

되메움재의 열특성 추정에 관한 연구

정성환\*, 김대경, 최상봉, 남기영, 류희석, 이동일, 강지원  
한국전기연구원, 한전전력연구원

A Study on the Thermal Property Estimation of the Backfill Materials

S.H. Jeong\*, D.K. Kim, S.B. Choi, K.Y. Nam, H.S. Ryoo D.I. Lee, J.W. Kang  
KERI KEPRI

**Abstract :** This paper is the estimation of the thermal property for the backfill materials according to the experimental measurements both a laboratory and field test.

1. 서 론

급증하고 있는 도심지의 전력 수요에 대한 공급능력을 증대시키기 위하여 지중 송전 계통의 전압을 격상하거나 대도체 지중 전력케이블을 포설하고 있다. 지중 송전계통의 전압 격상 또는 전력케이블의 대용량화는 도체손실, 유전체 손실 및 시스 손실등 전력케이블에서 발생하는 손실을 크게 되며, 이와 같은 손실은 열에너지 형태로 변환되어 케이블을 에워싸고 있는 토양이나 공기중으로 전도, 대류 혹은 복사의 형태로 외부로 전달되면서 도체온도를 상승시키게 된다. 이 과정에서 지중 전력케이블의 송전용량은 케이블이 포설되어 있는 깊이, 케이블의 표면 온도, 토양의 온도 및 토양의 열 특성에 의해 제약 받게 되며, 특히 토양이 전력케이블에서 발생한 열을 얼마나 쉽게 외부로 전달할 수 있으며, 어느 정도 신속하게 에너지를 받아들이고 전도해 주는지 따라서 어느 정도까지 열적으로 안정할 수 있는가에 대한 문제가 제기되고 있으며 이는 초고압화 추세와 더불어 다회선 포설의 증가로 큰 문제가 된다.

본 논문은 지중 전력케이블의 송전용량을 증대시키기 위하여 열특성이 양호한 되메움재를 개발함에 있어서 열특성을 실험실에서 측정된 것과 실 선로에 포설될 경우를 상정하여 되메움재에 대한 과도상태 온도상승 실험을 통하여 현장에서 측정된 것을 비교분석하여 되메움재의 열특성을 추정에 대하여 검토하였다.

2. 본 론

2.1 토양의 열특성

2.1.1 토양의 열저항률

토양 열저항률이란 한 변의 길이가 1m인 정육면체의 토양에 1W의 열을 흘렸을 때 정육면체 전체에 1℃만큼 온도를 상승시키는 토양의 특성을 말하며 단위는  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$  혹은  $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$ 이다. 일반적으로 토양 열저항률은 수분과 밀도가 알맞은 양토인 경우 약  $0.4 [^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}]$

이고, 완전히 건조된 점토인 경우  $3.0 [^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}]$ 이상의 값을 가진다.

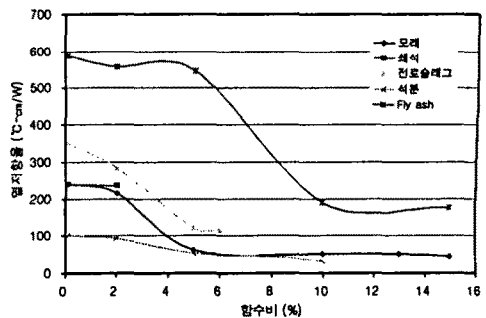
2.1.2 토양의 열확산율

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  $[\text{m}^2/\text{sec}]$ 이다.

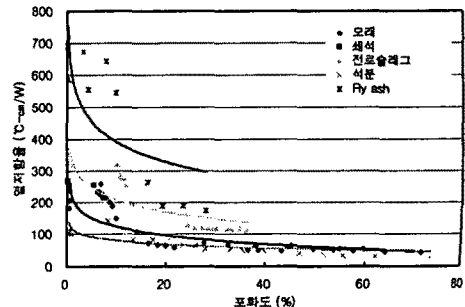
그런데 전력케이블의 송전용량은 토양 열 저항률과 열확산율에 따라 큰 영향을 받기 때문에 정확한 토양 열특성 값의 평가는 필수적이다.

2.2 되메움재의 열특성

지중 전력케이블 주변에 포설될 수 있는 되메움재는 (그림 1)과 (그림 2)에서 보는 바와 같이 여러 개가 검토되고 있다.



