우리나라 실정에 맞는 전력구에 대한 외부열저항 계산식에 관한 연구

정성환° , 김대경*, 최상봉*, 배정효*, 하태현*, 이현구*, 곽방명#, 윤형희#, 강지원#
한국전기연구소° *, 한국전력공사#

A Study on an External Thermal Resistance Equation of Underground Tunnel in Korea

S. H. Jeong° D. K. Kim* S. B. Choi* J. H. Bae* T. H. Ha* H. G. Lee* B.M. Gwag# H.H. Yoon# J. W. Kang#,
Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)° *, KEPCO#

Abstract - This paper compares some calculation equations of the external thermal resistance in underground tunnel. As result, this paper suggests the external thermal resistance equation suitable for Korea's underground tunnel

1. 서 론

전력케이블의 송전용량은 주어진 부하 전류에 대하여 도체온도를 결정하거나 주어진 도체온도에 대하여 허용할 수 있는 부하전류를 결정하는데 중요한 두 가지 역할을 한다. 이러한 작업을 수행하기 위하여 케이블 내에서 발생하는 열과 주어진 도체의 매질과 부하에 대하여 도체로 부터 방산되는 비율을 계산하여야 한다. 열을 얼마나 방산시킬 수 있느냐에 대한 주면 배질의 능력은 전력케이블의 송전용량을 결정하는데 중요한 역할을 하며, 토양의 구성성분, 수분함량, 주변 온도 및 풍속등에 의해 변한다.

전력 케이블의 도체, 시스 및 절연체에서 발생한 열은 상대적으로 온도가 높은 도체에서 온도가 낮은 케이블 표면까지 전도에 의해 열 전달이 이루어진다. 전력구 내부에서 케이블 표면에 도달한 열에너지는 전력구 내부에 있는 공기에 의해 다양한 열 전달 메카니즘으로 전력구 내벽까지 전달된다. 전력구 내벽에 전달된 열에너지는 전력구 내벽에서 외벽 그리고 전력구 외벽에서 토양까지 전도에 의해 열전달이 이루어진다.

전력 케이블의 허용전류는 일사의 영향 유무에 따라 식(1.1)과 식(1.2)에 의해 계산되고 있다. 본 논문에서는 공기중에 부설되어 있는 전력케이블의 허용전류를 계산할 때 외부 열저항 계산식에 대한 다양한 수식을 살펴보고 우리나라 실정에 맞은 계산 방식에 대하여 살펴보았다.

▣ 일사의 영향이 없는 경우

$$I = F_g \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d\left[\frac{1}{2}T_1 + n(T_2+T_3+T_4)\right]}{R\left[T_1 + n(1+\lambda_1)T_2 + n(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)\right]}} \quad (1.1)$$

여기서, F_g : 대기중 포설시 다회선 포설에 의한 허용전류 저감 계수
T_4 : 케이블 표면에서 주변온도까지 외부열저항 〔 K-m/W〕

▣ 일사의 영향이 있는 경우

$$I = F_g \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d\left[\frac{1}{2}T_1 + n(T_2+T_3+T_4^*)\right] - \sigma D_e^* H T_4^*}{R\left[T_1 + n(1+\lambda_1)T_2 + n(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4^*)\right]}} \quad (1.2)$$

여기서, σ : 케이블 표면의 복사계수
De* : 케이블의 외경 〔 m 〕
H : 태양 복사의 세기 〔 W/m² 〕

2. 전력구내부의 외부열저항 계산식

2.1 IEC 287의 외부열저항 계산식

IEC 287에서의 외부열저항 계산식은 다음과 같다.

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e^* h (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad (2.1)$$

여기서, $h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E$: 대류와 방사를 포함한 열교환 계수

여기서, 외부열저항은 일사의 영향이 있을 때와 없을 때 케이블 표면에서의 온도상승분 계산 방식은 달라진다.

2.1.1 일사의 영향이 없을 때

일사의 영향이 없는 경우에는 케이블 표면의 온도상승분 $\Delta\theta_s$의 항 $\Delta\theta_s{}^{1/4}$은 초기값을 $(\Delta\theta_s{}^{1/4})_0 = 2$로 가정하여 $(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4}$가 0.001보다 작아질 때까지 아래 식에 의해 반복법으로 계산된다.

