

# 간접냉각이 이용된 지중송전케이블의 적정냉각조건에 관한 연구

## A Study on the Optimum Cooling Condition of the Underground Power Transmission Cable Equipped with a Separate Pipe Cooling System.

박 만 홍\*, 최 규 식\*, 서 정 윤\*\*, 김 재 근\*\*\*, 이 재 현\*\*\*\*  
 M. H. Park, G. S. Che, J. Y. Seo, J. G. Kim, Jae-Heon Lee

Key Words : Separate pipe cooling system (관로간접냉각방식), Underground power transmission system(지중송전계통), Thermal equivalent circuit(열등가회로)

### ABSTRACT

The transmission current in a power cable is determined under the condition of separate pipe cooling. To this end, the thermal analysis is conducted with the standard condition of separate pipe cooling system, which constitutes one of the underground power transmission system. The changes of transmission current in a power cable with respect to the variation of temperatures and flow rates of inlet cooling water as well as the cooling spans are also determined.

As a consequence, the corresponding transmission current is shown to vary within allowable limit, resulting in the linear variation of the current for most of the cable routes. The abrupt changes of current, however, for the given flow rate of inlet cooling water in some cooling span lead to the adverse effects on the smooth current transmission within the underground power transmission system.

In practice, it is expected that the desinging of the separate pipe cooling system in conjunction with the evaluation of system capacity should take into account the effects of design condition on the inlet cooling flow rate.

#### 기호설명

	$d_1, d_2$ : 케이블 또는 냉각관의 내경 및 외경 [mm]
$C$ : 열용량 [W sec/kg°C] 또는 정전용량 [ $\mu$ F/km]	$E$ : 최고 선간전압 [kV]
	$f$ : 주파수 [Hz]

\* 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

\*\* 한국전력공사 기술연구원

\*\*\* 한양대학교 대학원

\*\*\*\* 한양대학교 기계공학과

$I$  : 전류 [A]  
 $k$  : 열전도계수 [W/cm<sup>2</sup>]  
 $L_m$  : 지표면에서 케이블 또는 냉각관 까지 깊이 [m]  
 $L_0$  : 지표면에서 케이블중심 또는 냉각관중심 까지 깊이 [m]  
 $N_c$  : 케이블 또는 냉각관 수  
 $n$  : 케이블내의 전력선수  
 $Nu_D$  : Nusselt수  
 $P$  : 케이블 전력손실율  
 $Pr$  : Prandtl수  
 $Q$  : 냉각수 유량 [cm<sup>3</sup>/sec]  
 $R_G$  : 케이블표면과 토양사이의 열저항 [°C cm/W]  
 $R_{GR}$  : 냉각수 귀환관과 토양사이의 열저항 [°C cm/W]  
 $R_{GW}$  : 냉각수 공급관과 토양사이의 열저항 [°C cm/W]  
 $R_l$  : 케이블 절연체 열저항 [°C cm/W]  
 $R_j$  : 케이블 방식층 열저항 [°C cm/W]  
 $R_R$  : 냉각수 귀환관 내면과 냉각수 사이의 열저항 [°C cm/W]  
 $R_w$  : 냉각수 공급관 내면과 냉각수 사이의 열저항 [°C cm/W]  
 $r_{ac}$  : 케이블 최대 교류저항 [ $\Omega$ /km]  
 $Re_D$  : Reynolds 수  
 $T_c$  : 케이블 도체온도 [°C]  
 $T_G$  : 토양온도 [°C]  
 $T_l$  : 케이블 절연체온도 [°C]  
 $T_j$  : 케이블 외피온도 [°C]  
 $T_0$  : 기저온도 [°C]  
 $T_R$  : 귀환냉각수온도 [°C]  
 $T_s$  : 케이블 시스(sheath)온도 [°C]  
 $T_w$  : 공급냉각수온도 [°C]  
 $\tan\delta$  : 유전 탄젠트(dielectric tangent)  
 $u$  : 냉각관내 유동의 평균속도 [m/sec]  
 $W_c$  : 케이블도체 열손실 [W/cm]  
 $W_d$  : 케이블유전체 열손실 [W/cm]  
 $W_s$  : 케이블시스 열손실 [W/cm] (=P ·  $W_c$ )  
 $W_R$  : 귀환냉각수에 의한 제거열량 [W/cm]  
 (=  $\rho_w C_w Q_w (\partial T_w / \partial X)$ )  
 $W_w$  : 공급냉각수에 의한 제거열량 [W/cm]

$$(= \rho_w C_w Q_w (\partial T_w / \partial X))$$

$X$  : 케이블 축방향 길이 또는 냉각구간 길이 [m]  
 $X_m$  : 각 케이블중심 또는 냉각관중심까지 거리 [m]  
 $\eta_z$  : 토양열저항의 저감율  
 $\rho$  : 밀도 [kg/cm<sup>3</sup>]  
 $\Omega_g$  : 토양의 고유열저항 [°C cm/W]

## 하 첨 자

$c_1, c_2, c_3$  : 케이블도체 1, 2 및 3  
 $d_1, d_2, d_3$  : 케이블유전체 1, 2 및 3  
 $G_1, G_2, G_3$  : 케이블 1, 2 및 3의 주위 토양  
 $GR_1, GR_2$  : 귀환냉각관의 주위 토양  
 $GW_1, GW_2$  : 공급냉각관의 주위 토양  
 $I_1, I_2, I_3$  : 케이블 절연체 1, 2 및 3  
 $J_1, J_2, J_3$  : 케이블 자켓 1, 2 및 3  
 $0$  : 기준값  
 $R_1, R_2$  : 귀환냉각관 1 및 2  
 $S_1, S_2, S_3$  : 케이블 시스(Sheath) 1, 2 및 3  
 $W_1, W_2$  : 공급냉각관 1 및 2