(그림 1) 재료별 함수비에 따른 열 저항률



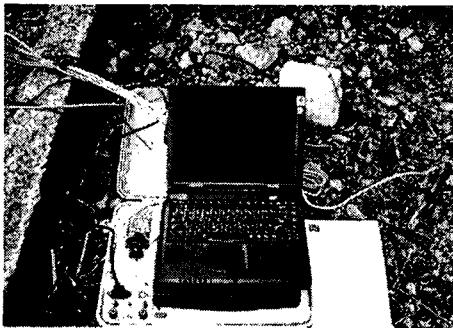
(그림 2) 포화도에 따른 열 저항률의 변화

그림에서 보는 바와 같이 석분의 경우 입도분포가 좋고 간극율이 작아 강모래보다 수분이동이 적을 것으로 예상되므로 장기적인 안정도 면에서도 유리할 것으로 판단된다. 또한 건조 열저항률이 작고 수분유지력이 좋으며 최적함수비(OMC; optimum moisture content)가 작아 되메움재로서 적합한 것으로 판단된다. 한편 모래의 경우 10%내외에서 열 저항률의 감소가 있음을 알 수 있다.

실험실에서 개발된 되메움재를 실선로로 모의한 시험장에 포설하여 일정 시간이 흐른 후 (그림 3)과 같이 TPA 6000+를 이용하여 되메움재의 열특성을 측정된 결과는 <표 1>과 같다. 그림과 표에서 보는 바와 같이 모래, 석분, 모래+석분의 함수비는 모두 함수비가 5%이상인 것으로 추정된다..

<표 1> 되메움재의 정상상태 열 특성

되메움재의 종류	열 저항률 [°C·m/W]	열 확산율 [m <sup>2</sup> /s]
모래	0.66	0.34
석분	0.56	0.34
	0.78	0.33
	0.47	0.34
모래+석분	0.66	0.35
	0.54	0.34
	0.56	0.34



(그림 3) TPA6000+을 이용한 토양열특성 측정

## 2.3 온도측정에 의한 되메움재에 열 특성 추정

### 2.3.1 지중 전력케이블 표면의 온도 계산

2차원 열전달방정식의 해로부터 지중 전력케이블의 표면온도는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\theta_{e,p}(t) = W_{i,p} \frac{\rho_s}{4\pi} \left[ -E_i \left( -\frac{D_e}{16\delta t} \right) + E_i \left( -\frac{L_p^2}{\delta t} \right) \right] \quad (1)$$

여기서,  $\theta_{e,p}(t)$  : p번째 케이블에 대한 케이블 표면에서 과도온도상승분 [°C]

$\rho_s$  : 주변 매질의 열 저항률 [K·m/W]

$\delta$  : 주변 매질의 열 확산율 [m<sup>2</sup>/s]

$D_e$  : p 번째 케이블 또는 관로의 외경 [m]

$L_p$  : p 번째 케이블 혹은 관로의 매설 깊이 [m]

$W_i$  : p 번째 케이블의 주울 손실 [W/m]

$-E_i(-x)$  = Exponential Integral Function

위 식 (1)은 한 개의 케이블 혹은 관로가 원토에 직접 매설되어 있을 경우의 지중 전력케이블 표면 혹은 관로의 표면 온도이며, 만일 원토보다 열 저항률이 낮은 개량토로 전력케이블 혹은 관로를 덮으면 다음과 같은 보정 계수를 식(1)에 더해야 한다.

$$Corr(t) = W_{i,p} \frac{\rho_s - \rho_b}{4\pi} \left[ -E_i \left( -\frac{r_b^2}{4\delta t} \right) + E_i \left( -\frac{L_b^2}{\delta t} \right) \right]$$

여기서,  $\rho_s$  : 토양의 열 저항률 [K·m/W]

$\rho_b$  : 개량토의 열 저항률 [K·m/W]

$r_b$  : 개량토로 되메운 단면적의 등가반경 [m]

$L_b$  : 개량토로 되메운 단면적의 중심깊이 [m]

일반적으로 지중송전선로는 한 곳에 여러 개의 케이블을 다중 포설하는 것이 대부분이기 때문에 한 케이블에서 발생하는 손실은 다른 케이블의 도체 온도를 상승시키는 상호 가열 효과가 있다. 따라서 케이블이 다중 포설되어 있을 경우 이와 같은 상호 가열에 의한 온도 상승분을 계산하여 전력케이블 혹은 관로 표면의 과도 온도에 더해 주어야 한다. 상호 가열에 의한 온도 상승분은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\theta_{pk}(t) = W_{i,k} \frac{\rho_s}{4\pi} \left[ -E_i \left( -\frac{d_{pk}^2}{4\delta t} \right) + E_i \left( -\frac{d'_{pk}{}^2}{4\delta t} \right) \right] \quad (3)$$

여기서,  $W_{i,k}$  : k번째 케이블에서 발생하는 총 손실 [W/m]

$d_{pk}$  : p번째와 k번째 케이블의 중심 간격 [m]