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta'_d}{1 + K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}}\right]^{1/4} \quad (2.2)$$

여기서, $\Delta\theta = \theta_c - \theta_a$

$$\Delta\theta_d' = W_d\left[\left(\frac{1}{1+\lambda_1+\lambda_2} - \frac{1}{2}\right)T_1 - \frac{n\lambda_2 T_2}{1+\lambda_1+\lambda_2}\right]$$

$$K_A = \frac{\pi D_e^* h T}{1+\lambda_1+\lambda_2}$$

$$T = T_1 + (1+\lambda_1)T_2 + (1+\lambda_1+\lambda_2)T_3$$

2.1.2 일사의 영향이 있을 때

일사의 영향이 없을 때와 마찬가지로 일사의 영향이 있을 때의 케이블 표면의 온도상승분 $\Delta\theta_s$의 항 $\Delta\theta_s^{1/4}$은 초기값을 $(\Delta\theta_s^{1/4})_0=2$로 가정하여 $(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4}-(\Delta\theta_s)_n^{1/4}$가 0.001보다 작아질 때까지 아래 식에 의해 반복법으로 계산된다.

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4}=\left[\frac{\Delta\theta+\Delta\theta'_d+\sigma\frac{HK_A}{\pi h}}{1+K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}}\right]^{1/4} \quad (2.3)$$

여기서, σ : 복사계수

H : 일사량 (=1000) [W/㎡]

2.1.3 바람의 영향이 있을 때

일사에 의한 영향에 관계없이 케이블 주변에 바람이 불면 풍속에 의해 열교환 계수가 달라지기 때문에 열 교환 계수 h는 다음과 같이 계산하여 T_4에 대입한다.

h = h_{rad}
+(자연 혹은 강제 대류 또는 혼합형에 의한 열교환 계수)

① 방사에 의한 열교환 계수 h_{rad}

$$h_{rad}=\frac{\sigma\varepsilon[(\theta_s+273)^4-(\theta_a+273)^4]}{\Delta\theta_s} \quad (2.4)$$

② 자연대류에 의한 열교환 계수 $h_{o,n}$

$$h_{o,n}=\frac{k_{air}\,c\,(Gr\cdot\Pr)^m}{D_e^*} \quad (2.5)$$

여기서, k_{air} : 대기의 열전도율

Pr : Prandtl수

$Gr=\frac{D_e^{*3}g\beta(\Delta\theta_s)}{\upsilon^2}$: Grashoff수

c, m : Reynolds 수(=Gr · Pr)에 결정되는 상수

υ : 대기의 viscosity

③ 강제대류에 의한 열교환 계수 $h_{o,f}$

$$h_{o,f}=\frac{k_{air}\,b\,(Re)^p}{D_e^*} \quad (2.6)$$

여기서, $Re=\frac{U\,D_e^*}{\upsilon}$: Reynolds 수

U : 풍속 [m/s]

b, p : Reynolds 수에 결정되는 상수

④ 자연대류와 강제대류가 혼합된 열교환 계수 $h_{o,m}$ (풍속 1m/s이하)

$$h_{o,m}=\frac{k_{air}\,b\,(Re_{eff})^p}{D_e^*} \quad (2.7)$$

여기서, $Re_{eff}=(Re^2+Re_{eq}^2)^{0.5}$

$Re_{eq}=\left[\frac{c\,(Gr\cdot\Pr)^m}{b}\right]^{1/p}$

2.2 Electra의 외부 열저항 계산식

전력구내에서 케이블 도체, 절연체 및 시스에서 발생한 열에너지는 전도에 의해 케이블 표면까지 전달되며 대기중 또는 전력구내에서는 다음과 같은 열 전달 모드로 대기중 혹은 전력구의 내벽으로 전달된다.

① 공기의 흐름에 따라 케이블 길이방향으로 열이 방산되는 강제 대류

② 케이블 직각방향으로 열이 방산되는 자연 대류

③ 케이블 표면에서 전력구 내벽까지의 열 방사

전력구 내벽에 전달된 열에너지는 전력구 내벽에서 외벽 그리고 전력구 외벽에서 토양까지 전도에 의한 열전달이 이루어진다.

