

## 저압 지중케이블의 토양 열저항률 적용에 관한 연구

(A Study on the Apply to Soil Thermal Resistivity of Low-Voltage Underground Power Cables)

이주철\* · 김기현 · 이영철

(Joo-Chul Lee · Ki-Hyun Kim · Young-Chul Lee)

### Abstract

The current-carrying capacities in IEC standards for underground refers to a soil thermal resistivity of  $2.5[\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}]$  where no measured data are available. But this value is considered too conservative and may not justifiable economically as to need precaution in using the value. In this paper, the standard practices on the application of soil thermal resistivity of some countries(UK, USA etc) are surveyed and proposed a reasonable representative value  $1.0[\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}]$  of soil thermal resistivity considering the domestic soil thermal properties with regard to the application of IEC standard.

Key Words : Thermal Resistivity of Soil, IEC Standards, Current-Carrying Capacities

### 1. 서 론

토양의 열저항은 지중케이블의 허용전류를 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 저압전기설비에 관한 국제표준인 IEC 60364-5-52에서는 금속외장이 없는 저압 지중케이블에 대해 실측자료가 없는 경우 토양 열저항률로서  $2.5[\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}]$ 를 채택하여 IEC 60287 표준에 따라 계산한 허용전류 값을 제시하고 있다. 이는 지리 및 토질을 모르는 상황에서 세계 어느 곳에서나 이 값을 사용하는 데는 주의가 필요한 값이다. IEC 60364-5-52에서는 실제의 토양 열저항률이

$2.5[\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}]$ 와 다른 경우에 대한 보정계수를 표 1과 같이 제시하고 있다[1]. 이는 토양의 열저항률이  $1.0[\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}]$ 인 때와 비교하여 지중 덕트매설방법은 18[%], 지중직접매설방법은 50[%]의 여유를 갖는 허용전류 값을 제시하고 있는 것이다.

이를 국내에 적용할 때에는 설치현장의 토양 저항률을 측정하거나, IEC 표준에서 제시하는 값을 참고하여 허용전류를 재계산해야 하는 불편이 있다. 선진국의 경우 각국의 조건에 따른 토양 열저항률의 대표 값을 정하고 국제표준에 등재시켜 설계자가 이를 사용할 수 있도록 하고 있다.

본 논문은 저압 지중케이블의 허용전류를 계산할 때 국제표준에 따른 토양의 열저항률의 보정방식을 국내에 적용하기 위한 방안을 마련하기 위해 국내·외의 토양 열저항률 적용표준을 비교·검토하고 국내 토양 조건을 고려하여 그 적용방안을 제안하였다.

\* 주저자 : 대한전기협회 기술기준처  
Tel : 02-3393-7665, Fax : 02-3393-7689  
E-mail : ljc@electricity.or.kr  
접수일자 : 2012년 3월 21일  
1차심사 : 2012년 3월 23일  
심사완료 : 2012년 4월 12일

표 1. 지중직접매설 또는 지중덕트에 시설한 케이블의 토양 열저항률이 2.5 (K·m/W) 이외인 경우의 보정계수

Table 1. Correction factors for cables in buried direct in the ground or in buried ducts for soil thermal resistivities other than 2.5(K·m/W)

열 저항률 [K·m/W]	0.5	0.7	1	1.5	2	2.5	3
매설덕트 내에 케이블 보정계수 (매설깊이 0.8[m])	1.28	1.20	1.18	1.1	1.05	1	0.96
직접매설 케이블 보정계수	1.88	1.62	1.5	1.28	1.12	1	0.90

## 2. 본 론

### 2.1 케이블 방열회로

상시 허용전류는 정상상태에서 도체온도가 최고 허용온도로 유지하도록 허용하는 100 [%] 부하율의 연속 허용전류를 말하며, 이때 정상상태란 충분히 긴 시간 동안 전압이 인가되어 유전체 손실에 의한 온도의 과도 상승이 없으며, 케이블 주변 매질이 안정화된 상태를 말한다. 상시 허용전류를 계산하기 위한 열회로는 그림 1과 같이 전기회로로 등가화 시킬 수 있다.

