

고압 XLPE 절연 케이블의 가교공정중의 온도분포 계산에 대한 이론적 고찰

강 태오*, 김 판성, 전 찬오
대한전선(주) 기술연구소

A theoretical investigation on the temperature distribution of XLPE insulated cable for HV during curing process

T.O.Kang*, K.S.Kim, C.O.Cheon
R&D center of Taihan Electric-wire Company

Abstract

XLPE cable, which has excellent electrical and thermal performance, has been widely used for HV transmission & distribution lines. The most important thing to produce the cable products having good performance is to set the optimal operating conditions of cable machinery.

Because it is very difficult to measure the temperature of cable under curing process practically, it is necessary to evaluate the cable temperature by using the method to simulate real conditions numerically.

In this work, We investigate the basic theory on transient heat transfer between curing tube and cable for making a numerical simulation program using computer. In this program, a differential equation is approximated by a infinite differential method and a few assumptions are used to simplify the model and minimize the calculation time of program.

1. 서 론

XLPE 절연 케이블의 dry curing process 의 핵심은 curing tube 와 케이블의 온도를 정확하게 제어하는 것인데, 과거에는 실제적인 경험을 통해서 가교설비의 동작조건을 결정해 왔다. 그러나, 이 방법은 새로운 절연재료를 사용하거나, 크기가 다양한 케이블을 생산하고자 할 때, curing tube 내의 온도분포를 정확히 예측하기가 힘들기 때문에 비효율적인 설비동작이나 재료의 손실등을 야기시켜 왔다¹⁾.

따라서, 이러한 난점을 해결하기 위해서 최근 curing process 를 수치적으로 simulation 하여 케이블의 온도분포와 가교상태를 예측하는 방법이 소개되고 있으며^{2,3)}, curing line 을 따라 케이블의 온도분포와 가교상태를 정확하게 평가할 수 있는 방법으로 점차 인정받고 있다.

본 연구에서는 이러한 numerical simulation program 을 개발할 목적으로 curing tube 와 XLPE 케이블간의 열전달에 대한 기본이론을 검토하여 수학적인 모델을 제시하였고, 그 수식을 유한차분식으로 근사화하여 컴퓨터 program 에 적용하였다. Numerical simulation program 의 유용성 확인은 차후 케이블의 온도를 실측하여 실시할 예정이다.

2. 열전달 이론

Curing tube 와 케이블간의 열전달은 대류, 복사 그리고 전도에 의해서 이루어지므로 케이블의 온도분포를 알기 위해서는 위의 3 가지 열전달 형태를 모두 포함하고 있는 지배방정식을 유도해야 한다.

2.1 지배방정식의 유도

압출기에서 피복된 케이블이 curing tube 내로 들어가면 온도구배가 발생하게 된다. 단위면적당 열이동량은 그곳에서의 온도구배에 비례한다.

즉,

$$\frac{q}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial r} \tag{1}$$

와 같이 된다.

비례상수를 도입하면,

$$q = -k A \frac{\partial T}{\partial r} \tag{2}$$

여기서, q 는 열이동량, $\partial T / \partial r$ 는 열흐름방향의 온도구배이며, 비례상수 k 는 열전도율이다.

일반적인 경우로서, 온도가 시간과 더불어 변화한다고 생각하자. 절연체내의 두께 dr 의 control volume 에 대해서 다음의 에너지 평형식이 성립한다. 그림 1 은 그 개념도를 나타내고 있다.

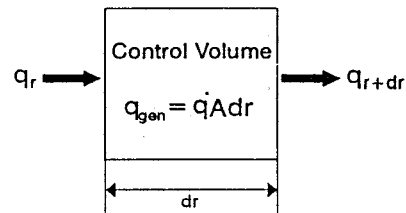


그림 1. 1 차원 열전도해석을 위한 미소요소

$$[\text{Volume 으로 들어오는 열량}] + [\text{발생된 열량}] = [\text{내부에너지 변화}] + [\text{Volume 으로 부터 나가는 열량}]$$

여기서, 이들 에너지량은 각각 다음식으로 표시된다.
Control volume 으로 들어오는 열량,

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial r} \quad (3)$$

Control volume 에서 발생하는 열량,

$$q = \dot{q}Adr \quad (4)$$

내부에너지 변화,

$$q = -\rho CA \frac{\partial T}{\partial t} dr \quad (5)$$

Control volume 으로 부터 나가는 열량

$$q_{r+dr} = -kA \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r+dr} \\ = -A \left[k \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} dr \right) \right] \quad (6)$$