## 1. 서 론

대도시 지역에 있어서 전력수요 증가와 안정된 전력공급 및 전력설비의 도시미화 등의 문제를 해결하기 위하여 지중송전설비의 규모가 날로 증가하는 추세에 있다. 지중송전은 여러 가지 장점을 갖고 있는 반면 건설비등 초기 투자비용이 크고 사고시 사고복구시간이 장기화되는 결점이 있으며 특히, 회선당 송전용량이 가공송전에 비해 현저히 저하되는 단점이 있다. 지중송전이 갖는 이러한 단점에도 불구하고, 구미<sup>(1)</sup> 및 일본<sup>(2)</sup>에서는 500kV급의 송전계통까지 지중화하여 운전하고 있으며, 국내에서도 현재 154kV까지 운전되고 있는 지중송전계통이 앞으로 345kV까지 격상되어 운전될 전망에 있다<sup>(3)(4)</sup>. 도심지에 있어서 전력구 및 관로 건설이 교통체증을 초래하는 등 시민생활에 많은 불편을 주고 있어 지중 송전설비의 신설이 점점 어려워지고 있고 도로의 굴착이 민원의 대상이

되는 시기가 도래하고 있는 설정이다. 따라서, 한정된 지중송전 루트로서 증가하는 전력수요에 대응하기 위해서는 케이블의 송전용량을 증가시킬 수 있는 강제냉각시스템의 도입이 필수적이다. 지중송전계통에 적용되는 강제냉각방식은 전력구에서의 직접 및 간접냉각방식, 관로에서의 직접 및 간접냉각방식, 풍냉방식, POF유순환케이블냉각방식, 도체냉각방식 및 극저온냉각방식 등이 있으나<sup>(5)</sup>, 이미 지중케이블 강제냉각방식을 도입하고 있는 나라들의 경우를 살펴보면 현재의 기술수준으로는 냉각효과, 기술성, 냉각설비 및 건설비 등의 측면에서 다른 냉각방식보다 유리한 전력구간접수냉방식<sup>(6)</sup>과 관로간접수냉방식<sup>(7) (8)</sup>을 선호하고 있다. 우리나라에는 아직까지 지중송전케이블에 강제냉각방식을 채택하고 있지는 않지만 현재 전력구트라프(trough)간접수냉방식 도입을 전제로 한 345kV 송전케이블을 수용할 전력구 공사가 진행중에 있다<sup>(9)</sup>. 그러나 국내에서는 이에 대한 기술적 대처방안이 아직 미흡한 상황에 있으며 지중송전계통 연구와 더불어 강제냉각방식 도입을 위한 연구<sup>(10) (11)</sup>가 중요한 과제로 대두되고 있다.

여러가지 냉각방식중 관로간접수냉방식은 직접 땅속에 케이블과 평행하게 냉각관을 설치하여 냉각수를 강제순환 시킴으로써 2차 냉각매체인 토양의 온도를 낮추어 케이블에서 발생된 열을 간접적으로 냉각 시키는 방법이다. 또한 효과적인 냉각효과를 얻기 위하여 케이블과 냉각관 사이에 열전도율이 좋은 개량토양으로 되매우기를 하는 경우도 있다. 이 냉각방식은 다른 냉각방식보다 비교적 긴 냉각구간 및 기존 사용선로에 쉽게 설치할 수 있으며, 많은 송전선로가 밀집되어 있는 지역에서 다수 케이블을 동시에 냉각시켜 송전용량을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 냉각설비 고장등에 위한 냉각능력 상실시에도 케이블온도가 천천히 변화하여 지중송전계통 운용에 여유를 줄 수 있어 강제냉각을 도입하고 있는 나라에서 관로간접수냉방식을 선호하고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 앞으로 우리나라 지중송전계통에서 채택될 것으로 예상되는 강제냉각방식중에 하나인 관로간접수냉방식을 선

택하여 지중송전케이블의 기능을 상실하지 않도록 케이블 도체온도가 허용온도(일반적으로 85℃ 또는 90℃) 이하로 유지할 수 있는 여러가지 운전조건하에서 지중송전케이블에 흐를 수 있는 송전전류가 얼마인가를 예측하고자 하였다. 이를 위하여 3개의 케이블이 각각 땅속에 묻혀 있고 케이블 주위에 각각 2개씩의 냉각수공급관 및 냉각수귀환관을 설치하여 냉각수를 순환시키는 관로간접냉각방식에서 냉각수 유입구로부터의 거리에 따른 송전케이블의 도체 온도 및 냉각수 온도 등을 예측하여 전력케이블의 송전전류에 영향을 미치는 여러가지 운전조건의 변화에 대한 케이블 송전전류의 변화를 고찰하였다.

## 2. 케이블의 배치 및 열등가회로

### 2.1 배 치

본 논문에서 선택한 케이블 및 냉각관의 배치를 Fig.1(a)에 나타내었다. 그림에서 보면 일정 깊이의 땅속에 3개의 케이블이 포설되어 있고 그 주위에 냉각수 공급관 및 귀환관이 각각 엇갈려 배치되어 있으며 케이블에서는 345kV가 송전되고 있다. 또한 Fig.1(b)에 관로간접냉각방식에 설치되어 있는 전체 냉각구간에 대한 냉각수순환 방식을 간략하게 나타내었다.

케이블의 도체에서 발생된 열량은 우선 절연층, 시스(sheath), 자켓(jacket)등의 케이블 보호구성물질을 통하여 외부로 전달되므로 케이블의 내부구조는 열전달 측면에서 중요한 변수가 된다. Table 1에 345kV케이블, 냉각관 및 귀환관에 대한 여러가지 치수를 상세하게 나타내었다.