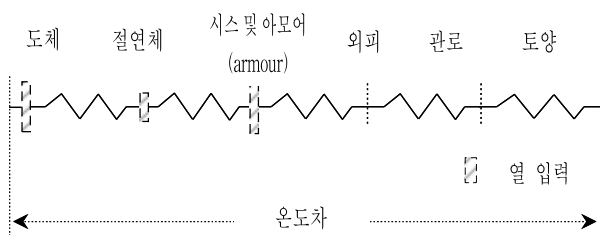


그림 1. 지중 매설 케이블의 열회로  
Fig. 1. Thermal Circuit of underground cable

### 2.2 전류용량 산정시 고려되어야 하는 토양 열특성의 종류

그림 1의 열회로에서 지중 전력케이블의 설계 및 운용에 고려되어야 하는 토양의 열특성은 토양의 열저

항률, 토양의 열확산율 및 토양의 열안정도 등이 있다.

#### 2.2.1 토양 열저항률

토양 열저항률은 한 변의 길이가 1[m]인 정육면체의 토양의 한 면에서 다른 면으로 1[W]의 열을 전도시키기 위해서 필요한 양면의 온도차[K]를 말하며, 단위는 [K·m/W]를 사용한다.

토양 열저항률은 토양의 구성성분, 밀도 및 수분함량에 큰 영향을 받으며, 표 1에서 보는바와 같이 허용전류는 토양 열저항률에 따라 크게 달라진다.

#### 2.2.2 토양 열확산율

토양 열확산율은 토양 내부에 서로 다른 온도분포가 있을 때 전체 계의 온도는 시간이 지날수록 평형상태에 도달하게 되는데 이때 온도분포를 균일하게 하는 토양의 특성을 말하며, 단위는 [cm<sup>2</sup>/sec]이다.

토양의 열저항률과 열확산율의 관계는 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서 C : 비열 [J/g·K]

$\rho$  : 토양의 열저항률 [K·cm/W]

$\delta$  : 토양의 열확산율 [cm<sup>2</sup>/sec]

$\sigma$  : 용적밀도 [g/cm<sup>3</sup>]

식 (1)에서 보는바와 같이 임의의 토양에 대하여 비열이 일정할 경우 토양의 열확산율은 토양의 열저항률 및 용적밀도에 반비례함을 알 수 있다.

#### 2.2.2 토양 열안정도

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 온도구배에 의해 토양은 열적으로 불안정하게 되는 건조과정이 일어난다. 이 건조과정은 수분함량과 건조율, 토양 열저항률의 관계에 따라 열적 안정상태와 열적 불안정상태로 구분된다.

토양의 열안정도는 실험이나 경험을 통해 초기 수분 함량, 밀도 및 입자크기분포, 케이블 간격 등에 의해 영향을 받는 것으로 밝혀졌다[2].

### 2.3 국내 · 외의 토양 열저항률

#### 2.3.1 국내 토양 열저항률 규정

한국전력공사 설계기준에서 토양 열저항률에 관한 사항을 정하고 있다. 이 기준에서 전력케이블 허용전류 계산은 IEC 60287의 방식을 채택하고 있으며, 토양의 열저항률은 지중배전선로 1.2[K·m/W], 지중송전선로 0.9[K·m/W]로 정하고 있다[3]. 또한 2006판 내선규정에서는 습지 0.6[K·m/W], 보통지 1.0[K·m/W], 건조지 1.5[K·m/W]로 정하고 있는데[4] 이는 일본의 내선규정의 값과 동일하다.

#### 2.3.2 IEC 표준의 토양 열저항률

토양의 열저항은 토양의 수분 함량에 매우 민감하고 시간이 지남에 따라 매우 다를 수 있으며, 토양의 종류, 지형과 기상조건에 따라 달라진다.

