

전력구 부설에 대한 지중 전력 케이블의 허용전류 계산 열 회로에 관한 연구

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

A Study on the Thermal Circuit of Underground Tunnel Installed Power Cables

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 examines the thermal circuit of underground tunnels installed power cables. It can be appreciated to understand the mechanism of heat transfer and to calculate the current carrying capacity of power cables in tunnel.

전도, 대류 및 방사가 있으며 전력구내에서의 각각의 내용은 다음과 같다.

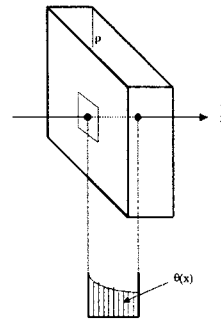
1. 서 론

2.1 전도

전력 케이블의 도체, 시스 및 절연체에서 발생한 열은 상대적으로 온도가 높은 도체에서 온도가 낮은 케이블 표면까지 전도에 의해 열 전달이 이루어진다. 전력케이블이 공기중에 부설되어 있을 때 케이블 표면에 도달한 열에너지는 전력구 내부에 있는 공기에 의해 아래와 같은 다양한 열전달 메카니즘으로 전력구 내벽까지 열전달이 이루어진다.

지중에 설치된 전력케이블의 경우 도체와 금속성 재질 및 절연체에서 발생한 열은 전력케이블 자체는 전도에 의해 케이블 표면까지 전달된다. 전도에 의한 열에너지는 단위시간당 전달되는 에너지의 총량을 표시하는 임의 방정식을 적용하여 계산할 수 있다. 이 방정식은 Fourier 법칙으로 알려져 있다. 그림 (2.1)에서 보는 바와 같이 온도분포 $\theta(x)$ 를 가지는 벽에 대한 열 전달 방정식은 식(2.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$q = -\frac{1}{\rho} \frac{d\theta}{dx} \quad (2-1)$$



그림(2.1) 전도에 의한 열전달 메카니즘

- ① 케이블 직각방향으로 열이 방산되는 자연 대류
 - ② 공기의 흐름에 따라 케이블 길이방향으로 열이 방산되는 강제 대류
 - ③ 케이블 표면에서 전력구 내벽까지의 열 방사
- 전력구 내벽에 전달된 열에너지는 전력구 내벽에서 외벽 그리고 전력구 외벽에서 토양까지 전도에 의해 열전달이 이루어진다.

여기서 열속 $q(W/m')$ 는 열이 전달되는 축에 수직인 단위 면적당 열전달률을 나타내며, 이것은 온도의 차 $d\theta/dx$ 에 비례한다. 비례상수 ρ 는 열저항률($k.m/W$)로 알려진 매질의 열전달 특성을 나타낸다. 음의 부호는 온도를 감소시키는 방향으로 열이 전달된다는 것을 의미한다.

이와 같이 전력케이블에서 발생한 열은 매우 복잡한 열전달 메카니즘으로 토양까지 전달된다. 전력케이블이 공기중에 부설되어 있는 지중 전력 케이블에 대한 허용전류 계산은 전력케이블 표면에서 전력구 내부 및 전력구에서 토양까지의 열 회로를 모의하는 방법에 따라 JCS 168규격과 IEC 287 규격이 약간의 차이가 있으며, 최근 CIGRE WG 08 SC 21에서 발표된 논문에서도 각각 약간씩 표현을 달리하고 있다.

2.2 대류

본 논문에서는 전력구 내부에서 공기에 의해 일어나는 각 종 열전달 메카니즘에 대하여 살펴보고 전력구 부설에 대한 상시 허용전류 계산식을 유도하였다.

