

## 다수의 부구간으로 나누어지는 트로프 간접수냉 전력케이블의 열해석에 관한 연구

### A Study on the Thermal Analysis of Indirect Water Cooled Power Cables Laid within Trough divided into Several Sub-Sections

文 永 鉉\* · 金 白\*\* · 李 台 植\*\*  
(Young-Hyun Moon · Baik Kim · Tae-Shik Lee)

*Abstract* - As the underground area of the metropolitan becomes denser recently, an introduction of forced cooling system is under study to maximize the carrying capacity of existing cables in tunnels. Indirect water cooling system laid within trough will probably be adopted for the next 345KV class underground power cables in this country. The system covers a distance of 1.5 - 3.0Km for one water cooling interval and one water cooling interval is composed of several sub-sections that have different thermal analysis conditions. Thus the distribution of temperature in each sub-section is described by different conditions in general. In this paper a method that can accurately match the temperature of the coolant in the boundary between sub-sections has been suggested. An algorithm to find the temperature distributions effectively in the thermal system has also been presented. A computer program using this method has been tested in a sample system and the results have shown the usefulness of this program.

**Key words** : Thermal Analysis(열해석), Power Cable(전력케이블), Trough(트로프), Indirect Water Cooled(간접수냉), Underground Area(지중상역)

#### 1. 서 론

\*正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 副教授·工博  
\*\*正 會 員 : 延世大 大學院 電氣工學科 博士課程  
接受日字 : 1991年 9月 3日  
1次修正 : 1992年 5月 20日

케이블 강제냉각방식의 종류는 냉매와 케이블의 접촉상태에 따라, 도체 냉각방식, 표면 냉각방식

및 외부 냉각방식으로 분류되며 냉매의 종류에 따라 풍냉, 수냉, 유냉(gas 냉)으로 구분하고 있다.

일반적으로 냉매로서는 물을 사용하는데 물은 비교적 비열이 크므로 높은 냉각효과를 얻을 수 있으며 환경공해나 방화측면에서도 이점이 있기 때문이다. 한편 냉각방식 측면으로는 도체 냉각방식이 발열체와 냉매가 직접 접촉한다는 점에서 가장 높은 냉각효과를 얻을 수 있으나 케이블 제조 공정상 어려움이 있으며 표면 냉각방식의 경우 현재 사용하는 케이블을 사용할 수 있으며 냉매가 케이블 외피에 접촉하므로 비교적 높은 냉각효과를 얻을 수 있으나 이 역시 보수측면에서 문제가 있다.

따라서 현재 실용화 하기에 가장 유력한 냉각방식으로는 물을 냉매로 하는 외부냉각방식으로 본 논문에서 기술한 트로프 간접수냉방식도 이 방식에 속한다. 트로프 간접수냉방식의 경우 공급되는 냉매를 귀로관을 통하여 냉각기지로 순환시키는 폐회로 계통의 냉각설비를 채택하는데 간략화된 모델에서는 이 귀로관의 열저항을 무시하고 있으며 귀로관의 열저항을 고려한 상세한 모델과 해석방법이 일련의 논문[1~4]에 발표되어 있다. 그러나 냉각방식의 종류 및 그 해석방법의 원론을 기술하는데 그치고 있거나, 1냉각구간의 열해석 조건이 틀린 다수의 부구간으로 구분되는 경우에 각 부구간의 온도방정식을 구하기 위하여 반복계산법을 적용하여, 그 구간의 수가 많고 냉각관의 종류가 다양한 경우에 각 부구간의 경계면에서 냉매의 온도를 일치시키기 어렵다는 단점이 있어 이를 이용하여 실제 냉각설비를 설계하기에는 미흡한 점이 있다고 여겨진다. 본 논문에서는 트로프 간접 수냉방식의 열등가모델을 이용하여 이를 일반화한 열평형 방정식을 유도하고 해법을 기술하였으며 매 부구간 마다의 열해석조건(2차계 케이블의 종류 및 수, 전력구 열저항, 풍냉의 유무 및 풍향 등)이 다른 경우에 각 부구간에서의 정확한 온도분포를 구하기 위하여 미정계수의 연립방정식을 푸는 방법을 적용하였다. 또한 이를 이용한 전산프로그램을 작성하였으며 표본계통에 적용하여 얻은 결과를 검토하였다.

## 2. 열등가 모델 및 열평형 방정식

### 2.1 열등가 모델

트로프 간접수냉방식의 개요를 그림 1에 도시하였다.