### 2.2 열등가회로

케이블에 전류가 통과할 때 발생하는 도체손실 및 유전체손실에 따라 발생한 열은 케이블의 절연체 및 시스를 통하여 외부로 방산된다. 이러한 열의 방산형태는 전류가 통과하는 초기에는 각 부분의 열용량 때문에 열이 케이블 및 케이블 주위의 각 물체에 축적되지만 열용량이

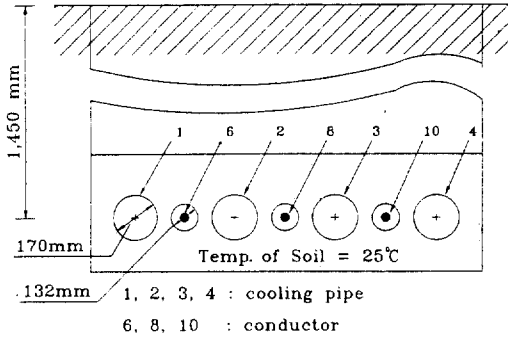


Fig. 1(a) Layout of the separate pipe water cooling system

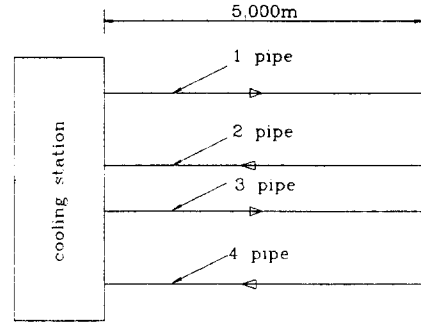


Fig. 1(b) Concept of the cooling water circulation

Table 1 Details of cables and cooling elements<sup>(12)</sup>

SECTION	ITEM	SYMBOL	LENGTH (mm)
CABLE	Metal tape I.D	$d_0$	14.0
	Conductor I.D	$d_{01}$	15.6
	Conductor O.D	$d_1$	57.5
	Insulation O.D	$d_2$	101.5
	Screen O.D	$d_{21}$	102.0
	Aluminum Sheath O.D	$d_3$	107.6
	Jacket O.D	$d_{31}$	119.6
	Cable O.D	$d_4$	134.0
COOLING PIPE	I.D	$d_5$	220.0
RETURN PIPE	O.D	$d_6$	250.0
	O.D	$d_7$	250.0
	I.D	$d_8$	220.0

note : I.D. ; inside diameter, O.D. ; outside diameter

포화상태가 되면 점차 주위 물체에 열이 전달되어 최종적으로는 정상상태의 열전달 형태로 된다. 이러한 현상은 전기회로에서 전기저항 및 정전용량의 분포 회로에 전류를 통하는 경우의 현상과 유사하며, 정상상태에서 온도 분포는 열저항 값만으로 결정될 수 있으므로 본 연구에서는 관로간접수냉방식을 냉각방식으로 채택할 경우 케이블 및 케이블주위의 토양에서 모든 열용량이 포화상태 이룬후 정상상태의 열해석만 고려하기로 한다. 강제냉각 방식에서 송전케이블 및 냉각매체의 온도 분포를 알기 위한 일반적인 열해석 방법은 모든 계통내의 열적평형 상태에서 이에 대한 열등가회로(thermal equiva-

lent circuit)로 나타내어 해석한다.

여러가지 열적인 조건을 간략하게 기술하기 위하여 일반적으로 1차원 열등가회로를 구성하고 이의 해석을 통하여 각 부분의 온도를 예측하고자 한다. 물론 국소적으로 정확한 온도를 예측하기 위해서는 2차원 혹은 3차원적인 해석방법이 필요하겠으나 실제 공학적인 응용을 위해서는 1차원 열등가회로에 의한 해석방법이 현재 대부분 이용되고 있는 실정이다.<sup>(7) (10) (11) (13)</sup> 열등가회로를 적용하는데 따른 기본적인 가정은 다음과 같다.<sup>(14)</sup>

(1) 케이블의 전력 손실은 길이에 따라 일정하다.

(2) 모든 물질의 물성치는 계통내 길이에 따른 온도 및 압력변화에 영향을 받지 않는다.

(3) 케이블 절연체 내에서 발생하는 절연체 열손실은 케이블 도체 및 시스에 일정하게 분포된다.

일반적인 강제냉각방식의 열등가회로는 크게 케이블 자체에서의 열저항, 케이블과 케이블 주위 매체사이의 열저항 및 케이블에서 발생하는 열을 제거하는 냉각매체의 열저항 등의 세 부분으로 나누어 구성한다. Fig.2에는 Fig.1(a)에 나타난 관로간접 냉각방식의 배치도에 대한 각 케이블, 냉각수공급관 및 귀환관 그리고 토양에서의 열저항으로 구성된 열등가회로를 나타내었다. 그림에서  $T$ 는 각 위치에서 온도를 나타내며  $R$ 은 열저항을 나타낸다.  $W$ 는 케이블 및 계통내에 유입되는 열량을 뜻하며  $\rho CQ(\partial T/\partial X)$  항은 냉각관 축방향을  $X$  방향이라 하였을 때 축방향 단위 길이당 냉각수 의해 제거된 열량을 나타낸다.

### 3. 기본 방정식 및 풀이방법

#### 3.1 연립 방정식의 구성

Fig.2에 나타난 열등가회로에 대한 열량수수는 아래식으로 나타낼 수 있다.