IEC에서는 기준주위온도와 토양의 열저항에 대한 국가표준이 없는 경우 표 2와 같은 조건에서 표 3의 값을 채택할 것을 권장하고 있다. 이 때 전류정격은 주어진 최대온도에 대해 유효해야 하고, 낮은 값은 겨울철에 요구되며, 이 값은 겨울과 여름, 건기와 우기철의 온도와의 연관성이 있다. 포설 깊이에 관한 정보가 없을 경우 표준 깊이는 1[m]로 한다[5].

표 2. 해수면에서의 주위온도  
Table 2. Ambient temperatures at sea level

기후	기중 주위온도, [°C]		깊이 1[m]에서의 지중 주위온도[°C]	
	최저	최고	최저	최고
열대	25	55	25	40
아열대	10	40	15	30
온대	0	25	10	20

한국의 경우 장기적 해수면 기준 대기온도는 평균 17.1[°C], 최대 30[°C], 최소 1[°C]이다[6].

표 3. 토양 열저항률  
Table 3. Thermal resistivity of soil

열저항률, [K·m/W]	토양 조건	기후 조건
0.7	매우 젖음(Very moist)	습기 지속
1.0	젖음(Moist)	주기적 강우
2.0	건조(Dry)	드물게 비
3.0	매우 건조(Very dry)	조금, 비가 오지 않음

주요국가의 토양 열저항률에 관한 대표적인 조건은 표 4와 같다. 영국에서는 모든 배전케이블 설치에서 토양이 젖거나 꽤 축축한 상태로 유지되는 것을 알 수 있는 경우에는 0.8~1.0[K·m/W]의 채택이 합리적이며, 토양이 항상 젖어 있지 않는 일반적인 경우이지만 점토(clay)나 찰흙(loam)의 토양 열저항률의 대표 값은 1.2[K·m/W]가 적정하다고 하고 있다[7].

표 4. 주요국가의 대표적인 조건  
Table 4. Representative conditions of major countries

국명	기중주위 온도[°C]		지중주위 온도[°C]		토양 열저항률, [K·m/W]	매설 깊이 [m] (1[kV]이하)
	최고	최저	최고	최저		
캐나다	40	-40	20	-5	1.2 (평균 0.9)	0.9
프랑스	30 <sup>a</sup>	20 <sup>b</sup>	20 <sup>a</sup>	10 <sup>b</sup>	1.2 <sup>a</sup> , 0.85 <sup>b</sup>	-
독일	30	-20~+20 평균	20	0	1.0	0.7
일본	40 <sup>a</sup>	30 <sup>b</sup>	25 <sup>a</sup>	15 <sup>b</sup>	1.0	1.2
영국	25(옥외), 30(건물 내)		15		1.2	0.5
미국	40		20		0.9	0.9

주) a: 여름, b: 겨울

#### 2.3.3 부하의 특성에 따른 토양 열저항률

영국의 ERA(Electrical Research Association)에서는 부하 특성이 다른 3가지 형태, 즉 연중 부하가 일정한 케이블, 여름에 부하가 최대인 케이블 및 겨울에 부하가 최대인 케이블에 대한 토양의 열저항률을 표 5~표 7과 같이 권장 값을 제시하고 있다[5,7].

**표 5. Type A - 연중 부하가 일정한 케이블**  
**Table 5. Type A - cables carrying constant load throughout the year**

토양 물질	토양 열저항률[K · m/W]
아래 물질을 제외한 모든 토양	1.5 <sup>(주)</sup>
부서진 백악질로 메운 백악 토양	1.2
이탄(泥炭, Peat)	1.2
돌밭 또는 자갈층	1.5
배수가 잘되는 모래	2.5
인공 토양	1.8

(주) 콘크리트, 아스팔트 등 불침투성으로 덮인 경우 1.2

**표 6. Type B - 여름이 최대이고 다양한 부하인 케이블**  
**Table 6. Type B - cables with varying load and maximum in summer**

토양 물질	토양 열저항률[K · m/W]
아래 물질을 제외한 모든 토양	1.2 <sup>(주)</sup>
부서진 백악질로 메운 토양	1.3
배수가 잘되는 모래	2.0
인공 토양	1.6

(주) 불침투성 물질과 부서진 백악으로 메운 백악토양은 1.0.