공기중에 설치된 케이블의 경우 케이블 표면에서 주변 공기중으로 대류와 방사에 의해 열전달이 이루어진다. 대류에 의한 열전달은 공기의 흐름에 따라 강제대류와 자연대류로 구분할 수 있다. 펌프나 팬과 같이 외부의 수단에 의해 공기의 흐름이 발생하여 대류가 일어나는 것을 강제대류라 하며, 반대로 공기중의 온도변화에 의해 공기의 밀도차가 생겨 부양성 힘(부력)에 의해 공

2. 열전달 메카니즘

전력케이블의 열 회로를 이해해야 하는 가장 중요한 일은 부하전류가 주어질 때 도체온도를 결정해야 하거나 주어진 도체온도에 대하여 허용할 수 있는 부하전류를 결정해야 하기 때문이다. 이러한 작업을 수행하기 위하여 케이블내에서 발생하는 열과 주어진 도체의 매질과 부하에 대하여 도체로부터 방산되는 비율을 계산하여야 한다. 열을 방산시키는 주변 매질의 능력은 전력케이블의 송전용량을 결정하는데 중요한 역할을 하며, 토양의 구성성분, 수분함량, 주변 온도 및 풍속등에 따라 변한다. 전력케이블의 도체, 시스 혹은 절연체에서 발생한 열은 케이블과 주변 매질을 통하여 전달되는 방법에는

기의 흐름이 발생하여 대류가 일어나는 것을 자연대류라 한다. 일반적으로 자연 현상에서는 자연대류와 강제대류 모두 일어난다.

대류에 의한 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$q = h(\theta_s - \theta_{amb}) \quad (2-2)$$

여기서, $q(W/m^2)$ 는 대류에 의한 열속이며 케이블 표면의 온도 θ_s 와 주변 공기의 온도 θ_{amb} 의 온도 차에 비례한다. 위 식을 Newton 법칙이라 하며, 비례상수 $h(W/m^2.K)$ 를 대류에 의한 열전달 계수(convection heat transfer coefficient)라 한다. 대류에 의한 열전달 계수는 공기중에 설치된 케이블에 대한 허용전류 계산시 중요한 값이다. 일반적으로 자연대류인 경우 대류 열전달 계수 h 는 $2 \sim 25 W/m^2.K$ 이고, 강제대류의 경우 대류 열전달 계수 h 는 $25 \sim 250 W/m^2.K$ 이다.

그러나, 케이블의 허용전류를 계산할 때 전력구내 공기는 강제적으로 순환되지 않는 자연대류 조건을 상정하여 계산하고 있다.

2.3 방사

방사는 케이블 또는 덕트 표면이 대기와 같은 주변 매질의 온도보다 훨씬 높을 때 케이블 또는 덕트 표면에서 방산되는 에너지이다. 케이블 표면에서 방산되는 열속은 Stefan-Boltzmann 법칙에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$q = \epsilon \sigma_B \theta_s^{*4} \quad (2-3)$$

여기서, θ_s^* 는 케이블 혹은 덕트 표면에서의 절대온도(K)이며, σ_B 는 Stefan-Boltzmann의 상수($\sigma_B = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$)이다. ϵ 은 케이블 표면의 특성을 나타내는 열 방산율이다. 이 값의 범위는 $0 \leq \epsilon \leq 1$ 이며, 이상적인 방사에 대하여 얼마나 표면이 열 방산을 시킬 수 있는지를 나타낸다.

3. 전력구 부설에서의 허용전류계산식의 유도

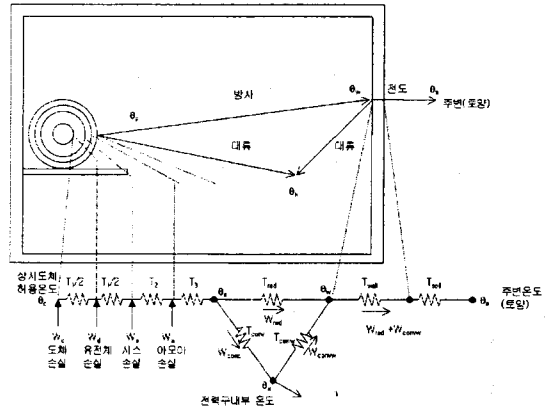
케이블 표면에서 전력구 내벽사이는 방사에 의한 열전달이, 케이블 표면에서 전력구내 공기사이는 대류에 의한 열전달이 그리고 전력구 내벽과 전력구내 공기사이에는 대류에 의한 열전달이 이루어진다. 최종적으로 전력구 내벽에 도달한 열류는 전력구와 토양사이에 전도에 의해 열전달이 이루어진다. 이것을 정리하면 전력구 포설에 대한 열회로는 그림(3-1)과 같다.