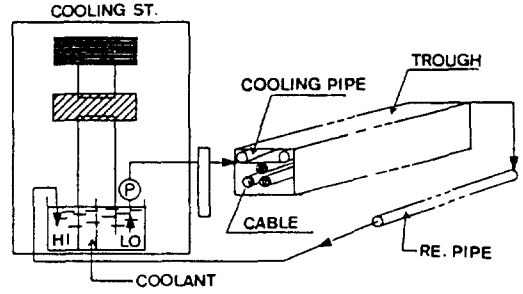


그림 1 트로프 간접수냉방식의 개요도  
Fig. 1 Description of Indirect Water Cooling System Laid within Trough

여기서 공급되는 냉매는 트로프안에 설치된 공급관을 통하여 흐르며 공급관의 종점에는 케이블의 발생열을 흡수하여 온도가 상승한 냉매를 냉각기지로 되돌려 보내는 귀로관이 트로프 외부에 연결되어 있다. 냉각기지에서는 열교환이 이루어지고 적정 공급온도로 낮춰진 냉매는 다시 공급관으로 전송되는 폐회로 계통으로 되어 있다.

일반적으로 강제냉각방식의 열해석에는 열저항을 사용한 열등가회로가 사용되는데 이는 열량  $W$ 를 전류  $I$ 에, 온도  $T$ 를 전압  $V$ 에 상사(analogy)시켜  $W$ 와  $T$ 는 선형관계에 있다고 보고  $T = W \cdot R$ 로 하여 열저항  $R$ 을 정의한 것이다. 열저항을 사용하게 되면 고려하는 계통을 열등가회로로

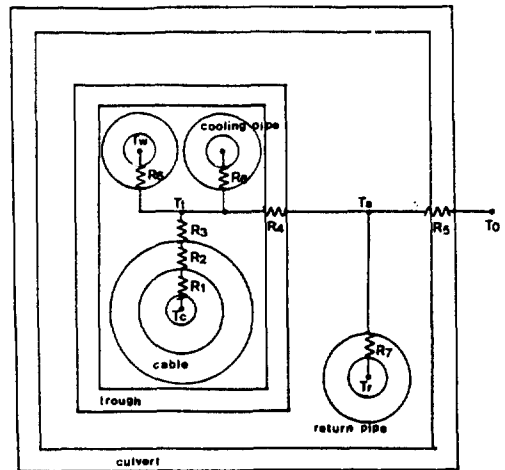


그림 2 트로프 간접수냉방식의 열등가 모델  
Fig. 2 Thermal Equivalent Model of Indirect Water Cooling System Laid within Trough

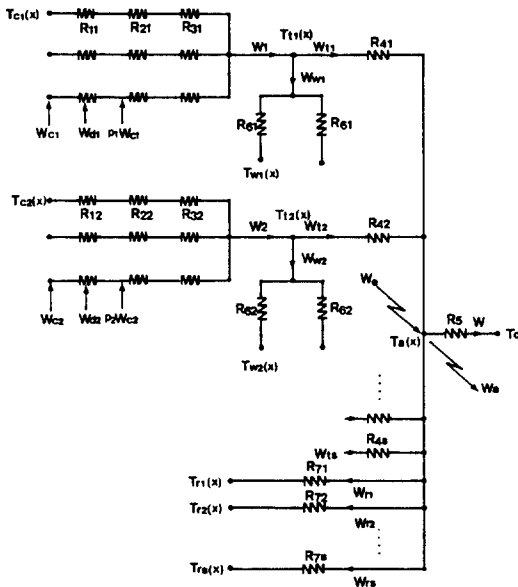


그림 3 S조의 트로프 간접수냉방식 열등가회로도  
 Fig. 3 Thermal Equivalent Circuit of S-sets of Indirect Water Cooling System Laid within Trough

쉽게 변경시킬 수 있으며 계산결과도 정상상태에서는 무리가 없는 것으로 알려져 있다. [5]

그림 2는 트로프 간접수냉방식을 열등가모델로 도시한 것이며 이를 일반화 시킨 열등가회로는 그림 3에 나타났다.

여기서 그림 3에 쓰인 용어를 설명하면 다음과 같다.

- $R_{1i}, R_{2i}, R_{3i}$  : 케이블 절연체, 방식층, 표면방산 열저항
- $R_{4i}, R_{5i}, R_{6i}, R_{7i}$  : 트로프, 전력구, 공급관, 귀로관 열저항
- $T_0$  : 기저온도
- $T_{ci}(x)$  :  $x$ 지점에서의 케이블 도체온도
- $T_{ti}(x), T_a(x)$  :  $x$ 지점에서의 트로프, 전력구 내 부온도
- $T_{wi}(x), T_{ri}(x)$  :  $x$ 지점에서의 공급냉각수, 귀환 냉각수 온도
- $W_i$  : 트로프내 케이블 발생열량
- $W_{ci}, W_{di}, P, W_{ci}$  : 도체, 유전체, sheath 발생열량
- $W_e$  : 2차계 발생열량
- $W_a$  :  $x$ 지점에서의 풍냉열량
- $W_{ti}, W_s$  :  $x$ 지점에서의 트로프외부, 전력구외부 유출열량