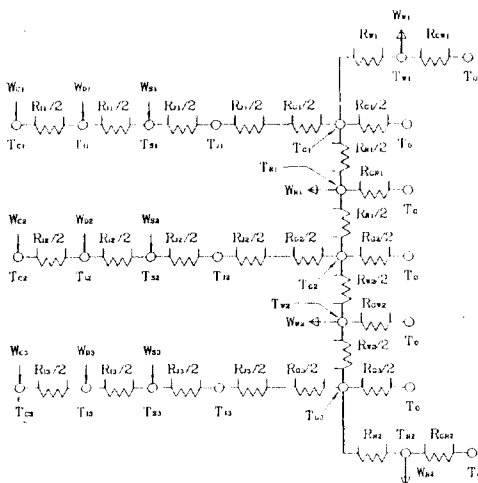


Fig. 2 Thermal equivalent circuit for the separate pipe water cooling system

○ 345kV 케이블

$$\frac{T_{C1} - T_{I1}}{R_{I1}/2} = W_{C1} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{T_{I1} - T_{S1}}{R_{I1}/2} = \frac{T_{C1} - T_{I1}}{R_{I1}/2} + W_{D1} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{T_{S1} - T_{J1}}{R_{J1}/2} = \frac{T_{I1} - T_{S1}}{R_{I1}/2} + W_{S1} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{T_{J1} - T_{G1}}{R_{J1}/2 + R_{G1}/2} = \frac{T_{S1} - T_{J1}}{R_{J1}/2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{T_{C2} - T_{I2}}{R_{I2}/2} = W_{C2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{T_{I2} - T_{S2}}{R_{I2}/2} = \frac{T_{C2} - T_{I2}}{R_{I2}/2} + W_{D2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{T_{S2} - T_{J2}}{R_{J2}/2} = \frac{T_{I2} - T_{S2}}{R_{I2}/2} + W_{S2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{T_{J2} - T_{G2}}{R_{J2}/2 + R_{G2}/2} = \frac{T_{S2} - T_{J2}}{R_{J2}/2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{T_{C3} - T_{I3}}{R_{I3}/2} = W_{C3} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{T_{I3} - T_{S3}}{R_{I3}/2} = \frac{T_{C3} - T_{I3}}{R_{I3}/2} + W_{D3} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{T_{S3} - T_{J3}}{R_{J3}/2} = \frac{T_{I3} - T_{S3}}{R_{I3}/2} + W_{S3} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{T_{J3} - T_{G3}}{R_{J3}/2 + R_{G3}/2} = \frac{T_{S3} - T_{J3}}{R_{J3}/2} \dots\dots\dots (12)$$

○ 냉각수공급관, 냉각수귀환관 및 토양

$$\frac{T_{G1} - T_{W1}}{R_{W1}} + \frac{T_{C1} - T_{R1}}{R_{R1}/2} + \frac{T_{G1} - T_{O}}{R_{G1}/2}$$



블 자켓의 열저항을 나타낸다. 이 값들의 산정은 원통형계에서 정상 1차원 전도열전달이 발생한다는 가정에서의 열저항  $R$ 을 아래식에 의하여 산정하였다.

$$R = \ell n(d_2/d_1)/(2\pi \cdot k) \dots\dots\dots (20)$$

$R_{w1}(=R_{w2})$  및  $R_{R1}(=R_{R2})$ 은 냉각관 내부면과 냉각수 사이의 열저항을 나타내며 냉각관에 흐르는 냉각수에 기초하여 Reynolds수가  $10^5$  정도이므로 Dittus와 Boelter<sup>(15)</sup>가 제안한 아래의 강제대류에 관한 Nusselt수 상관관계식을 이용하여 산정하였다.

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.3} \dots\dots\dots (21)$$

$$Re_D = u \cdot D/\nu \dots\dots\dots (22)$$

$$R_{w1} = 1/(Nu_D \cdot k \cdot \pi) \dots\dots\dots (23)$$

$u$  및  $D$ 는 각각 냉각관내 유동의 평균속도 및 관의 내경으로 하첨자  $D$ 는 관의 내경에 기준한 것임을 나타낸다.

$R_{G1}(=R_{G2})$ 는 케이블 외표면과 기준 지표면사이의 열저항이며  $R_{GR1}(=R_{GR2})$  및  $R_{Gw1}(=R_{Gw2})$ 은 각각 귀환냉각관 및 공급냉각관과 기준 지표면사이의 열저항을 나타내며 아래식으로 나타내었다<sup>(16)</sup>.

$$R_G = \frac{\Omega_g \eta_2}{2\pi} \left\{ \ell n \frac{4L_o}{d} + \sum_{m=1}^{N_c-1} \ell n \sqrt{\frac{4L_o L_m}{Xm^2}} + 1 \right\} \dots\dots\dots (24)$$

(2) 열발생량

$W_{C1}(=W_{C2}=W_{C3})$ 은 케이블도체에서 발생하는 열량을 나타내며, 아래식에 의하여 산정 하였다<sup>(16)</sup>.

$$W_C = I^2 r_{ac} \dots\dots\dots (25)$$

$W_{D1}(=W_{D2}=W_{D3})$ 은 절연체에 의하여 발생하는 유전체 열발생량을 나타내며, 아래식에 의하여 산정하였다<sup>(16)</sup>.

$$W_D = 2\pi f Cn \frac{E^2}{3} \tan \delta \times 10^{-5} \dots\dots\dots (26)$$

$W_{S1}(=W_{S2}=W_{S3})$ 은 시스에서 발생하는 열량을 나타내며 아래식에 의하여 산정하였다<sup>(16)</sup>.

$$W_S = P \cdot W_C \dots\dots\dots (27)$$

여기서  $P$ 는 전력손실율을 나타내며 회로손실율과 외전류손실율을 합한 것과 같다.

3.3 풀이 방법

본 논문에서 구성한 방정식 해를 구하기 위한 행렬 역변환 과정에서는 IMSL(International mathematical and Statistical Libraries)의 일부를 이용하였다.