**표 7. Type C - 겨울이 최대이고 다양한 부하인 케이블**  
**Table 7. Type C - cables with varying load and maximum in winter**

토양 물질	토양 열저항률[K · m/W]
아래 물질을 제외한 모든 토양	1.0
점토	0.9
부서진 백악질로 메운 백악 토양	1.2
배수가 잘되는 모래	1.5
인공 토양	1.2

2.3.4 IEEE 표준의 토양 열저항률

IEEE에서는 토양물질에 따른 토양 열저항률 값을 표 8과 같이 제시하고 있다[8]. 또한, 찰흙이나 점토질 토양이 일반적인 수분함량일 때에 통상 사용할 수 있는 값은 0.6 ~ 1.2[K · m/W]이고, 토양의 열저항률을 알 수 없을 때의 값으로 0.9[K · m/W]

를 제안하고 있다[9].

**표 8. 여러 토양의 열저항률**  
**Table 8. The thermal resistivity of various soil materials**

토양 물질(Soil Material)	토양 열저항률[K · m/W]
석영입자(Quartz Grains)	0.11
화강암입자(Granite Grains)	0.26
석회암입자(Limestone Grains)	0.45
사암입자(Sandstone Grains)	0.58
운모입자(Mica Grains)	1.70
물(Water)	1.65
유기질(Organic)	4.0 Wet - 7.0 Dry
공기(Air)	40

2.4 국내의 토양 열특성을 고려한 토양 열저항률의 제안

2.4.1 국내의 토양 열특성

기상청이 국내 66개 지점에서 1975~1989년에 걸쳐 측정된 토양온도자료를 이용하여 땅속 깊이 50[cm]까지의 토양에 대한 조사결과에 따르면 우리나라는 0~10[cm] 깊이에서의 토양은 사양토(sandy loam)가 52[%], 양토 또는 미사질양토(loamy sand or sand)가 38[%] 그리고 식양토 및 미사질식토(loam and silty loam)가 10[%]로 구성되어 있다. 토양의 성질은 토양의 깊이에 따라서 달라지는데 대부분 토양의 성질이 표면 부근의 토양과 유사하지만 깊이가 깊어지면 표면 부근 토양에 비해 유기물 함량이 적고 모래 양이 적으며, 용적밀도가 높다. 땅속 깊이 30[cm]~50[cm] 토양에서 토양의 열특성과 관계가 깊은 용적밀도는 사질토 1.46[g/cm<sup>3</sup>], 식질토 평균 1.32[g/cm<sup>3</sup>]이고, 토양의 열확산계수는 사질토가 7.72×10<sup>-3</sup>[cm<sup>2</sup>/sec], 식질토가 4.65×10<sup>-3</sup>[cm<sup>2</sup>/sec]이며, 평균 6.81×10<sup>-3</sup>[cm<sup>2</sup>/sec], 1.54×10<sup>-3</sup>~16.12×10<sup>-3</sup>[cm<sup>2</sup>/sec]의 범위를 나타냈다[10].

토양의 비열을 건조상태 0.8[J/g · K], 젖은 상태 1.84[J/g · K]를[11] 적용하여 사질토와 식질토의 토양특성을 식 (1)에 대입하였을 때 국내의 토양 열

저항률은 표 9와 같이 0.5~2.02[K · m/W] 범위의 것으로 나타났다.