다양한 케이블 크기와 그룹화에 의해 발생하는 전체 열을 대류에 의한 열전달의 비로 표현하면 다음과 같다.

$$F = \frac{\text{대류에 의한 열전달}}{\text{전체 열전달}}$$

그림(3-1)에서 대류에 의한 열류 W_{conv} 은 다음과 같다.

$$W_{conv} = \frac{F(W_c + W_d + W_a + W_d)}{F(W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d)} \quad (3.1)$$



그림(3-1) 전력구 부설에 대한 열 회로

또, 방사에 의한 열전달에서 열류는 다음과 같이 계산된다.

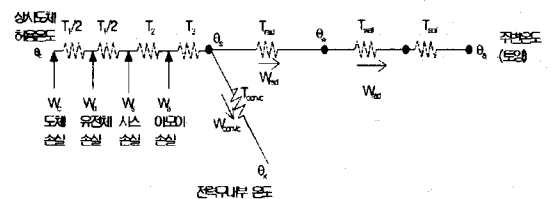
$$W_{rad} = \frac{(1-F)}{F} W_{conv} = (1-F)(W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d) \quad (3.2)$$

그래서, 도체에서 케이블 표면까지의 도체 온도 상승분은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \theta_c - \theta_s &= W_c \frac{T_1}{2} + (W_c + W_d) \frac{T_1}{2} \\ &\quad + (W_c + W_d + W_a) T_2 + (W_c + W_d + W_a + W_d) T_3 \\ &= W_c(T_1 + (1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)T_3) \\ &\quad + W_d(T_1/2 + T_2 + T_3) \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.1 자연대류에서의 허용전류 계산식

자연대류만 있을 때의 전력구에 대한 열회로는 그림 3.2)와 같다. 이때 방사에 의한 열류는 다음과 같이 계산된다.



그림(3.2) 자연대류 조건에서의 전력구에 대한 열회로

그림에서 보는 바와 같이 전력구 내벽의 온도를 θ_w 라 하면 다음 식과 같다.

$$\theta_w = W_{rad}(T_{wall} + T_{soil}) + \theta_a \quad (3.4)$$

여기서, W_{rad} = 방사에 의한 열류 [W/m]
 T_{wall} = 방사열저항 [Ω]
 T_{soil} = 토양의 열저항 [Ω]

케이블 표면의 온도를 θ_s 라 하면 다음과 같다.

$$\theta_s = W_{rad} T_{rad} + \theta_w \quad (3.5)$$

식(3.4)와 식(3.5)를 식(3.3)에 대입하여 도체 온도 상승분을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_c - \theta_a = & W_c \{ T_1 + (1 + \lambda_1) T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) T_3 \\ & + (1 + \lambda_1 + \lambda_2)(1 - F)(T_{rad} + T_{wall} + T_{soil}) \} \\ & + W_d \{ T_1/2 + T_2 + T_3 + (1 - F)(T_{rad} + T_{wall} + T_{soil}) \} \end{aligned} \quad (3.6)$$

따라서, 구하고자 하는 케이블의 허용전류 I는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a - W_d \{ T_1/2 + T_2 + T_3 + (1 - F)(T_{rad} + T_{wall} + T_{soil}) \}}{n R \{ T_1 + (1 + \lambda_1) T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) T_3 + (1 - F)(T_{rad} + T_{wall} + T_{soil}) \}}}$$

