

# 지중송전계통 구성시에 고려하여야 할 토양의 열특성

이 종범\* · 김 대경\*\*

(\*한국전기연구소 지중송전연구실 실장)

(\*\*한국전기연구소 지중송전연구실 연구원)

## 1. 서 언

도심지역의 급증하는 전력수요에 따라 지중 전력케이블의 설치가 급격하게 늘어나고 있으며, 부하의 증가에 따라 더욱 높은 전압의 전력케이블을 요구하고 있다. 교류의 경우에 전력케이블의 전압증가는 전력케이블에서 발생하는 손실의 증가를 의미하며, 이 손실은 열에너지로 변화하여 주위의 토양에 전달된다. 역으로 지중 전력 케이블의 전류용량은 전력케이블 자신 혹은 전력케이블을 에워싸고 있는 토양의 최고 허용온도에 따라 제한된다. 따라서 전력케이블을 에워싸고 있는 토양이 전력케이블에서 발생한 열을 얼마나 쉽게 전달할 수 있으며, 어느 정도 신속하게 에너지를 받아들이고 전도하는가 혹은 어느 정도까지 열적으로 안정할 수 있는가 하는 문제가 제기 되고 있으며, 이는 전압의 초고압화 추세에 따라 더욱 큰 문제가 되고 있다.

이 글에서는 토양 열특성의 종류와 각각의 특성이 내포하고 있는 의미와 전력 케이블의 설계 및 운용에 수반되어야 할 열저항율, 열확산율 및 열안정도의 측정필요성을 기술하고자 한다.

## 2. 토양의 열특성

토양의 열특성은 다음 세종류로 나누어진다.

- (1) 토양의 열저항율
- (2) 토양의 열확산율
- (3) 토양의 열안정도

이 장에서는 각 특성이 내포하고 있는 의미와 측정

필요성, 측정방법 및 각 특성에 영향을 미치는 요소에 대하여 기술하였다.

### 2.1 토양의 열저항율

가) 의미

토양의 열저항율을 나타내는 단위는 [ $^{\circ}\text{C}-\text{Cm}/\text{W}$ ]로서 한 변의 길이가 1 (cm)인 정육면체 내부를 통해 1 [W]의 열이 흐르면 정육면체 전체에 1 ( $^{\circ}\text{C}$ )의 온도상승을 야기한다는 것을 나타내고 이는 토양이 HEAT SOURCE로부터 받은 열을 얼마나 쉽게 HEAT SINK로 전달할 수 있는가 하는 것을 의미한다.

나) 측정 필요성

전력케이블의 예상경과지에 대한 토양의 열저항율 측정은 전력케이블의 정확한 전류용량계산 및 적정 송전용량결정에 필수적이다. 전력케이블에서 케이블의 전류용량은 도체 및 절연체의 최고허용온도에 의해 결정되며 도체의 온도상승은 대부분 매설지점의 토양의 열저항율에 의해 좌우된다.

토양의 열저항율과 전력케이블의 전류용량과의 관계를 나타내는 일례를 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 보는 바와 같이 토양의 열저항율이 전력케이블의 전류용량 및 송전용량에 미치는 영향은 대단히 크며 일반적으로 토양의 열저항율이 수분과 밀도가 알맞는 경우 약 40 [ $^{\circ}\text{C}-\text{Cm}/\text{W}$ ]에서 완전히 건조된 점토층의 경우 300 [ $^{\circ}\text{C}-\text{Cm}/\text{W}$ ] 이상의 값을 가지므로 이때 양자간의 전류용량 차이는 230 kV 급 전압에서 약