**표 9. 국내 토양 열저항률**  
Table 9. The thermal resistivity of domestic soil

토양 물질	용적 밀도 [g/cm <sup>3</sup> ]	열확산 계수 [cm <sup>2</sup> /sec]	열저항률, [K · m/W]	
			젖은 토양	건조 토양
사질토 (Sandy loam, Loamy sand, sand)	1.46	7.72×10 <sup>-3</sup>	0.5	1.1
식질토	1.33	4.65×10 <sup>-3</sup>	0.88	2.02

2.4.2 토양 열저항률 비교분석

국내의 토양 열저항률에 관한 연구가 매우 부족한 상황에서 현장에 적용할 수 있는 값을 정하기가 매우 어렵다. 가장 좋은 방법은 각 설치현장의 토양특성을 측정하여 적용하는 것이지만, 국제표준 등에서 제시하고 있는 값과 국내의 제한적인 연구결과를 비교·분석하여 다음과 같이 적용방안을 제시한다.

국내의 토양은 모래에 진흙이 비교적 적게 섞인 보드라운 흙으로 공기와 물의 유통이 좋은 사양토와 점토가 25~37.5[%] 정도 함유된 흙, 그리고 점토와 같이 고온 입자가 사질토에 비해 많이 함유된 미사질양토가 전국토양의 90[%]를 차지하고 있다는 점에서 IEEE에서 통상 사용할 수 있는 값으로 제시하고 있는 0.6~1.2[K · m/W]와 유사할 것으로 본다. 실제로 열확산계수의 평균 값 6.81×10<sup>-3</sup>[cm<sup>2</sup>/sec]를 적용했을 경우 국내의 토양 열저항률은 0.55~1.38[K · m/W] 범위이고, 국내에서 일부지역 선로주변 토양에 대해 실제 측정된 결과 1.0[K · m/W] 이하로 나타났으며[12], 전체적인 지중토양의 열확산계수는 6.714×10<sup>-3</sup>~9.249×10<sup>-3</sup>[cm<sup>2</sup>/sec]범위로 나타났다[13].

또한 영국에서 토양이 항상 젖어 있지 않는 일반적인 경우로서 점토(clay)나 찰흙(loam)의 토양 열저항률의 대표 값은 1.2[K · m/W]가 적정하다고 하는 것과, IEC에서 기준주위온도와 토양의 열저항에 대한 국가표준이 없는 경우 표 2와 같은 조건에서 표 3의 값을 채택할 것을 권장하고 있고, 국내 일부지역(수원,

춘천) 기상청에서 제공하는 일평균 수분함량이 약 5~25[%]로 습윤 토양으로 볼 수 있음을[13] 감안하여, 현장의 토양특성에 따라 다르지만 일반적인 함수량일 때, 토양 열저항률의 대표 값으로 1.0[K · m/W]를 제안하고, 젖은 상태 토양의 경우 0.6[K · m/W], 건조 상태 토양의 경우 1.5[K · m/W] 그리고 일반적인 경우로서 토양특성에 관한 정보가 없을 때는 1.2[K · m/W]를 적용하는 것이 합리적이라고 생각한다.

현장적용의 편의를 위해 표 1에 토양 열저항률 1.2[K · m/W]의 보정계수를 추가하여 표 10에 제시하였다[1,14].

**표 10. 지중직접매설 또는 지중덕트에 시설한 케이블의 토양 열저항률이 2.5(K · m/W) 이외인 보정계수**

Table 10. Correction factors for cables in buried direct in the ground or in buried ducts for soil thermal resistivities other than 2.5 [K · m/W]

열 저항률 [K · m/W]	0.5	0.7	1	1.2	1.5	2	2.5	3
매설덕트 내 케이블 보정계수 (매설깊이 0.8[m])	1.28	1.20	1.18	1.13	1.1	1.05	1	0.96
직접매설 케이블 보정계수	1.88	1.62	1.5	1.40	1.28	1.12	1	0.90

3. 결 론

본 연구는 토양 열저항률에 관한 유럽과 미국 등 관련 국제표준을 비교·검토하였으며, 일반적으로 영국은 1.2[K · m/W], 독일 1.0[K · m/W], 미국 0.9[K · m/W], 일본은 1.0[K · m/W]를 사용하고 있다.