$W_{wi}, W_{ri}$  :  $x$ 지점에서의 공급냉매, 귀환냉매 흡수열량

$S$  : 전력구내 트로프 수

$x$  : 냉각기에서의 거리

### 2.2 열평형 방정식

그림 3의 열등가회로에 대한 열평형방정식의 기본식은 다음과 같다. 각 질점(node)에 유입되는 열량의 총화는 유출되는 열량의 총화와 같다.

$$W_{wi} = W_i - W_{ti} \tag{1}$$

$$W_e + \sum W_{ti} = W_s + W_a + \sum W_{ri} \tag{2}$$

그리고, 각 가지(branch)에서의 온도 차이는 아래와 같이 주어진다.

$$T_a(x) - T_0 = W_s R_5 \tag{3}$$

$$T_{ti}(x) - T_a(x) = W_{ti} R_{4i} \tag{4}$$

$$T_{ti}(x) - T_{wi}(x) = 1/2 W_{wi} R_{6i} \tag{5}$$

$$T_a(x) - T_{ri}(x) = W_{ri} R_{7i} \tag{6}$$

$$T_{ci}(x) = T_{ti}(x) + 3I^2 r [R_{1i} + (1+P_i)(R_{2i} + R_{3i}) + W_{di}(1/2R_{1i} + R_{2i} + R_{3i})] \tag{7}$$

또한, 공급냉매 및 귀환냉매의 열 흡수량은 다음과 같이 계산된다.

$$W_{wi} = C_{wi} Q_{wi} \frac{dT_{wi}(x)}{dx} \tag{8}$$

$$W_{ri} = -C_{ri} Q_{ri} \frac{dT_{ri}(x)}{dx} \tag{9}$$

$$W_a = \pm C_a Q_a \frac{dT_a(x)}{dx} \begin{cases} + : +x \text{ 방향} \\ - : -x \text{ 방향} \end{cases} \tag{10}$$

여기서

$C_{wi}, C_{ri}$  : 공급 냉각수, 귀환 냉각수의 비열

$C_a$  : 공기의 비열

$Q_{wi}, Q_{ri}$  : 공급 냉각수, 귀환 냉각수의 유량

$Q_a$  : 공기량

$r$  : 케이블 교류도체 실효저항

$P_i$  : 케이블 Sheath 손실율

위의 식에서 상태변수를  $T_{wi}, T_{ri}$  및  $T_a$ 로 선정하고 정리하면 다음과 같은 상태방정식을 얻는다.

$$T_{wi}(x) - T_0 = [-W_{wi}(R_4 + 1/2R_{6i}) - \sum W_{wi}R_5] - \sum W_{ri}R_5 - W_aR_5 + (W_iR_{4i} + \sum W_iR_5) + W_eR_5 \tag{11}$$

$$T_{ri}(x) - T_0 = -\sum W_{wi}R_5 - (\sum W_{ri}R_5 + W_{ri}R_{7i}) - W_aR_5 + \sum W_iR_5 + W_eR_{5i} \tag{12}$$

$$T_a(x) - T_0 = -\sum W_{wi}R_5 - \sum W_{ri}R_5 - W_aR_5 + \sum W_iR_5 + W_eR_5 \tag{13}$$

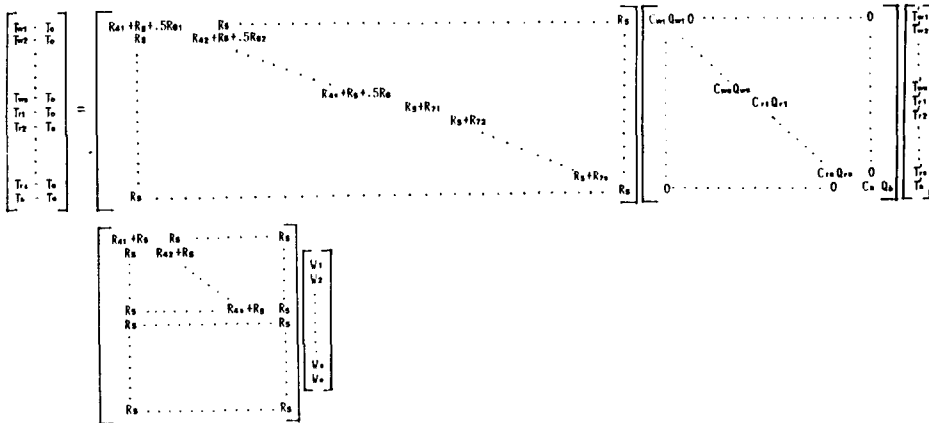


그림 4 열평형방정식의 행렬형태 표시  
 Fig. 4 Matrix Representation of Thermal Equivalent Eq.

위의 상태방정식을 행렬 형태로 표시하면 그림 4와 같이,

$$[T]=[R][CQ][T]+[D] \quad (14)$$

로 표시할 수 있다.

### 3. 열평형 방정식의 해

식(14)는 비제차 선형연립 미분방정식으로 이 방정식의 해는 제차방정식의 해  $[T]_h$ 와 특이해  $[T]_p$ 의 합으로 나타난다.