계산과정에서 야기되는 약간의 어려움은 귀환 냉각수의 온도 계산이다. 귀환냉각수는 유입된 냉각수가 냉각구간의 끝에 되돌아 오기 때문에, 냉각구간 초기위치에서 부터 전력의 영향으로 가열되는 유입냉각수의 냉각구간 끝 온도와 귀환냉각수의 출발 온도가 일치되어야 한다. 그러나 냉각구간의 시작위치부터 출발하여 차례로 전진(marching)하여 냉각구간 끝까지 진행되는 계산방법에서는 냉각구간 끝온도와 다르다. 그러므로 냉각구간 시작위치의 귀환냉각수 온도를 다시 수정하여 계산을 반복하여야 한다. 이때 수정량은 냉각구간 끝에서의 두 냉각수의 온도 차이 만큼이 알맞으나 여타 부위에서의 온도영향 때문에 하향이완(under relaxation)시킬 필요가 있다. 반복계산 횟수는 냉각구간 초기위치에서의 귀환냉각수 온도 설정에 따라 다르며 대략 20회 정도의 반복 계산후에 수렴된다. 수렴 기준판정은 냉각구간 끝에서 두냉각수의 온도 차이가  $0.1^\circ\text{C}$  이하로 될 때를 기준하였다. 반복 계산 과정에서는 최초 1회의 계산 진행 도중에 선정된 각 조건내에서 케이블도체의 온도가 최고허용온도를 초과하면 각 변수를 재조정 한 후 이후의 반복과정의 계속하여 최종 온도값 및 케이블의 송전전류들을 계산하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 지중송전계통의 관로간접수냉 방식의 Fig.1(a)와 같이 3개 케이블이 땅속에 묻혀 있고 그 주위에 각각 2개씩의 냉각수 공급관 및 귀환관이 설치되어 있는 경우에 대해서 고찰하였다. 냉각수 순환은 Fig.1(b)와 같이 냉

각계통을 중심으로 하여 2개의 루트로 순환된다. 이에 대한 하나의 표준자료를 설정하고 이 표준자료를 기준으로 하여 유입냉각수온도, 유입 냉각수유량 및 냉각구간 등의 각 변수를 변화시키면서 케이블의 송전용량이 어떻게 변화하는가를 검토하였다.

Table 2 Comparison between this study and reference(7) results

(a) The calculation results of this study

cooling span	water temp.				conductor temp.		
	pipe 1	pipe 2	pipe 3	pipe 4	Cond 6	Cond 8	cond 10
m	℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃
10.0	20.051	34.688	20.116	34.474	75.149	75.178	75.114
500.0	20.714	34.069	20.853	33.890	75.805	75.984	76.443
1000.0	21.484	33.382	21.614	33.208	76.537	76.538	77.105
1500.0	22.177	32.719	22.411	32.669	77.201	77.790	78.174
2000.0	23.069	32.108	23.218	32.038	77.998	80.537	79.765
2500.0	23.846	31.656	24.163	31.466	78.925	81.846	81.967
3000.0	24.593	31.061	24.943	30.895	79.674	82.761	82.967
3500.0	25.299	30.300	26.028	30.260	80.427	83.308	83.453
4000.0	26.049	28.735	26.867	29.694	81.259	83.489	84.129
4500.0	26.721	28.101	27.690	29.029	81.930	83.589	84.890
5000.0	27.489	27.509	28.413	28.400	82.381	83.673	84.999

\* Transmission current : 1610 [A]

(b) The calculation results of reference(7)

cooling span	water temp.				conductor temp.		
	pipe 1	pipe 2	pipe 3	pipe 4	Cond 6	Cond 8	cond 10
m	℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃
0	20.0	30.3	20.0	30.3	82.6	82.6	82.8
500	20.5	29.8	20.9	30.1	82.6	82.9	83.1
1000	21.0	29.4	21.8	29.9	82.6	83.0	83.4
1500	21.5	28.8	22.6	29.7	82.6	83.2	83.6
2000	21.9	28.3	23.5	29.4	82.6	83.3	84.1
2500	22.4	27.7	24.2	29.2	82.6	83.4	84.3
3000	22.8	27.1	25.0	28.9	82.5	83.5	84.5
3500	23.2	26.5	25.7	26.7	82.5	83.5	84.5
4000	23.8	25.8	25.5	28.4	82.4	83.6	84.7
4500	24.0	25.1	27.1	26.1	82.2	83.6	84.9
5000	24.4	24.4	27.8	27.8	82.1	83.6	85.0

\* Transmission current : 1607 [A]



#### 4.1 열해석의 검증

앞에서 설정한 관로간접수냉방식의 열해석을 하기에 앞서 본 연구에서의 열해석에 대한 정확도를 검증하기 위해 기존의 발표된 문헌(7)과 똑같은 아래와 같은 입력조건에서 본 프로그램으로 계산하여 얻은 결과를 기존문헌의 결과와 비교하였다.

##### (1) 입력 조건

케이블 : OF케이블, 도체공칭단면적 1200 mm<sup>2</sup>  
 전 압 : 400 kV  
 냉각구간 : 5000 m  
 유입냉각수온도 : 20°C  
 유입냉각수유량 : 0.01m<sup>3</sup>/s/pipe  
 토양의 기저온도 : 20°C  
 도체최고허용온도 : 85°C  
 토양의 고유열저항 : 120°C cm/W  
 냉각관 및 케이블 중심까지의 매설 깊이 : 1.45m

위 조건중에 냉각구간은 Fig.1(b)에서와 같이 케이블 축방향 길이로써 1개의 냉각 계통으로 케이블을 냉각시킬 수 있는 범위내에서 냉각관을 설치한 구간을 나타낸다. 토양의 기저온도는 토양의 열용량이 대단히 커서 케이블 및 냉각관에서 방출되는 열을 충분히 흡수할 수 있어 정상상태에서 토양의 온도가 변하지 않는 온도로서 케이블을 설치하는 지형 및 기후에 따라 기준온도가 약간씩 다르나 약 20~25°C 정도이며 열해석을 수행할 때 경계조건으로 사용되는 온도이다.