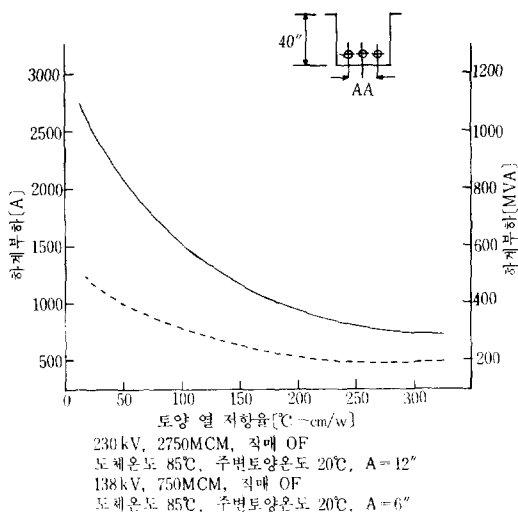


그림 1 토양의 열저항률이 전력케이블의 전류용량에 미치는 영향

3 배에 가깝게 됨을 알 수 있다. 전압이 높을 수록 토양의 열저항률에 따른 전력케이블의 전류용량 변화가 많은 것은 교류 전력케이블이 가지는 유전체 손실이 전압의 제곱에 비례하여 커지기 때문에 전력케이블에서 발생하는 열이 많아지기 때문으로서, 이는 차기 초고압으로 갈수록 적절한 토양의 열저항률 평가가 필요함을 나타내고 있다.

표 1. 여러나라의 표준 토양 열저항률

(단위 : (°C - Cm / W))

국명	열저항률	비고
미국	120, 80-90	지역에 따라 다르다.
프랑스	85	
이탈리아	80 또는 100	
영국	120	
스웨덴	100	
독일	70	
덴마크	80	
호주	120	
일본	60-80	습지
	100	보통지
	150	건조지

한편, 국내에서는 우리나라 토양의 열저항률을 실측한 경험이 없으므로 가까운 일본의 자료를 그대로 설계

에 이용하고 있다. 그러나 우리나라와 일본의 자연적인 환경이 다르듯이 토양의 열저항률에도 상당한 차이가 있을 것으로 사료되며, 따라서 일본의 자료를 그대로 설계에 반영하는 것은 과실제 혹은 부족설계로 인하여 비경제적인 계통운용이 될 수 있다. 아울러 가까운 장래에 차기 초고압(345KV) 지중송전계통 구성을 계획하고 있으므로 우리나라 토양에 대한 고유의 열저항률을 실측하는 것은 필수적이라 하겠다.

표 1은 해외 여러나라가 표준으로 채택하고 있는 토양 열저항률을 나타낸 것이다.

다) 측정방법

(1) 탐침법

탐침법은 열원 및 열전대로 구성된 길이 약 1.5(M)의 금속봉을 토양중에 매설하여 일정 열류를 발생시켜 온도상승을 측정하여 다음과 같은 식으로 부터 토양 열저항률을 구한다.

$$g = \frac{4\pi L}{p} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\log(t_2/t_1)} \quad (1)$$

여기서, g : 열저항률 [°C - Cm / W]  
 L : 열원의 길이 [Cm]  
 $\theta_2, \theta_1$  : 측정시작 후 t<sub>2</sub>, t<sub>1</sub> 경과 후의 온도 [°C]  
 p : 발생열량 [W]

(2) 가열구 매설법

중심부에 발열체를 삽입한 금속구를 토양중에 매설한 후 정상상태에 도달한 후의 온도상승 및 발열량으로부터 열저항률을 구한다. 그러나, 매설구의 온도가 토양의 온도에 도달하는 시간이 많이 걸리는 단점이 있으므로 일반적으로 잘 쓰이지 않는다.

(3) 모의 케이블 매설법

케이블을 모의한 발열체를 토양중에 매설하고 그 온도상승으로부터 KENNELLY의 식을 이용하여 열저항률을 역산하여 구한다. 열저항률을 구하는 방법중에서 가장 정확한 방법이라고 생각되지만 토양에 발열체를 융화시켜 온도상승을 포화시키는데 장시간을요하는 결점이 있다.

(4) 토양시료에 의한 측정법

중심에 발열체를 삽입한 동심원관의 용기중에 토양시료를 충전하여 내외 전극의 온도차로부터 열저항률을 구한다. 측정은 간단하지만 토양조건이 현장과 상이하기 때문에 측정치의 신뢰도가 떨어진다.