먼저 제차방정식의 해를 구해보자.

$$[T]=[R][CQ][T] \quad (15)$$

에서

$[R][CQ]=[\bar{R}]$ 로 하고 양변에  $[\bar{R}]^{-1}$ 을 곱하면,

$$[T]=[\bar{R}]^{-1}[T] \quad (16)$$

가 되고, 이 방정식의 해를 구하는 것은  $[\bar{R}]^{-1}$ 의 고유치  $\rho_i$ 와 이에 따른 고유벡터,  $[a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ni}]^t$  ( $n=2s+1$ )를 구하는 문제로 귀결된다.

그러므로 제차방정식의 해  $[T]_h$ 는 미정계수를 고려하면,

$$[T]_h=[a][C][Rh] \quad (17)$$

로 표시된다. 이제 특이해  $[T]_p$ 를  $[K]$ 로 가정하고 식(14)에 대입하면  $[K]=[D]$ 가 되고 따라서 특이해  $[T]_p$ 는

$$[T]_p=[D] \quad (18)$$

로서 간단히 주어진다. 여기서  $[D]$ 는 그림 4의 하단부 행렬과 동일하다.

$$[T]=[a][C][Rh]+[D] \quad (19)$$

가 된다. 여기서

$$[a]=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$[C]=[C_1, C_2, \dots, C_n] \quad \text{diagonal}$$

$$[Rh]=[e^{\rho_{1x}}, e^{\rho_{2x}}, \dots, e^{\rho_{nx}}]$$

$$[D]=\begin{bmatrix} R_{41}+R_5 & R_5 & \dots & R_5 \\ R_5 & R_{42}+R_5 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_5 & \dots & R_{45}+R_5 & R_5 \\ R_5 & \dots & \dots & R_5 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_5 & \dots & \dots & R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ W_5 \\ W_e \end{bmatrix}$$

해를 구하는 과정에서 문제가 되는 것은  $[R]^{-1}$ 가 일반적으로 비대칭행렬이 되어 그 고유치와 고유벡터가 복소형태로 표시된다는 것이다. 하지만 대칭행렬인  $[R]$ 을 상삼각행렬  $[L]$ 과 하삼각행렬

[U]로 다음과 같이 분해하면,

$$[R]=[U][L] \tag{20}$$

식(15)는

$$[T]=[U][L][CQ][T'] \tag{21}$$

가 되고 위 식의 양변에 [U]<sup>-1</sup>을 곱하면,

$$[U]^{-1}[T]=[L][CQ][T'] \tag{22}$$

여기서 [U]<sup>-1</sup>[T]=[Y]로 치환하고

$$[Y]=[L][CQ][T'] \tag{23}$$

라 하면,

$$[Y]=[L][CQ][U][Y'] \tag{24}$$

가 된다.

여기서 [L][CQ][U]는 [CQ]가 대각행렬이므로 대칭행렬이 되고 이의 고유치와 고유벡터는 실수로 나타나게 되므로 치환과정을 거쳐 나타나는 [R]<sup>-1</sup>의 고유치와 고유벡터도 실수로 표시된다. 본 논문에서는 삼각인수 분해에 Cholesky's method를, 고유치 문제를 푸는데에 Jacobi's method를 적용하였다.

일반적으로 수냉구간의 공장(공급관의 시점에서 종점까지의 거리)는 1.5~3.0Km 정도로 1 수냉구간은 토양의 열저항, 풍량 및 풍향, 2차계 발생열량등의 차이로 인하여 다수의 부구간으로 나누어지게 된다. 각 부구간마다 식(14)로 얻어지는 온도방정식은 각기 다른 내용을 표현할 것이며 이들 각 부구간마다 초기조건 또는 말기조건 등이 주어질 수 있으며 각 부구간의 경계면에서 냉매온도는 연속이어야 할 것이다. 또한 전술한 바와 같이 트로프 간점수냉방식은 냉각수가 순환하는 폐회로 계통으로 되어 있으므로 공급관의 종점에서 냉각수온도와 귀환관의 시점에서 냉각수온도는 서로 일치하여야 한다.

즉 다음과 같이 표시할 수 있다.