##### (2) 계산결과

기존문헌의 입력조건을 이용하여 케이블의 송전전류를 점차 증가시켜 케이블도체가 최고 허용온도인 85°C가 될때까지 계산을 하여 구한 케이블의 허용전류 및 각 부분에서의 온도분포를 Table 2(a)에 나타내었고 Table 2(b)의 기존문헌의 결과와 비교 검토하였다. 케이블의 허용전류를 살펴보면 기존논문은 1607 A이고 본 프로그램의 계산결과는 1610 A에서 케이블의 도체최고허용온도에 도달하였다. 각 냉각수의 온도분포를 살펴보면 기존문헌 계산결과보다 공급냉각수 출구온도 및 귀환냉각수 출구온도는

약 3~4°C 높게 나타난다. 케이블도체온도는 냉각구간 시작위치에서 약 7°C 정도 낮게 계산되며 특히 케이블도체 6의 온도분포를 살펴보면 기존문헌의 계산결과는 냉각구간에서 거리가 증가함에 따라 온도가 약간 감소하지만 전체적으로 거의 일정하게 나타나지만 본 계산결과는 증가하는 것으로 계산되었다. 그러나 냉각구간에서 케이블도체온도가 최고허용온도이하로 계산되므로 실제 냉각계통 운용을 위한 열해석에는 큰무리가 없음을 알 수 있다. 계산결과의 오차는 열해석을 위한 열등가회로 구성 및 각 부분에서의 열저항값 산정의 차이에서 기인된 것으로 기존문헌(7)에서는 각각 냉각수 및 케이블부분으로 나누어 회로를 구성하여 해석적으로 구하였다. 그러나 본 논문은 전체 계통을 하나로 구성하여 냉각수 및 케이블에서 나타나는 모든 열저항 값을 하나의 행렬식으로 나타내어 열해석을 하였고 열저항값도 기존문헌(7)에 나타난 값은 그대로 사용하였으나 본 논문의 열등가회로 구성시에 기존문헌(7)에 나타나지 않은 열저항값은 참고문헌(16)을 참고하여 산정한 결과로 사료된다.

#### 4.2 표준자료에 의한 계산

관로간접수냉방식에 적용되는 각 변수의 변화에 따른 케이블의 송전전류의 변화를 알아보기 위하여 하나의 표준자료를 설정하여 계산을 실행하였고 이를 기준으로 하여 이후 논의되는 관로간접수냉방식에서 각 변수의 변화에 따른 송전전류의 민감도분석은 표준자료를 기준으로 하여 유입냉각수온도, 유입냉각수유량 및 냉각구간을 한가지씩 변화시키면서 계산하여 검토하였다.

##### (1) 표준자료

케이블 : OF케이블, 도체공칭단면적 2000 mm<sup>2</sup>  
 전 압 : 345 kV  
 냉 매 : 물  
 냉각구간 : 5000 m  
 냉매유입온도 : 20°C  
 냉매유량 : 0.005m<sup>3</sup>/s/pipe  
 토양의 기저온도 : 25°C

도체 최고허용온도 : 85℃

토양의 열저항 : 100℃ cm/W

냉각관 및 케이블 중심까지의 매설 깊이 : 1.45m

(2) 표준자료에 의한 계산결과

Fig.3에 냉매유입 시작위치로부터 관로의 축방향 길이 x에 따른 케이블의 도체온도 및 순환냉각수의 온도분포를 나타내었다.

케이블 도체의 최고허용온도 범위내에서 냉각구간 5000 m에 걸쳐 345kV 케이블에서 흐를 수 있는 전류는 2030 A이며, 3개의 케이블중 가장 높은 케이블 도체온도를 나타내는 케이블은 Fig. 1(a)에서 가장 오른쪽에 있는 케이블로서 온도가 약 72℃에서 84.9℃까지 증가하였다. 냉각수의 온도는 20℃에서 부터 증가하여 냉각수 귀환지점에서 약 40℃ 정도까지 올라갔다가 최종적으로 약 35℃까지 내려간다. 귀환냉각수의 온도가 오히려 냉각구간을 통과하고 되돌아 흐르면서 냉각구간의 시작부분에서 감소하는 이유는 주위의 토양 온도가 귀환냉각수의 온도보다 낮기 때문에 귀환냉각수가 냉각장치로 되돌아 흐르는 동안 토양쪽으로 열전달이 많이 일어나기 때문이다.

### 4.3 각 변수 변화에 따른 송전전류의 민감도 분석

#### (1) 냉각구간의 변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 냉각구간만을 1000 m 부터 1000 m 간격으로 5000 m 까지 변화시키면서 송전전류를 산출한 결과를 Fig.4에 나타내었다. 그림에서 횡축은 냉각구간을, 종축은 송전전류를 나타낸다.

표준자료에 해당하는 냉각구간 5000 m에서 케이블에 흐를 수 있는 전류가 2030 A이고, 냉각구간이 1000 m씩 감소할 때마다 케이블에 흐를 수 있는 송전전류가 각각 60 A, 77 A, 103 A 및 120 A씩 증가하여, 냉각구간이 1000 m에서 케이블에 흐를 수 있는 전류가 2390 A로 되었다. 냉각구간이 감소할 수록 케이블에 흐를 수 있는 전류의 증가량이 많아짐을 알 수 있다. 이는 냉각구간이 짧아질 수록 귀환냉각수 출구 온도는 낮아지고 냉각수의 순환횟수도 증가하게 되므로

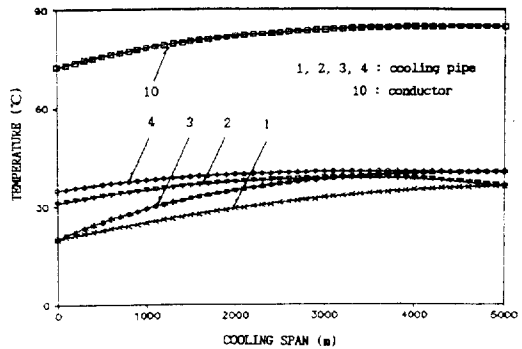


Fig. 3 Temperature distribution of various elements for standard data

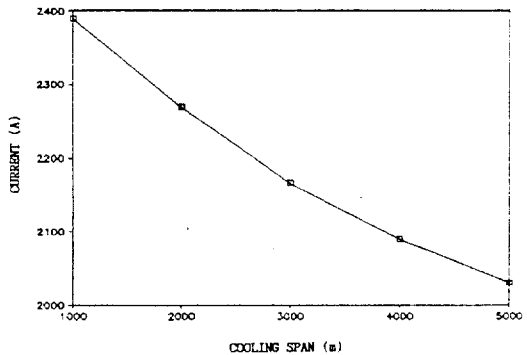


Fig. 4 Effect of cooling spans on the variation of current

냉각효과가 커지기 때문이다.