여기서, \dot{q} = 단위체적당 발열량, W/m³

C = 절연재료의 비열, J/kg · °C

ρ = 절연재료의 밀도, kg/m³

위의 관계를 정리하면,

$$-kA \frac{\partial T}{\partial r} + \dot{q}Adr = \rho CA \frac{\partial T}{\partial t} dr \\ -A \left[k \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} dr \right) \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

윗 식에서 절연체내의 에너지발생량 \dot{q} 를 무시한다고 하면, XLPE 절연 케이블에서의 1 차원 과도 열전달 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

여기서 $a = k/\rho C, m^2/s$ 는 절연재료의 열확산율이다.

2.2 경계조건

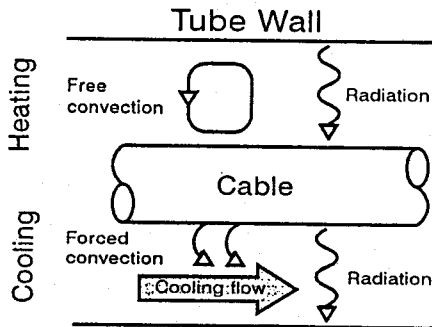


그림 2. 가교관과 케이블간의 열전달

그림 2 와 같이 Curing tube 로 부터 대류와 복사에 의해서 열이 케이블로 전달될 때, 그 표면에서의 경계조건을 고려해야 한다. 경계조건은 열평형식으로 부터 다음과 같이 유도된다.

$$K \frac{\partial T}{\partial R} = h(T_m - T) + FS_r((T + 273.15)^4 - (T_m + 273.15)^4) \quad (10)$$

여기서, R 은 케이블 반경, T_m 은 열매체 온도, T 는 케이블 표면온도, T_r 는 가류관 내벽의 온도, h 는 케이블 표

면에서의 대류열전달 계수이고 F 는 형상계수로 다음과 같이 나타낸다.

$$F = \frac{1}{\frac{1}{E_c} + \left(\frac{R}{R_r}\right) \left(\frac{1}{E_r} - 1\right)} \quad (11)$$

여기서, R_r 는 가류관의 반경, E_c 는 케이블표면의 방사율, E_r 는 가류관의 방사율이다.

2.3 유한차분근사

앞에서 유도한 편미분방정식 (9) 는 유한차분식을 사용하여 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta r)^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (13)$$

아래첨자 i 는 공간증분을 나타낸다. 그리고 윗첨자 n 은 시간증분을 나타낸다. 유한차분근사를 사용함으로써, 어떤 점 i 에서 Δt 시간후의 온도에 대한 방정식은 식 (12), (13) 을 식 (9) 에 대입함으로써 얻어진다. 식을 정리하면 다음과 같다.

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) \quad (14)$$

시간증분 Δt 는 유한요소 크기의, 재료의 열확산율, 그리고 신속한 계산과 정확성을 보장할 수 있는 수렴조건에 따라 선택되며, 그 값이 충분히 작다면 유한차분 근사해는 해석해에 수렴한다.

본 연구에서는 케이블 절연체를 그림 3 과 같이 radial 방향의 미소요소로 분할하였고 각 지점을 연속적인 node 로 표시하였다.

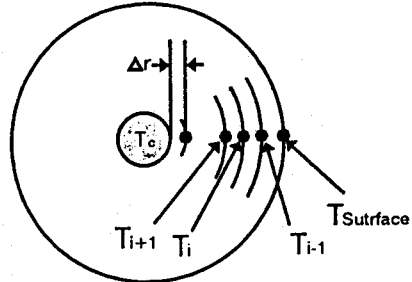


그림 3. 케이블에서의 미소요소 분할

3. 수치계산 Program

3.1 단순가정

과도 열전달 모델을 수치계산 program 에 적용하기 위해서 몇 가지의 단순가정을 고려하였다. 이들 가정은 수치계산 속도를 증가시킬 뿐만 아니라 program 의 유용성을 증가시킨다. 본 연구에서 고려한 가정은 다음과 같다.