- ①  $T_w(0)=\text{given}$
- ②  $T_w(\text{전구간종점})=T_w(\text{현구간시점})$   
 $T_r(\text{전구간종점})=T_r(\text{현구간시점})$
- ③  $T_a(x=x_j)=\text{given or not}$   
 $T_a(\text{전구간종점})=\text{or} \neq T_a(\text{현구간시점})$
- ④  $T_w(\text{냉각구간종점})=T_r(\text{냉각구간시점})$

냉각수의 온도를 구하는 과정에서 문제가 될 수 있는 것은 귀로관의 냉각수온도인데 이는 수냉구간의 시점에서 귀로관의 냉각수 출구온도를 모른다는 것이다. 이를 해결하기 위하여 냉각수 출구온도를 임의로 설정하고 열해석을 하여 수냉구간

종점에서 공급냉각수와 귀환냉각수의 온도차이를 계산하고 이 차이를 하향이완(under relaxation)시켜 다시 귀환냉각수 출구온도를 설정하고 이를 계산하는 과정을 반복하여 수냉구간 종점에서 공급냉각수와 귀환냉각수의 온도차이가 0에 가까워 지도록 하는 반복계산방법[2]이 발표되었으나 1수냉구간이 다수의 부구간으로 나누어지고 냉각관의 수가 많으면 계산에 장시간이 소요되고 각 부구간의 경계면에서 온도를 일치시키기가 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 다음과 같이 미정계수의 연립방정식을 풀어 상기 문제를 해결하였다.

각 부구간  $j(j=1 \sim m)$ 에서 식(19)로 주어지는 방정식을 다음과 같이 공급냉각수 부분(하첨자  $w$ ), 귀환냉각수 부분(하첨자  $r$ ), 공기 부분(하첨자  $a$ )로 분할하여 생각하기로 한다.

$$\begin{bmatrix} [T_w(x)]_j \\ [T_r(x)]_j \\ [T_a(x)]_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a_w]_j \\ [a_r]_j \\ [a_a]_j \end{bmatrix} [C]_j [Rh(x)]_j + \begin{bmatrix} [D_w]_j \\ [D_r]_j \\ [D_a]_j \end{bmatrix} \tag{25}$$

또한 수냉부분과 풍냉부분으로 서로 분리되어야 하는데 이는 1냉각구간이 수냉의 시점과 종점으로 정해지고, 풍냉은 1냉각구간내의 부구간들 중 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우로 나누어지기 때문이다.

우선 수냉부분에 대해서만 고려하면 수냉의 시점  $X=0$ (부구간 1)에서 냉각수의 온도는 공급온도  $[K_w]$ 로 주어지므로

$$[a_w]_1 [C]_1 = [K_w] - [D_w]_1 \tag{26}$$

각 부구간의 경계면(부구간  $j$ 와 부구간  $j+1$ )에서 공급냉각수 온도와 귀환 냉각수 온도는 연속이므로

$$\begin{bmatrix} [a_w]_j \\ [a_r]_j \end{bmatrix} [Rh(x_j - x_{j-1})]_j \vdots - \begin{bmatrix} [a_w]_{j+1} \\ [a_r]_{j+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [C]_j \\ [C]_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [D_w]_{j+1} - [D_w]_j \\ [D_r]_{j+1} - [D_r]_j \end{bmatrix} \tag{27}$$

수냉의 종점  $x=x_m$ (부구간  $m$ )에서 공급냉각수 온도와 귀환냉각수 온도는 서로 같으므로

$$[[a_w]_m - [a_r]_m] [Rh(x_m)]_m [C]_m = [[D_r]_m - [D_w]_m] \tag{28}$$

이제 풍냉이  $x=x_j$ (부구간  $j$ )에서 시작된다면 공

기의 온도는 공급온도  $K_a$ 로 주어지므로

$$[a_a]_j [C]_j = (K_a - D_{aj}) \quad (29)$$

부구간  $j$ 와 부구간  $j+1$ 의 경계면에서 풍냉이 연속이라면

$$\begin{aligned} & [[a_a]_j Rh(x_j - x_{j-1})]_j : -[a_a]_{j+1} \begin{bmatrix} [C]_j \\ [C]_{j+1} \end{bmatrix} \\ & = (D_{aj+1} - D_{aj}) \end{aligned} \quad (30)$$

식(26)~(30)을 정리하면 아래 형태의 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \square & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \square & \square & & & & \cdot \\ & 0 & \square & \square & & \cdot \\ \cdot & & & & \square & \square \\ \cdot & & & & & \cdot \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \square \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [C]_1 \\ [C]_2 \\ \vdots \\ [C]_m \end{bmatrix} = [\text{constant}] \quad (31)$$

여기서 좌측 계수행렬은 지수(rank)가 항상  $n \cdot m$ 인 행렬을 얻을 수 있으며 이는 미정계수의 수  $n \cdot m$ 과 일치하므로 전 구간의 미정계수를 구할 수 있다.

그러나 이 행렬은 부구간의 수( $m$ )가 증가할수록

방대해지며 sparse하게 되므로 일반적인 Gauss 소거법 대신 비영요소만을 1차원 배열에 기억시켜 계산하는 방법을 사용하면 기억요소를 크게 줄일 수 있다. 1차원 배열을 사용하여 계산기의 기억요소를 줄일 수 있는 경우는 다음과 같이,

$$n(m \times 2 - 1) \times 3 < n^2 \cdot m^2 \quad (32)$$

인 경우이므로

$$m > 3 + \sqrt{9 - 3n^{-2}} \quad (33)$$

이어야 하고 따라서 차수  $n$ 에 관계없이  $m$ 의 값이 6이상인 경우는 1차원 배열을 사용하는 것이 유리하므로 본 연구에서 사용된 전산프로그램에서도  $m$ 이 6이상인 경우는 1차원 배열을 사용하도록 작성되었다. 이상의 처리과정을 흐름도로 나타내면 그림 5와 같다.