일반적으로 관로간접수냉방식의 1개 냉각구간은 2.5~5.0km 정도로 운용되므로, 그림에서 이 구간의 냉각구간 변화에 의한 송전전류 변화는 약 200 A 정도임을 알 수 있으며 계산된 전체 냉각구간에서 거의 선형적으로 변화하고 있다.

#### (2) 유입냉각수온도의 변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 냉각구간이 1000m, 3000m 및 5000m인 경우에 유입냉각수의 온도를 5℃에서 30℃까지 5℃ 간격으로 변화시키면서 케이블에 흐를 수 있는 송전전류를 산출한 결과를 Fig.5에 나타내었다.

냉각구간이 1000m인 경우, 유입냉각수온도가 5℃인 경우에는 케이블의 송전전류가 2643 A이고

30°C인 경우는 2205 A로 유입냉각수온도가 높을수록 케이블의 송전전류의 감소가 현저한데 이는 냉각수의 유입온도가 상승할수록 냉각효과가 떨어짐을 말해 준다. 냉각구간이 3000m 및 5000m로 증가할 경우에도 냉각구간이 1000m인 경우와 같은 경향을 나타내었으며 각각의 케이블 송전전류는 유입냉각수온도가 5°C 일때는 2328 A 및 2123 A이고, 30°C인 경우에는 2052 A 및 1958 A이었다.

냉각구간을 3000m로 가정했을때, 그림에서 5~30°C 범위의 유입냉각수온도 변화에 의한 송전전류 변화는 약 280 A 정도임을 알 수 있으며 선택된 모든 조건 및 구간에서 선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있다.

(3) 유입냉각수유량의 변화

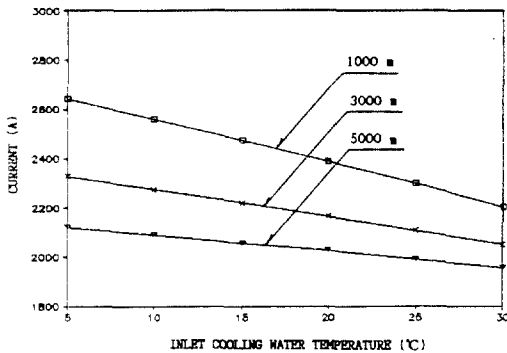


Fig. 5 Effect of inlet cooling water temperature on the variation of current

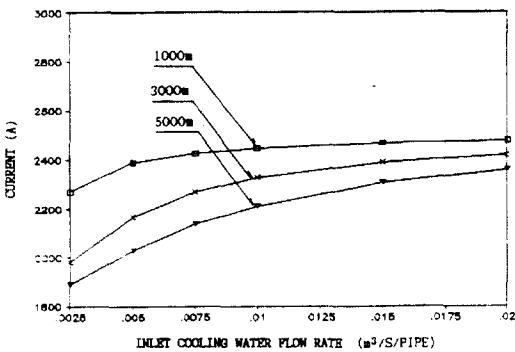


Fig. 6 Effect of inlet cooling water flow rate on the variation of current

표준자료의 여타 모든 변수를 고정시키고 냉각구간을 1000m, 3000m 및 5000m로 변화시켜서, 유입냉각수의 유량을 1개의 냉각관당 0.0025m³/s에서 0.02m³/s까지 0.0025m³/s씩 변화시키면서 케이블에 흐를 수 있는 송전전류를 산출한 결과를 Fig.6에 나타내었다.

냉각구간이 1000m인 경우, 유입냉각수유량이 0.0025m³/s에서는 케이블의 송전전류가 2270 A이고 0.02m³/s에서는 2479 A이었다. 냉각구간이 3000m 및 5000m인 경우, 케이블의 송전전류는 유입냉각수유량이 0.0025m³/s에서 각각 1982 A 및 1889 A이고, 0.02m³/s인 경우는 각각 2420 A 및 2359 A이었다. 그림에서 보는 바와 같이 유입냉각수유량이 0.0025m³/s에서 0.0075m³/s로 증가하는 구간에서 다른구간 보다 케이블의 송전전류의 상승율이 커짐을 알 수 있다. 냉각구간이 3000m일때, 그림에서 0.0025~0.0075m³/s의 범위내의 유입냉각수유량 변화에 의한 송전전류 변화는 약 290 A 정도임을 알 수 있다. 여기에서 여타 다른조건이 변화할 때에는 송전전류가 선형적으로 변화하여 어느정도 변화량을 예측할 수 있으나 유입냉각수유량이 변화할때에는 특정구간에서만 급격히 많은 양이 변화하므로 케이블의 송전전류를 결정하는데 다른 변수들 보다 유입냉각수유량을 선택할 때에는 신중히 고려하여야 한다.

5. 결 론

지중송전계통의 강제냉각방식중에서 많이 적용되고 있고 앞으로 우리나라에서도 적용 가능성 가장 큰 강제냉각방식중의 하나인 관로간접수냉방식을 선택하여 이 냉각방식에 하나의 표준조건을 가지고 케이블의 축방향 거리가 증가함에 따른 각 부위의 온도변화를 구하고 강제냉각시, 케이블에 흐를 수 있는 송전전류를 결정하였다. 또한 표준자료에서 냉각구간, 유입냉각수유량 및 유입냉각수온도 등을 변화시키면서 케이블의 송전전류의 변화를 고찰하였다.