- ① 케이블 axial 방향으로의 열전달은 없다.
- ② 도체내부에서 케이블 radial 방향의 온도구배는 없다.
- ③ 케이블은 완전한 축대칭이라고 간주한다.

3.2 수치계산 program 에서 사용되는 parameter

- ① 도체, 절연체, 내·외부 반도전체의 Size
- ② 절연재료의 열전도도, 밀도, 비열, 활성화에너지
- ③ 가류관과 케이블의 복사계수, 열매체와 냉각매체의 대류계수
- ④ 도체, 절연체 초기온도
- ⑤ 가류관·냉각관 온도

3.3 Flow-chart

그림 4 는 Program 의 flow-chart 를 나타내고 있으며, 최적 가교시간을 구하는 수순을 나타내고 있다.

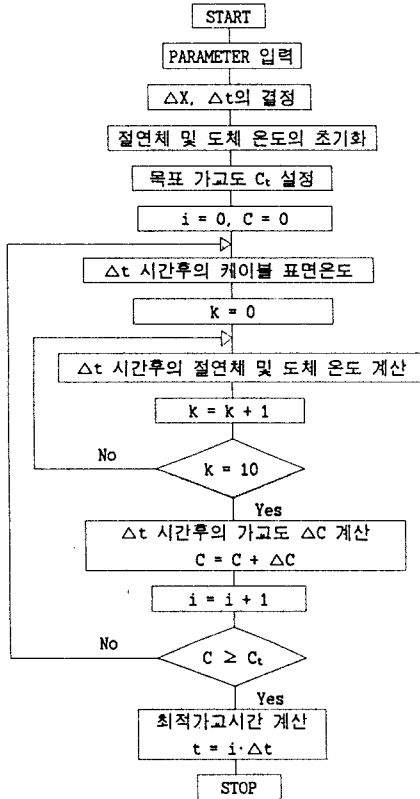


그림 4. 최적가교시간을 계산하는 Program 의 flow-chart

4. 적용사례

그림 5 는 Cu 연선도체의 직경이 12 [mm], 절연두께가 3.6 [mm] 인 케이블의 온도분포를 수치적으로 simulation 한 결과를 나타내고 있다. IBM-PC 486 기종을 이용하여 수치계산을 실시하였다. 그림은 각각 케이블의 표면온도, 절연체의 온도, 금속도체의 온도를 나타내고 있다. 케이블의 표면온도가 1250 [sec] 지점에서 급격히 떨어지고 있는데 이는 케이블이 cooling tube 로 들어갔기 때문이다. 목

표가교지점의 절연체와 금속도체의 온도는 외부의 온도변화에 둔감함을 알 수 있다.

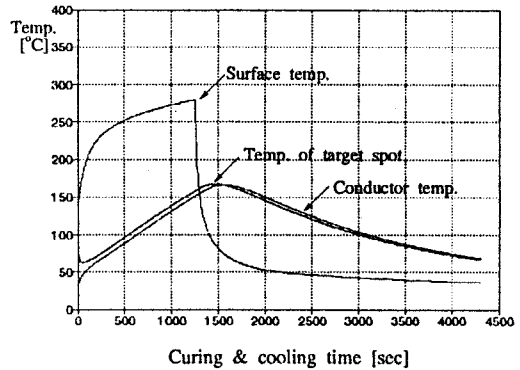


그림 5. 절연체 및 도체온도의 simulation 결과

5. 결 론

본 연구에서는 가교과정중에 일어나는 XLPE 절연 케이블의 온도분포 변화를 예측하기 위해 computer simulation 을 이용하였다.

케이블의 온도분포는 curing tube 와 XLPE 케이블간의 열전달 이론으로부터 유도된 1 차원 과도 전도 열전달 방정식을 유한차분식으로 근사화한 뒤 simulation model 에 적용함으로써 수치적으로 계산할 수 있었다.

Reference

1. C.A. Kodres, " A numerical model to simulate the processing of electrical distribution cables ", IEEE Trans., EI-16, No.6, pp. 483-489, 1981
2. R.C. Kemp, " Estimation of temperatures during dry cross linking of high voltage XLPE insulated cable ", International wire & cable symposium proceedings, pp. 578-582, 1992
3. R.L. Boysen, "An analysis of the continuous vulcanization process for polyethylenes", IEEE Trans., PAS-90, pp. 926-933, 1971