### 4. 계산예

냉각구간별 조건을 표 1에 실험계산조건을 표 2에 표시하였다.

이에따라 얻어진 계산결과를 그림 5에 나타내었으며 그림 6은 공급 수량을 3.0 Lr/sec/pipe로 한 경우이며, 그림 7은 여기에 #3, #4구간에 강제풍냉을 병용하여 풍량을 8.0 m<sup>3</sup>/sec로 계산한 결과다.

그림 6의 경우 도체온도  $T_{c1}$ 이 일반적인 OF케이블의 도체 허용 온도 85°C를 초과하므로 냉각공정의 축소 또는 냉매의 공급량을 증가시키는 등의 개선이 필요하다. 공급수량을 증가시켰을 경우 그

표 1 냉각구간별 조건  
Table 1 Cooling Conditions

구 간	#1	#2	#3	#4	
공 장 [m]	400	550	250	700	
전력구열저항 [°C.cm/W]	38.1	38.1	35.1	45.0	
2차계 발열량 [W/cm]	1.8	2.4	2.4	1.8	
기저온도 [°C]	15.0	15.0	15.0	15.0	
풍 냉	풍량[m <sup>3</sup> /sec]	2.0	2.0	3.0	3.0
	풍 향				
수 냉	입구온도[°C]	24.0		26.0	
	수량[Lr/sec]	2.0			
	수방향				
	입구온도[°C]	10.0			

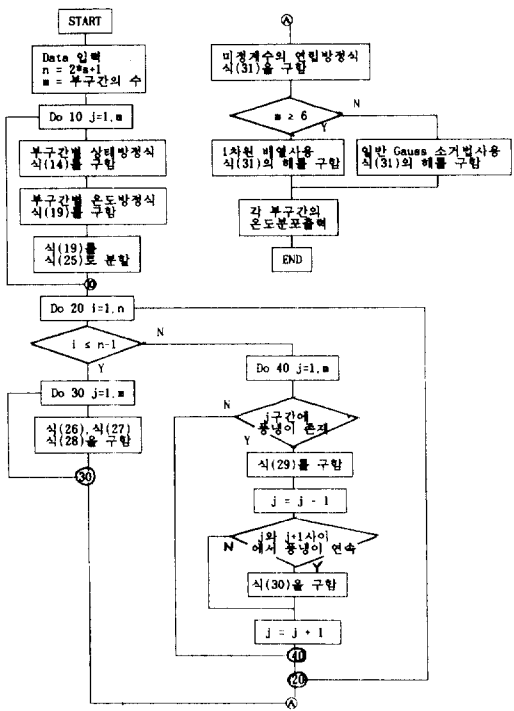


그림 5 흐름도  
Fig. 5 Flow Chart

림 7은 전 구간이 도체허용 온도범위내에 포함됨을 알 수 있으며 귀환냉각수와 공급냉각수의 온도차이는 그림 6의 경우에 비해서 현저히 감소하게 된다. 이는 케이블에서 발생한 열량은 전자의 경우와 동일하나 공급수량의 증가로 인하여 단위 냉각수당 열흡수량이 감소하는데 기인한다. 그러나 전체구간에서의 열흡수량은 1.1배 증가(130RT → 143RT)하며 이로 인하여 케이블의 도체온도는 떨어지게 된다.

이 경우 냉각기에서의 열교환기용량은 1.1배 증가하여 펌프용량의 증가(1.5배) 보다는 현저히 작는데 냉각설비의 설계측면에서는 주목할 만한 사실이다. 공급수량의 증가로 전력구내 온도  $T_a$ 는 약간 떨어지나 전력구내 온도를 떨어뜨리기 위해서는 그림 8과 강제풍냉을 실시해야 효과적임을 알 수 있다. 그림 6, 그림 7, 그림 8에서 보면 #2, #3구간 사이의 경계면에서 도체온도  $T_c$ 와 공기온도  $T_a$ 에 불연속이 나타나게 되는데 이는 냉각수가 폐회로 계통을 순환하여 온도분포( $T_w, T_r$ )에 불연속이 생기지 않는데 반하여 풍냉은 개회로 계통으로서 본 표본 계통에서는 1수냉구간에 2개의 풍냉구간이 존재하며 각각의 풍냉구간에서 공기에 흡