IEC 표준을 국내에 적용하기 위한 방안으로는 설치현장의 토양특성을 측정하여 적용하는 것이 바람직하지만 일반적인 함수량일 때 토양 열저항률의 대표 값으로 1.0[K · m/W]를 적용하고, 젖은 상태 토양의 경우 0.6[K · m/W], 건조 상태 토양의 경우 1.5[K · m/W] 그리고 일반적인 경우로서 토양특성에 관한 정보가 없을 때는 1.2[K · m/W]를 적용하는 것이 합리적이다. 표 1에 토양 열저항률 1.2[K · m/W]의 보정계

수를 추가하여 표 10에 제시하였다.

향후 지중케이블의 전류용량을 적정하게 경제적으로 산정하기 위해서는 국내실정에 적합한 토양 열저항률 값에 관한 연구가 시급히 필요하다.

본 연구는 국토해양부 R&D정책인프라 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

- [1] IEC 60364-5-52, Low-voltage electrical installations -Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment - Wiring systems, 2009.
- [2] 이종범, 김대경, “지중송전계통 구성시에 고려하여야 할 토양의 특성”, 전기학회지 37권 10호, 1988.
- [3] “Design Standards(Part of Underground Line)”, Korea Electric Power Corporation, 2003.
- [4] “Consumer’s Electrical Installation Guide Ed. 2006”, Korea Electric Association, p726, 2008.
- [5] IEC 60287-3-1, “Electric cables-Calculation of the current rating Part 3-1:Sections on operating conditions Reference operating conditions and selection of cable type”, 1999.
- [6] www.sea-temperature.com
- [7] “Electric cable handbook”, Blackwell, p136-137, 1997.
- [8] IEEE Std 442-1981, “IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements”, p2, 1981.
- [9] IEEE Std 525-1992, “IEEE Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations”, p26, 2007.
- [10] Kwan-Cheol Song, Yeong-Sang Jung, Byung-Chan Kim, Yoon-Soo Ahn, and Ki-Tae Um, “Physical Properties and Apparent Thermal Diffusivity of the Soils where Soil Temperature is Measured Regularly”, KOREAN SOC. SOIL SCI. FERT. Vol. 25(3) : 220-230, 1992.
- [11] “Handbook of Heat Transfer Ed. 3”, MCGRAW-HILL, 1998.
- [12] J. W. Kang, S.B. Cho, T.I. Jang, H.H Yoon, D.K Kim, S.H. Jeong, S.B. Choi, “A Study on the Soil Thermal Property Measurement for the Current Carrying Capacity Evaluation of Underground Transmission Power Cables”, Conference on The Korean Institute of Electrical Engineers, Summer-2000.
- [13] Byonghu Sohn, “Evaluation of Ground Temperature and Soil Thermal Diffusivity Using the Soil Temperature Data of KMA”, Korea Society of Geothermal Energy Engineers Vol. 7, No1, p1~9, 2011.
- [14] BS 7671:2008 Amendment No 1, “Requirements for Electrical Installations”, Appendix 4, IET, 2011.

### ◆ 저자소개 ◆



**이주철 (李柱喆)**

1960년 6월 4일생. 1994년 서울과학기술대 졸업. 2010년 서울시립대 전자전기공학과 석사 과정. 1988~2001년 한국전기안전공사 근무. 2001년~현재 대한전기협회 기술기준처 실장.



**김기현 (金基鉉)**

1971년 5월 1일생. 1997년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 졸업(석사). 2007년 동 대학원 졸업(박사). 2003~2011년 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원 근무. 전기안전기술사. 2011년 11월~현재 대한전기협회 기술기준처 부장.



**이영철 (李永哲)**

1952년 6월 11일생. 1972년 조선이공대. 1993년 광주대 전기공학과 졸업 1996년 전남대 전기공학과 졸업(석사). 1979~2011년 한국전기안전공사 전기안전교육원 원장 근무. 건축전기설비기술사. 전기안전기술사. 2011년 10월~현재 대한전기협회 기술기준처 연구위원.