(5) 간접법

MAKOWSKI, MOCHLINSKI 등이 고안한 방법으로 토양의 함수량과 탈수상태에 따르는 비중 등으로부터 간접적으로 열저항율을 구한다.

라) 토양의 열저항율에 영향을 미치는 요소

토양의 열저항율에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 다음과 같다.

(a) 구성성분

(b) 밀도

(c) 수분 함유량

이외에도 케이블 매설깊이, 토양온도 및 케이블 표면 온도 등이 토양의 열저항율에 영향을 미친다. 각 요소의 중요성은 다음과 같다.

(1) 토양 구성성분

토양은 기체(공기), 액체(물) 및 고체(유기물 및 무기물)로 구성되어 있는 삼상의 매질이다. 각 성분의 열저항율을 예로들면 광물의 경우 석영은  $11[^\circ\text{C}-\text{Cm}/\text{W}]$ , 물은  $165[^\circ\text{C}-\text{Cm}/\text{W}]$  그리고 공기는  $4000[^\circ\text{C}-\text{Cm}/\text{W}]$ 에 이르기까지 큰 차이가 있으며 유기물은 광물 성분의 약 2 배 값을 갖는다. 따라서 케이블에서 발산한 열은 각 상의 성분이 모여 토양을 구성하면서 이루는 대단히 복잡한 직·병렬회로를 통해 흐르게 되므로 토양의 구성성분은 열저항율에 큰 영향을 미치게 된다. 대부분의 광물질이 물과 공기에 비해 비교적 낮은 열저항율을 가지므로 낮은 열저항율이 요구되는 곳에는 토양의 대부분이 고체성분으로 되어있는 것이 좋다.

(2) 밀도

토양의 열저항율에 가장 큰 영향을 미치는 것중의 하나가 토양의 밀도이다. 즉 완전히 건조된 토양의 경우 열전달 회로는 고체성분과 공기로만 이루어진다. 따라서 열저항율이 대단히 높은 공기와 비교적 낮은 값의 고체성분이 이루는 병렬회로 및 토양 입자와 입자 사이가 만드는 불완전한 접촉 사이로 공기가 들어감에 따라 이루는 열저항율이 대단히 높은 직열회로 등의 높은 열저항율을 가지는 직·병렬회로를 통해 열이 흐르게 되므로 높은 열저항율을 갖게 된다. 즉, 토양과 토양사이의 빈 공간을 없애고 고밀도화 시킬 수록 열저항율은 낮아진다.

(3) 수분 함유량

공기와 물의 열저항율을 비교해 보면 토양 내의 빈공간이 어느 정도 물로 채워져 있는가에 따라 토양의 열

저항율이 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 즉, 토양 입자와 입자 사이의 유효 접촉면적을 넓혀 줌으로써 열저항율을 줄일 수 있다. 토양의 수분 함유량은 함유량에 따라 포화, 젖음, 습기 및 건조상태로 나뉜다. 토양이 건조상태에서 젖음상태로 변화하는 동안에는 급격히 열저항율이 감소하지만 젖음상태에서 포화상태로 변화하는 동안에는 뚜렷한 변화가 없다. 이는 젖음상태 이상에서는 유효 접촉면적이 더이상 증가하지 않는다는 것을 나타낸다.

그림 2는 각 상태의 수분함유 정도를 나타낸 것이다.

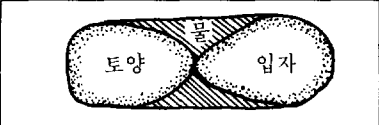
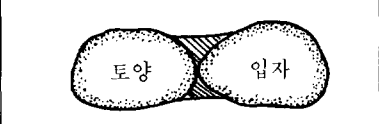
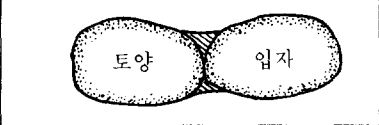
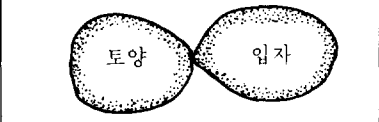
	포화
	젖음
	습기
	건조

그림 2 상태별 수분함유 정도

2.2 토양의 열확산율

가) 의미

토양의 열확산율을 나타내는 단위는  $(\text{Cm}^2/\text{sec})$  로서 토양내부에 이종의 온도분포가 존재할 때 전체계의 온도분포가 열평형상태가 될 때까지 온도 분포를 균일하게 하는 변화율을 나타내는 것으로, 이는 토양이 열원으로부터 얼마나 신속하게 에너지를 흡수·전도하는가를 의미한다.