표 2 계산조건

Table 2 Calculation Conditions

케이블 종류 및 포설형태	345KV OFAZV 2000mm <sup>2</sup> 3조표적	345KV OFAZV 2000mm <sup>2</sup> 3조표적	
송전전류[Amp/cct]	820	650	
CABLE DATA	교류도체실효저항 [ $\Omega/cm$ ]	$1.3452 \times 10^{-7}$	$1.3452 \times 10^{-7}$
	절연체열저항 [ $^{\circ}C \cdot cm/W$ ]	52.2	52.2
	방식층열저항	9.2	9.2
	방산열저항	28.4	28.4
	sheath손실율	1.094	1.094
trough내 반열량 [ $W/cm$ ]	1.0133	0.8021	
trough 열저항 [ $^{\circ}C \cdot cm/W$ ]	16.4	16.4	
공급관 열저항	41.8	48.9	
귀로관 열저항	32.7	34.5	

GOLD STAR CABLES CO. 제공 자료

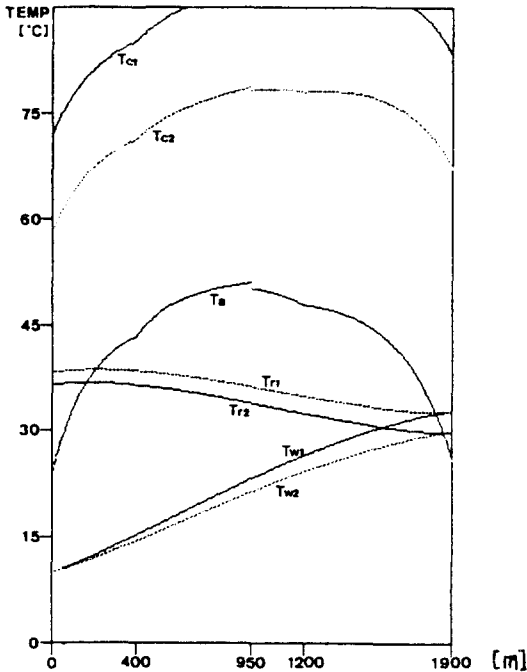


그림 6 표 1, 2의 경우 제온도 분포  
Fig. 6 Temperature Distribution in case of table 1, 2

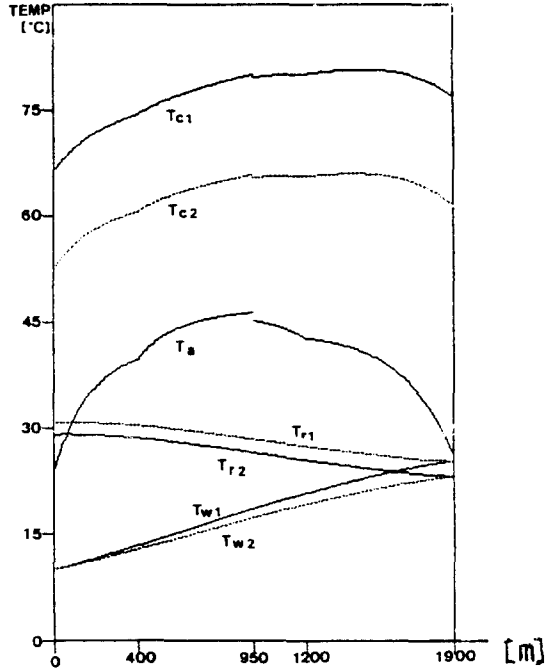


그림 7 공급수량  $Q_w$ 를 3.0 [ $L_r/sec$ ]로 증가한 경우 제온도 분포  
Fig. 7 Temperature Distribution in case of Increasing  $Q_w$  into 3.0 [ $L_r/sec$ ]

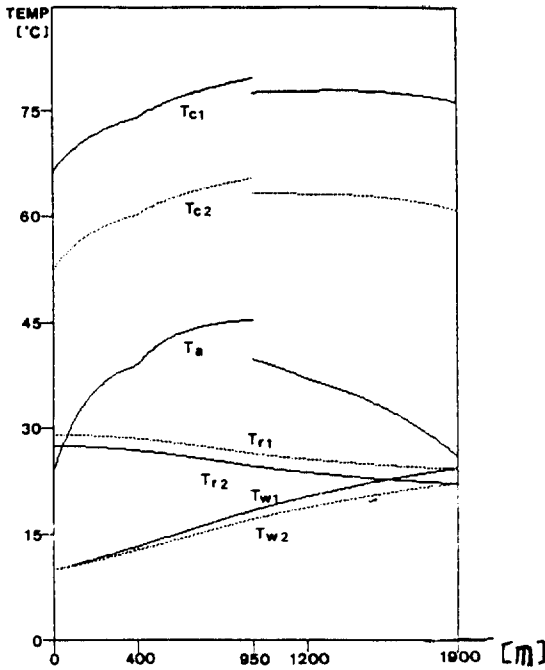


그림 8 공급수량  $Q_w$ 를  $3.0[L_r/sec]$ 로, #3, #4구간에 풍량  $Q_a$ 를  $8.0[m^3/sec]$ 로 증가한 경우 제온도분포