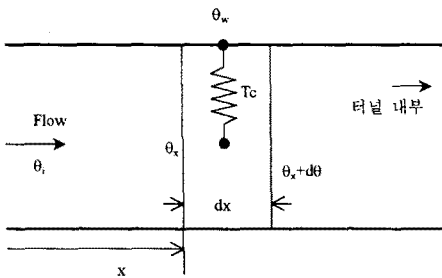
3.2 강제 대류에서의 허용전류 계산식

강제대류는 전력구 길이 방향으로 일정한 속도의 바람이 불 때 케이블 표면에서의 열전달은 바람에 의해 크게 되는데 전력구 입구에서 거리 x만큼 떨어진 곳에서의 대기 온도 상승을 θ_x 라 하면 그림(3.3)과 같은 전력구의 벽면의 온도는 다음과 계산된다. 강제대류에 의한 전력구내의 열회로는 그림(3.4)와 같다.

$$\theta_x = \theta_w + W_{convc} T_c - (W_{convc} T_c - \theta_i + \theta_w) e^{-\lambda x} \quad (3.7)$$

여기서, $\lambda = \frac{1}{T_c \rho c_p A V}$

- θ_i = 전력구 입구의 대기 온도 [°C]
- T_c = 풍속에 의한 대류 열저항 [Ω]
- ρ = 대기의 밀도 [kg/m³]
- c_p = 공기의 비열
- A = 전력구의 단면적 [m²]
- V = 풍속 [m/s]



그림(3.3) 전력구내의 온도

또, 그림(3.3)에서 보는 바와 같이 전력구 내벽의 온도 θ_w 는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_w = (W_{rad} + W_{convw})(T_{wall} + T_{soil}) + \theta_a \quad (3.8)$$

이때, W_{convw} 는 다음과 같이 계산된다.

$$W_{convw} = \frac{\theta_x - \theta_w}{T_c} \quad (3.9)$$

위 식을 다시 정리하면 식(3.10)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \theta_w = & (T_{wall} + T_{soil}) \{ (1 - F) \{ W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d \} \\ & + F \{ W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d \} (1 - e^{-\lambda x}) \} \\ & + \frac{\theta_i}{T_c} e^{-\lambda x} - \frac{\theta_w}{T_c} e^{-\lambda x} \end{aligned} \quad (3.10)$$

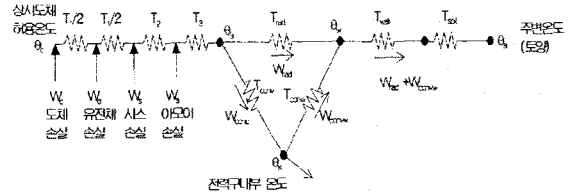
또, 케이블 표면온도 θ_s 는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_s = \theta_x + W_{convc} T_{convc} \quad (3.11)$$

식(3.10)과 식(3.11)을 식(3.3)에 대입하여 도체온도 상승분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_c - \theta_a = & W_c \{ T_1 + (1 + \lambda_1) T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) T_3 \\ & + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \{ (1 - e^{-\lambda x}) (1 - F) (T_{wall} + T_{soil}) \\ & + (1 - e^{-\lambda x}) F T_c \} + T_{convc} F \} \\ & + W_d \{ T_1/2 + T_2 + T_3 + (1 - e^{-\lambda x}) \{ (1 - F) (T_{wall} + T_{soil}) \\ & + F T_c \} + F T_{convc} \} + (1 - e^{-\lambda x}) \theta_a + e^{-\lambda x} \theta_i \end{aligned} \quad (3.12)$$

식(3.12)에서 도체손실의 항을 묶어내면 구하고자 하는 케이블의 허용전류 I항을 계산할 수 있는 수식을 유도할 수 있다.



그림(3.4) 강제 대류를 고려한 전력구에서의 열전달 회로

(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