나) 측정 필요성

토양의 열확산율이  $\delta$ , 토양의 열저항율이  $g$ 인 토양 내부에 단위 길이당  $q$ 의 열류를 발생하는 무한장 직선 열원이 있을때 열원으로부터 거리  $r$ 만큼 떨어진 지점의

온도는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$T(t) = \frac{-9g}{4\pi} Ei\left(\frac{-r^2}{4\delta t}\right) \quad (2)$$

- 여기서,  $T(t)$  :  $t$ 초 후의 온도 [°C]  
 $q$  : 열류 [W/M]  
 $g$  : 토양의 열저항률 [°C-Cm/W]  
 $r$  : 열원으로부터의 거리 [Cm]  
 $\delta$  : 토양의 열확산율 [Cm<sup>2</sup>/sec]  
 $t$  : 시간 [sec]

식 (2)에서 보는 바와 같이 토양내부에 무한장 직선 열원이 있을 때 토양의 내부 각 지점의 온도상승은 토양의 열저항률뿐만 아니라 토양의 열확산율에도 관계가 있음을 알 수 있으며 케이블을 무한장 직선열원으로 가정한다면 지중 전력케이블 주변의 토양온도변화에 토양의 열확산율이 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 지중 전력케이블 주변 토양의 정확한 온도분포 해석을 위해서 케이블 예상경과지에 대한 토양의 정확한 열확산율 측정이 필요하다. 건조된 토양의 열확산율과 열저항률의 관계는 식 (3)과 같이 표현되며 일반적으로 토양을 구성하는 고체성분의 비열은 대부분 0.8[J/G-°C] 부근의 값을 가진다.

$$C = \frac{1}{g\delta\sigma} \quad (3)$$

- 여기서,  $C$  : 비열 [J/G-°C]  
 $g$  : 토양의 열저항률 [°C-Cm/W]  
 $\delta$  : 토양의 열확산율 [Cm<sup>2</sup>/sec]  
 $\sigma$  : 밀도 [G/Cm<sup>3</sup>]

한편, 표 2는 전력케이블 및 토양을 구성하는 물질의 표준 열확산율을 나타낸 것이다.

다) 측정방법

(1) 탐침법

탐침법은 열원 및 열전대로 구성된 길이 약 1.5(M)의 금속봉을 토양중에 매설한 후 일정열류를 발생시켜 시간변화에 따른 온도변화를 측정하여 INTERCEPT METHOD를 사용하여 열확산율을 구하는 방법으로 현장에서 측정이 가능하므로 측정치의 신뢰도가 높은 방법이다.

(2) SHANNON-WELLS 법

SHELBY 튜브 내부에 측정할 토양을 충전한 후 중심부에 가느다란 탐침을 넣어 토양의 온도를 실온보다 약 8(°C) 높은 온도로 가열한 후 실온의 순환수 통에 넣어 시간의 경과에 따른 온도의 변화를 측정된 결과를

표 2. 물질의 표준 열확산율 (300[°K] 기준)

물 질	밀 도 [kg/M <sup>3</sup> ]	정압비열 [J/kg·K]	열전도도 [W/M·K]	열확산율 [cm <sup>2</sup> /s]
구 리	8933	385	401	1.17
알루미늄	2702	903	237	0.971
납	11340	129	35.3	0.241
스테인레스	8055	480	15.1	0.0391
콘크리트	2300	880	1.4	0.007
암 석	2320	810	2.15	0.0114
진 흙	1460	880	1.3	0.0101
모 래	1515	800	0.206	0.0017
종 이	930	1340	0.180	0.00144
물	997	4179	0.613	0.00147
공 기	1.1614	1007	0.0263	0.225
산 소	1.284	920	0.0268	0.227
수 소	0.08078	14310	0.183	1.58
질 소	1.1233	1041	0.0259	0.221
평균토양	2050	1840	0.52	0.0014