2.2.1 강제대류에 대한 케이블 표면의 열저항

강제 대류 (Forced Convection)에 의한 케이블 표면에서의 열저항은 아래와 같이 계산된다.

$$T_{c,f}=\frac{1}{\pi\,h_{c,f}\,D_e^*} \quad (2.8)$$

여기서, $h_{c,f}=\frac{k_{air}\,c\,(Re)^{0.65}}{D_e^*}$

$Re=\frac{U\,D_e^*}{\upsilon}$: Reynolds 수

U : 풍속 [m/s]

c : 케이블 배열에 따른 강제대류에 의한 상수

2.2.2 자연대류에 대한 케이블 표면의 열저항

자연대류(Natural or Free Convection)에 대한 케이블 표면에서의 열저항 계산식은 다음과 같다.

$$T_{c,n}=\frac{1}{\pi\,h_{c,n}\,D_e^*} \quad (2.9)$$

여기서, $h_{c,n}=\frac{k_{air}\,F\,(Gr\cdot\Pr)^p}{D_e^*}$

k_{air} : 대기의 열전도율

Pr : Prandtl수

$Gr=\frac{D_e^{*3}g\beta(\Delta\theta_s)}{\upsilon^2}$: Grashoff수

F, p : Reynolds 수(=Gr · Pr)에 결정되는 상수

υ : 대기의 viscosity

2.2.3 자연대류에 대한 전력구 표면의 열저항

자연대류에 의한 전력구 표면의 열저항 계산은 다음과 같이 계산된다.

$$T_w=\frac{1}{h_w\,A_w} \quad (2.10)$$

여기서, $h_w=\frac{k_{air}\,0.59\,(Gr\cdot\Pr)^{0.25}}{L}$

$Gr=\frac{g\beta(\Delta\theta_w)\,L^3}{\upsilon^2}$: Grashoff수

υ : 대기의 viscosity

L : 전력구의 높이 혹은 전력구의 내경 [m]

A_w : 전력구의 단면적 [㎡]

2.2.3 방사에 대한 열저항 계산식

방사에 의한 열전달에 대한 케이블 표면에서의 열저항 계산식은 아래와 같다.

$$T_{41} = T_r = \frac{\Delta\theta_w}{A_w F_{sw} \sigma_B \left[(\theta_s+273)^4 - (\theta_w+273)^4 \right]} \qquad (2.11)$$

여기서, σ_B : Stefan-Boltzman상수

$$F_{sw} = \left(1 + \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} + \frac{\zeta A_s \sigma_w}{A_w \varepsilon_w}\right)^{-1}$$

$$\zeta = \frac{N}{1 - \frac{N(N-1)\pi A_s}{A_w} \frac{\varepsilon_s \sigma_w}{\varepsilon_w}}$$

$$A_s = \pi D_e^*$$

A_w = 전력구의 높이, 개착식 전력구 [m]

$$A_w = \frac{\pi\left(\frac{D_w}{2}\right)^2}{2}, \text{ 원형 전력구}$$

N : 케이블 수

ε_s, ε_w : 케이블 및 전력구 표면의 반사계수

$\sigma_s = 1 - \varepsilon_s$

$\sigma_w = 1 - \varepsilon_w$

3. 전력구에 대한 외부열저항 계산식

전력구에 대한 외부열저항 계산식은 전력구의 모양에 따라 다음과 같이 계산된다.

3.1 개착식 전력구에 대한 외부열저항 계산식

$$T_{42} = \rho_c \frac{l}{S} \qquad (3.1)$$

여기서, ρ_c : 전력구의 열저항률 [K.m/W]

l : 전력구의 길이 [m]

S : 열에너지가 전달되는 전력구의 단면적 [m^2]

3.1 원형 전력구에 대한 외부열저항 계산식

$$T_{42} = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_t}{D_{ti}}\right] \qquad (3.2)$$

여기서, ρ_c : 토양의 열저항률 [K.m/W]

t_t : 전력구의 두께 [m]

D_{ti} : 전력구의 내경 [m]

[참 고 문 헌]

[1] G. J. Anders, "Rating of Electric Power Cables, Ampacity Computations for Transmission, Distribution and Industrial Applications", IEEE Press, 1997

[2] B.M. Weedy, H.M. El Zayyat, "The Current Carrying Capacity of Power Cables in Tunnel", IEEE PAS Vol-92, No. 1, 1973

[3] CIGRE WG 21.08 "Calculation of Temperatures in Ventilated Cable Tunnels", Electra No. 143, 1992.

[4] IEC 287, "Calculation of the current rating...", 1994

[5] JCS 168E "전력케이블의 許容電流", 일본전선공업협회, 1998