$d'_{pk}$  : p번째와 k번째 케이블의 영상케이블간의 중심 간격 [m]

따라서 지중전력케이블 혹은 관로 표면의 과도온도는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_p(t) = \theta_e(t) + \sum_{k=1}^{N-1} [\theta_{pk}(t) + Corr(t)] \quad (4)$$

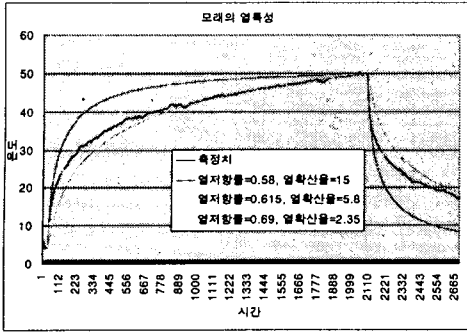
### 2.3.2 되메움재의 열 특성 추정

지중 전력케이블의 부하전류를 모의하여 70[W/m]의 발열량으로 168시간 인가한 후 모의 전력케이블의 표면 온도를 측정된 것과 식(4)를 이용하여 계산한 온도를 그래프로 표시하면 (그림 4)와 같다. 이때, 되메움재의 정상상태 열 특성은 <표 2>와 같이 추정된다.

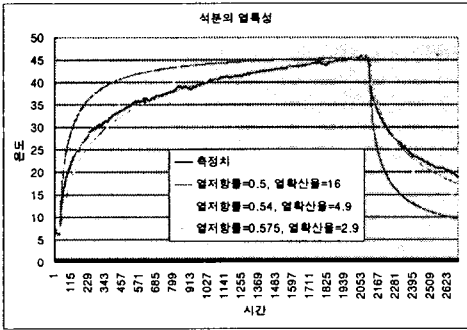
### 3. 결 론

(1) 현장에서 측정된 <표 1>의 열 저항률과 (그림 1) 및 (그림 2)에서와 같이 실험실에서 측정된 열저항률은 함수비 5%이상에 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 실선로에 포설될 경우 되메움재의 경우 5%이상에 포화될 수 있음을 알 수 있다.

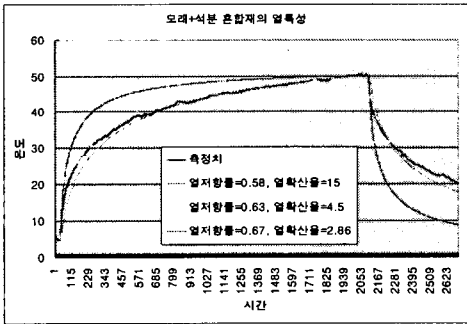
(2) (그림 4) 와 <표 2>에서 보는 바와 같이 열 확산율은 온도상승분이 포화될수록 점점 작아짐을 알 수 있다. 그러나 <표 1>의 정상상태 열 특성과는 큰 차이가 나고 있기 때문에 과도상태에 대한 되메움재의 열특성을 충분히 고려하여야 한다.



(a) 모래 되메움재의 전력케이블 표면온도 추정



(b) 석분 되메움재의 전력케이블 표면온도 추정



(c) 모래+석분 혼합재의 전력케이블 표면온도 추정

(그림 4) 되메움재의 온도 및 열 특성 추정

<표 2> 되메움재의 열특성 추정

되메움재 종류	초기온도 상승부		중간 온도상승분		최종 온도상승분	
	열저항률 [Km/W]	열확산율 [m <sup>2</sup> /s]	열저항률 [Km/W]	열확산율 [m <sup>2</sup> /s]	열저항률 [Km/W]	열확산율 [m <sup>2</sup> /s]
모래	0.58	15×10 <sup>-6</sup>	0.615	5.8×10 <sup>-6</sup>	0.69	2.35×10 <sup>-6</sup>
석분	0.5	16×10 <sup>-6</sup>	0.54	4.9×10 <sup>-6</sup>	0.575	2.9×10 <sup>-6</sup>
모래+석분	0.58	15×10 <sup>-6</sup>	0.63	4.5×10 <sup>-6</sup>	0.67	2.86×10 <sup>-6</sup>

### [참 고 문 헌]

- [1] 정성환 외, "지중전력케이블의 허용전류 산정 규격의 최근 동향", 1999년도 추계학술대회, 328-330, 1999
- [2] 정성환 외, "관로 부설 송전 케이블의 허용전류 계산 프로그램 개발", 2001년 하계학술대회, 2001
- [3] IEC 60287-1-1, "Electric Cables - Calculation of the Current Rating, Part 1 : Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculations of Losses, , Section 1 : General", 1995, 8
- [4] IEC 60853-2