SHANNON과 WELLS의 이론으로 분석하여 구한다. SHANNON-WELLS의 이론식은 다음과 같다.

$$\delta = \frac{D^2 T}{t} \quad (4)$$

- 여기서,  $\delta$  : 토양의 열확산율 [cm<sup>2</sup>/sec]  
 $D$  : SHELBY 튜브 직경 [cm]  
 $T$  : Time factor = 0.05  
 $t$  : 50% 온도변화에 걸리는 시간 [sec]

라) 토양의 열확산율에 영향을 미치는 요소

식(3) 및 표 2에서 보는 바와 같이 토양의 열확산율은 토양의 열저항률, 밀도, 비열 및 토양의 구성성분등의 영향을 받으며 각 요소와 토양의 열확산율의 관계는 다음과 같다.

- (1) 토양의 열확산율은 토양의 열저항율에 반비례한다.
- (2) 토양의 열확산율은 토양의 밀도에 반비례한다.
- (3) 토양의 열확산율은 토양의 비열에 반비례한다.

특히 토양밀도의 경우 열저항율을 낮추기 위해서는 고 밀도가 필요하나 토양을 구성하는 대부분의 입자 및 물의 열확산율이 공기의 열확산율보다 낮으므로 밀도가 낮을수록 열확산율은 높아진다.

## 2.3 토양의 열안정도

가) 의미

토양의 열안정도는 어떤 단위와 함께 나타낼 수 있는 물리적인 양이 아니라 조사하고자 하는 토양의 형태에 따라 여러가지 의미를 가지는 용어이다. 일반적으로 단위 길이당 일정한 열류를 발생하는 열원 주변토양의 건조과정은 수분함유량과 건조율 및 토양 열저항율의 관계에 따라 두가지 두드러진 단계로 구분지어 진다. 첫 단계의 건조과정은 점차적인 수분함유량의 감소와 함께 토양의 열저항율이 미소하게 증가하는 과정으로 이것을 열적 안정상태라고 하며 두번째 단계의 건조과정은 열원에 접촉되어 있는 토양이 어떤 임계수분 함유량에 도달하면 건조율이 급격해 지며 아울러 토양의 열저항율도 급격히 상승하는 과정으로 이것을 열적 불안정상태라고 한다.

#### 나) 측정 필요성

전력케이블의 예상 경과지에 대한 토양의 열안정도를 평가하는 것은 전력 케이블의 적정송전용량 유지 및 사고예방에 필수적이다. 임계수분함유량 이하에서 토양이 열적 불안정상태에 도달하게 되면 건조율이 급속해지면서 열원에 접한 부분에 높은 열저항율의 건조토양층을 형성하거나 열원 주변의 토양을 완전히 건조시키게 된다. 토양이 건조됨에 따라 건조된 토양이 가지는 아주 높은 값의 열저항율에 의해 전력케이블의 열방산이 제한되며 이에 따라 도체온도가 상승하여 결국 사고로 진행된다.

토양의 초기수분함유량이 임계수분함유량에 도달하는 시간을 초기건조시간이라고 부르며 실제 전력케이블에 의하여 가열되는 특정 토양의 열안정도 해석은 초기건조시간으로 할 수 있다. 즉, 현장에서의 전력케이블의 예상 운전수준에 비해 초기건조시간이 충분히 길다면 토양은 열적으로 안정하다고 판단한다. 또 초기건조시간의 열원 직경의 제곱에 대한 비( $t/d^2$ )를 열안정도 한계라 한다.

그림 3은 모래침적토의 열안정도한계와 단위 길이당의 열입력의 관계를 초기수분함유량 별로 나타낸 것이다.

