMD_DOWN_LOAD	중앙에서 단말에 다운로드 명령
CMD_TPA	중앙에서 단말에 다운로드 명령후에 토양 열특성 계속 명령을 발신
CMD_TEMP	중앙에서 단말에 다운로드 명령후에 온도계측 명령을 발신
CMD_FREE_RUNNING_STOP	중앙에서 단말에 다운로드 명령시 계속해서 계속하는 FreeRunning모드가 설정되어 있었다면 FreeRunning을 중지하는 명령을 발신
CMD_SETUP_DATA_EE ND	중앙에서 단말에 설정된 Setupdata를 알고자 할 때 명령을 발신
CMD_TPA_RESET	중앙에서 단말장치의 Reset을 설정할 때 명령을 발신

### 2.3.2 Unsol 데이터의 수신

중앙에서 다운로드 명령을 보내면 단말은 명령프레임을 정상적으로 받았다는 확인(ACK)을 주고 토양 열특성을 측정 한 후 그림(2.3)과 같이 TCP/IP통신의 경우 Unsol로 측정된 온도데이터를 발신하고, Serial통신의 경우 중앙에서 TPA 측정명령을 내리면 측정된 온도데이터를 발신한다.



그림(2.3) Unsol 데이터 수신



그림(2.1) 초기건조시간의 결정 방법

## 2.4 실시간 토양 열특성 측정기

실시간 토양 열특성 측정기는 그림(2.4)와 같이 제어 명령 및 데이터의 입출력을 관리하는 통신 모듈, 탐침봉에 열을 인가하는 Heater Controller, 토양 열특성 측정기의 전원과 통신 Process와 각 Channel에 설정 값 및 측정된 온도를 보여주는 LCD패널로 구성되어 있다.

통신모듈은 측정된 온도 데이터를 원격에서 실시간으로 송수신하기 위한 CDMA 무선통신 모듈과 현장에서 토양 열특성 측정기의 명령어 setup 및 온도 데이터의

수거를 위하여 RS-232C 모듈로 구성된다.

Heater Controller는 탐침내 발열체의 저항과 2단계 가열 주기의 발열량 설정 값에 대응될 수 있도록 0.2W/Cm, 0.3W/Cm, 0.4W/Cm 및 1.2W/Cm의 4가지 발열량을 제어한다. 뿐만 아니라 탐침봉의 온도가 상승함에 따라 발열체의 전기저항이 증가하여 발열량이 변동하게 되는데 위에서 설정한 발열량을 얻기 위하여 입력전류와 전압을 제어한다. 또한, 토양 및 전력케이블의 표면 온도를 측정하기 위하여 현장에 설치되는 열전대(thermercouple)로부터 측정된 온도의 아날로그신호를 디지털신호로 변환하기 위한 ADC를 내장하고 있다.

LCD 패널은 Heater Controller의 각 Channel에 설정된 값 및 측정된 온도를 화면으로 출력한다.

전원부는 탐침봉의 발열체에 공급하는 전원과 실시간 토양 열특성 측정기에 필요한 전원을 각각 공급할 수 있도록 설계되어 있다.

### 3. 결 론

고전적인 토양 열특성 측정기는 토양의 열 저항률, 열 확산률 및 열 안정도를 쉽게 측정할 수 있으나, 실시간 변동하고 있는 토양의 열 특성을 실시간으로 측정할 수 없어서 지중 송전선로의 동적 열용량 평가에는 적용할 수 없었다.

본 논문은 지중 전력케이블의 경과지에 구애받지 않고 침투부하시 열적으로 가장 불안정한 곳에 부설된 지중 전력케이블의 열적 용량을 평가하여 동적 송전용량 산정에 필수적인 실시간 열적 동특성과 온도를 측정하는 시스템 개발에 대하여 살펴보았다. 이 시스템은 한국에서 세계최초로 상용화에 성공한 CDMA무선 통신 기술을 이용하였으며, 2단계 가열 주기를 이용하여 탐침의 초기 건조시간을 계산하여 부하변동에 따른 지중 전력케이블의 초기 건조시간을 결정할 수 있는 기술을 구현하였다.

### [참 고 문 헌]

- (1) S.A. Boggs, F. Y. Chu, H.S. Radhakrishna and J. Steimanis, "Measurement of Soil Thermal Properties-Techniques and Instrumentation", in *Underground Cable Thermal Backfill*, Pergman Press, pp. 134-146, 1982
- (2) J. G. Hartley, W. Z. Balck, R. A. Bush and M. A. Martin, "Measurement, Correlations and Limitations of Soil Thermal Stability", in *Underground Cable Thermal Backfill*, Pergman Press, pp. 121-133, 1982
- (3) H.S. Radhakrishna, F. Y. Chu, S. A. Boggs, "Thermal Instability and its Prediction in Cbale Backfill Soil", *IEEE Trans. on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-99, No. 3, May/June, 1980

그림(2.4) 토양 열 특성 및 온도 측정 시스템 개략도