Fig. 8 Temperature Distribution in case of Increasing  $Q_w$  into  $3.0 [L_r/sec]$  &  $Q_a$  in #3, #4 section into  $8.0 [m^3/sec]$

수된 열량이 틀리므로 출구인 #2, #3구간 사이의 경계면에서  $T_a$ 에 불연속이 나타나게 된다. 또한 도체온도  $T_c$ 를 감소시키는 것은 수냉과 풍냉의 공동작용이므로 따라서 도체온도  $T_c$ 의 불연속은 공기온도  $T_a$ 의 불연속에 기인하게 된다. 특히 그림 8의 경우과 같이 #3, #4구간에 공기량을 증가시킨 경우 이 구간의 공기온도 및 도체온도가 떨어져서 불연속이 증가하게 됨을 볼 수 있다. 실제적으로 한전에서 관리중인 기존 전력구의 환기출구에서는 종종 결로(dew)현상이 목격되는데 이는 환기출구에서의 온도차이에 기인하는 것으로 여겨진다.

### 5. 결론

본 논문에서는 트로프 간접 수냉 방식의 열등가 모델을 이용하여 이를 일반화한 열평형 방정식을 유도하고 해법을 기술하였으며 열해석조건이 틀린 다수의 부구간으로 나누어지는 경우 각 부구간에서의 온도분포를 구하기 위하여 미정계수의 연립 방정식을 푸는 방법을 적용하였다. 또한 이를 이

용한 전산프로그램을 작성하였으며 이를 표본계통에 적용한 결과는 다음과 같다.

1. 냉각수의 온도는 각 부구간의 경계면에서 정확히 일치하였으며 공급수량의 증가에 따른 온도분포는 물리적으로 해석할 수 있었다.
2. 공기온도와 도체온도 역시 풍냉이 연속되는 구간의 경계면에서 정확히 일치하였으며 공기량의 증가에 따른 온도분포 또한 물리적으로 해석할 수 있었다.
3. 공기온도와 도체온도 분포에서 나타나는 불연속은 각각의 풍냉구간에서 공기의 열흡수량 차이에 기인하는 것으로 이는 현재 운영 중인 설비에서 실제적으로 목격할 수 있는 물리적인 현상과 일치하였다.

이상의 결과로 부터 본논문에 연구한 열해석 방법 및 이를 이용한 전산프로그램이 트로프 간접 수냉설비의 실설계에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 참고 문헌

- [1] '지중 송전계통의 냉각방식에 관한 연구', 전기 연구소, pp. 64~70, 1989. 2
- [2] '지중 케이블 강제냉각 System 도입을 위한 연구', 한국전력공사 기술연구원, pp. 163~167, 1991. 1
- [3] 'The Furukawa Electric Review', The Furukawa Electric Co., LTD, pp. 113~122, pp. 163~174, March 1981
- [4] D.J. Skipper, 'The Calculation of Continuous Ratings for Forced Cooled Cables', ELECEER-A, No. 66, pp. 59~84, 1979
- [5] K. Kimura, S. Hiyama, N. Shiseki, I. Miura, 'Thermal Field Analysis by Network Analogue Method', The Fujikura Cables Works, LTD, Fujikura Densen Giho, No. 56, pp. 19~23, 1977
- [6] W. Boone, H.G. Tempelaar, C.W.M. Vos, G. M.L.M. van de Wiel, 'Some Results of Trials of an Externally Cooled 400Kv Cable System', KEMA-Laboratories, Arnhem, The Netherlands
- [7] H. Ono, K. Kanemaru, H. Minakawa, 'Cooling Performance and its Verification of Separate Pipe Cooling System Installed in Trough', 日立電線, No. 3, pp. 9~4, 1983
- [8] M. Hayashi, K. Uchida, W. Kumai, K.



Sanjo, M. Mitani, N. Ichianagi, T. Goto,  
'Development of Water Pipe Cooling System  
for Power Cables in Tunnels', IEEE Trans.

on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp.  
836~872, 1989

## 저 자 소 개



**문영현(文永鉉)**

1952년 3월 11일생. 1975년 서울  
대 공대 전기공학과 졸업. 1978  
년 동 대학원 전기공학과 졸업.  
1978~79년 한국전기통신연구소  
연구원. 1979~83년 미국 Oregon 주립대학(공  
박). 현재 연세대 공대 전기공학과 부교수, 당  
학회 평의원.



**김 백(金 白)**

1957년 8월 24일생. 1981년 연세  
대 공대 전기공학과 졸업. 1988  
년 동 대학원 전기공학과 졸업  
(석사). 현재 동대학원 전기공학  
과 박사과정 및 한국전력공사 지중선사업처 근  
무.



**이태식(李台植)**

1961년 6월 14일생. 1984년 명지  
대 공대 전기공학과 졸업. 1987  
년 연세대 대학원 전기공학과 졸  
업(석사). 현재 연세대 대학원  
전기공학과 박사과정.