그림 3에서 보는바와 같이 일정 열류하에서는 열원의 직경이 클수록 초기 건조시간이 길며 특정한 값의 열류하에서는 초기건조시간이 거의 무한대에 이르게 되는데, 이 값은 토양의 초기수분함유량에 따라 다르다는 것을 알 수 있다.

따라서 초기수분함유량등 토양의 열안정도에 영향을

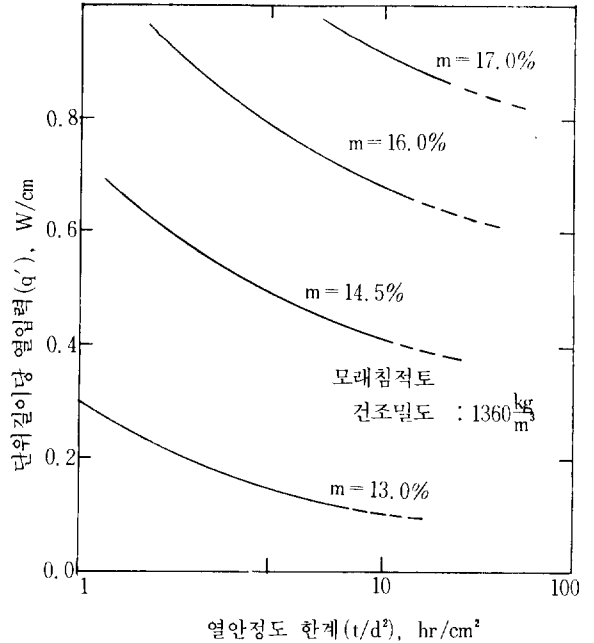


그림 3 모래침적토의 초기수분함유량별 열안정도 한계

미치는 요소를 정확히 분석하고 적절한 열안정도평가를 함으로써 안전한 계통설계를 할 수 있으며 이는 계통전압이 높아짐에 따라 전력케이블에서 발생하는 열도 높아지므로 차기 초고압으로 갈수록 정확한 열안정도평가가 필요하다고 하겠다. 국내에서는 지중송전계통 설계시에 토양의 열안정도를 평가한 경험이 없으며, 이는 1976년까지 지중송전전압이 66 kV급 이하에 제한되어 있었으므로 열안정도 평가의 필요성이 반감된 것으로 사료되나 상위 초고압(154 kV, 345 kV) 지중 송전계통 구성시에는 적정송전용량 결정 및 안전한 계통설계를 위해 토양의 열안정도 평가가 필요하다고 사료된다. 그리고, 특히 해저케이블이 예상되는 곳에서는 해저케이블 예상경로지의 퇴적층 속에 있는 유기물이 케이블에서 발생하는 열에 의해 메탄가스로 변화하여 이 메탄가스가 절연층을 형성함으로써 인해 열방산을 막아 열적 불안정상태에 빠지는 경우가 있으므로 메탄가스 생성유무에 대한 실험 및 적절한 열안정도평가가 있어야 하겠다.

#### 다) 측정방법

토양의 열안정도를 판정하는 방법으로는 탐침법이 가장 널리 쓰이고 있다. 탐침은 작은 직경의 스테인레스 강철 튜브 속에 4개의 구멍을 가진 가나다란 알루미늄 세라믹 튜브를 삽입시켜 두 구멍에 니크롬 철선을 열원

으로 집어넣고 온도측정을 위한 열전대를 튜브의 중간 지점에 설치하여 모든 공간을 진공으로 채운 것으로서 토양내에 적절히 설치한 후 시간변화에 따른 온도 변화를 측정하여 토양의 열안정도를 판별한다.

라) 토양의 열안정도에 영향을 미치는 요소

토양의 열안정도에 영향을 미치는 요소들은 어떠한 정성적 및 정량적인 분석에 의하여 밝혀지기 보다는 실험이나 경험을 통해 밝혀져 왔다. 초기 연구단계에서는 수분함유량만이 토양의 열안정도에 영향을 미치는 것으로 생각해 왔으나 그후 여러가지 실험을 통해 아래와 같은 요소가 토양의 열안정도에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.

- (a) 초기수분함유량
- (b) 밀도 및 입자 크기 분포
- (c) 단위 길이당 열전달율
- (d) 열원의 직경

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

### 3. 결 언

이 글에서는 지중송전계통의 설계 및 운용에 필수적으로 수반되어야 할 토양의 열특성 평가를 위해 각각의 열특성이 내포하고 있는 의미, 측정필요성, 측정방법 및 각 특성에 영향을 미치는 요소에 대하여 간략히 기술하였다.

국내에서는 지중송전계통 설계시에 토양의 열특성을 평가한 경험이 없으며, 이는 1976년 까지 지중송전 전압이 66kV급에 제한되어 있었으므로 열특성평가의 필요성이 반감되었기 때문인 것으로 사료되나 지중송전 전압의 경우 1976년 154kV급 지중 송전을 채택한 이래 90년대 초 345kV급 지중송전을 계획하고 있는 등 지중송전 전압의 초고압화 추세에 있다.

따라서 지중송전계통 전압의 초고압화 추세에 발맞추어 안전한 케이블 계통설계 및 적정 송전용량의 결정으로 경제적인 계통운용을 하기위한 보다 적절한 토양의 열특성 평가가 있어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1) Peter Sandiford, "Cable Backfill Materials - State-

of-the-Art", in Underground Cable Thermal Backfill, Pergamon Press, 1982, pp. 3-9

2) M.A. Martin Jr., "Electric Utility Practices, Research and History for Soil Thermal Property Measurements", in Underground Cable Thermal Backfill, Pergamon Press, 1982, pp. 10-15

3) Lawrence A. Salomone, "Improving Geotechnical Investigations for Underground Transmission Line", in Underground Cable Thermal Backfill, Pergamon Press, 1982, pp. 57-71

4) R.W. Allison, C.L.Cheng, K.G.Griffiths and J.S. Jue, "Thermal Resistivities of Ocean Sediments", in Underground Cable Thermal Backfill, Pergamon Press, 1982, pp. 110-228

5) J.E. Steinmanis, "Thermal Property Measurements Using a Thermal Probe", in Underground Cable Thermal Backfill, Pergamon Press, 1982, pp. 72-85

6) (財) 電力中央研究所 送電機能研究委員會, "地中送電", 1965, pp. 18-21

7) 電氣書院, "電氣·電子工學 大百科事典", 1983, pp. 234-236

8) Power Technologies, Inc., "Power Technologies, Inc., Underground Cable System Course", 1987, pp. 61-63

9) James L. Harper and Ted Nishioka, "Arizona Public Service Company Soil Programs Investigations and Methods", in Underground Cable Thermal Backfill, Pergamon Press, 1982, pp. 86-95

10) H.S. Carslaw and J.C. Jager, "Conduction of Heat in Solid", Oxford University Press 2nd ed., 1959

11) W.L. Shannon and W.A. Wells, "Tests for Thermal Diffusivity of Granular Materials", Proceedings ASTM, 1947, pp. 1044-1054

12) Leslie C. Wilbur et al, "Handbook of Energy Systems Engineering", A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY SONS, 1985, pp. 202-223

13) H.S. Radhakrishna and J.E. Steinmanis, "Thermal Resistivity Survey of Lake Erie Sediments for the Ontario Hydro - GPU Interconnection", in Underground Cable Thermal backfill, Pergamon Press, 1982, pp. 96-109

- 
- 14) J.G. Hartley, W.Z. Black, R.A. Bush and M.A. Martin, "Measurement, Correlations and Limitations of Soil Thermal Stability", in *Underground Cable Thermal Backfill*, Pergamon Press, 1982, pp. 121-133
  - 15) S. A. Boggs, F.Y. Chu and H.S. Radhakrishna, "Measurement for Underground Thermal Transmission Design", in *Underground Cable Thermal Backfill*, Pergamon Press, 1982, pp. 134-146
  - 16) EPRI Report, "Soil Thermal Resistivity and Thermal Stability Measuring Instrument", 1981
  - 17) EPRI Report, "Thermal Stability of Soils Adjacent to Underground Transmission Power Cable", 1982