냉각구간이 길어지거나 유입냉각수온도가 상승함에 따라 모든 냉각구간에서는 거의 선형적으로 케이블의 송전전류가 감소하였다. 그러나

유입냉각수유량의 변화에서는 유입냉각수유량이 0.0025~0.0075m<sup>3</sup>/s사이의 구간에서 케이블의 송전전류 증가율이 다른 구간보다 커짐을 알 수 있었다. 그 이후에는 유입냉각수유량이 증가하여도 냉각효과는 그다지 크게 증가하지 않으므로 케이블 강제냉각계통의 관로간접냉각방식에서는 여타 다른조건보다도 어느 특정구간에서 냉각수 유량이 케이블의 송전전류를 결정하는데 많은 영향을 미친다. 그러므로 실제로 관로간접냉각방식을 채택하여 설계할시에는 케이블의 송전전류를 결정하는데 중요한 역할을 하는 유입냉각수유량을 다른 변수들 보다 신중히 고려하여야 한다.

### 참 고 문 헌

1. C.A. Arkell, W.E. Blake, A.D.R. Brealey, K.J.H. Hacke and G.E.A. Hance, 1977, "Design and Construction of the 400kV Cable System for the Sovern Tunnel," Proc. IEE, Vol.124, No.3, pp.303-316.
2. B. Yoda, C. Ikeda, Y. Sekii and M., Kanaoka, 1985, "Development of 500kV Cross Linked Polyethylene Insulated Power Cable," IEEE PAS, Vol.PAS-104, No.1, pp.32-38.
3. 김세일, 1984, "지중송전 현황과 전망," 한국 전력공사 기술연구원, 지중송전 Workshop, pp. 3-29.
4. 김세일, 1988, "송전계통의 지중화 계획," 대한전기학회지, Vol.27, No.10, pp.4-10.
5. 이종범, 김대경, 강동식, 강도현, 이수현, 정성환, 1989, "지중송전계통의 냉각방식에 관한 연구," 한국전기연구소, 8EA0303.
6. K. Yamada, T.Hayakawa and K. Hushimi, 1982, "Indirect Water Cooling for Electric Power Cable Laid within Trough in Tunnel," Furukawa Review, No.2, pp.51-60.
7. G. Luoni, A.S. Morello and A.E. Crockett, 1981, "Continuous Current Rating for External and Surface Cooled Cable System," IEE Proc., Vol. 128, Pt. C., No.3, May, pp.129-139.
8. C.A. Arkell and E.H. Ball, A.H. Barton, H.K. Beale and D.E. Williams, 1978, "The Design and Installation of Cable Systems with Separate Pipe Water Cooling" CIGRE, 21-01, pp.1-15.
9. 한국전력기술(주), 1987, "345kV 동서울 S/S - 왕십리 S/S간 전력구 건설공사," 기본설계 보고서.
10. 이재현, 정상호, 김재근, 박만홍, 1990, "전력구내 지중케이블 강제냉각에서의 적정냉각구간에 관한 연구," 공기조화 냉동공학 논문집, 제2권, 제1호, pp.49-62.
11. 박만홍, 최규식, 김재근, 서정윤, 1992, "전력구트라프내 간접수냉방식에서의 송전용량 변화에 관한 연구," 전기학회 논문집, 제41권, 제5호, pp.445-458.
12. TAIHAN Electric Wire Co. LTD., 1982, Oil Filled Power Cable Catalogue.
13. S. Fujiki, K. Shibata and K. Kido, 1982, "A Theoretical Study of Cooling Technology," Furukawa Review, No.2, pp.43-50.
14. D.J. Skipper, 1979, "The Calculation of Continuous Ratings for Forced Cooled Cables," ELECTRA, No.66, pp.59-84.
15. F.W. Dittus and L.M.K. Boelter, 1930, University of California Publications in Engineering, Vol.2, p.443, Berkeley.
16. 日本電線工業會, 1980, "日本電線工業會 規格 電力 ケーブルの 許容電流," JCS 제168호 D, pp.6-60.

### 부 록

본문의 행렬식에 나타난 행렬의 계수는 다음과 같다.

$$A_{11} = \frac{2}{R_{f1}}, \quad A_{12} = \frac{-2}{R_{f1}},$$

$$A_{21} = \frac{-2}{R_{f1}}, \quad A_{22} = \frac{4}{R_{f1}}, \quad A_{23} = \frac{-2}{R_{f1}},$$

$$A_{32} = \frac{-2}{R_{J1}}, \quad A_{33} = \frac{2}{R_{J1}} + \frac{2}{R_{J1}}, \quad A_{34} = \frac{-2}{R_{J1}},$$

$$A_{43} = \frac{-2}{R_{J1}}, \quad A_{44} = \frac{2}{R_{J1}} + \frac{2}{R_{J1} + R_{G1}},$$

$$A_{413} = \frac{-2}{R_{G1} + R_{J1}},$$

$$A_{55} = \frac{2}{R_{J2}}, \quad A_{56} = \frac{-2}{R_{J2}},$$

$$A_{65} = \frac{-2}{R_{J2}}, \quad A_{66} = \frac{4}{R_{J2}}, \quad A_{67} = \frac{-2}{R_{J2}},$$

$$A_{76} = \frac{-2}{R_{J2}}, \quad A_{77} = \frac{2}{R_{J2}} + \frac{2}{R_{J2}}, \quad A_{78} = \frac{-2}{R_{J2}},$$

$$A_{87} = \frac{-2}{R_{J2}}, \quad A_{88} = \frac{2}{R_{J2}} + \frac{2}{R_{J2} + R_{G2}},$$

$$A_{816} = \frac{-2}{R_{G2} + R_{J2}},$$

$$A_{99} = \frac{2}{R_{J3}}, \quad A_{910} = \frac{-2}{R_{J3}},$$

$$A_{109} = \frac{-2}{R_{J3}}, \quad A_{1010} = \frac{4}{R_{J3}}, \quad A_{1011} = \frac{-2}{R_{J3}},$$

$$A_{1110} = \frac{-2}{R_{J3}}, \quad A_{1111} = \frac{2}{R_{J3}} + \frac{2}{R_{J3}},$$

$$A_{1112} = \frac{-2}{R_{J3}},$$

$$A_{1211} = \frac{-2}{R_{J3}}, \quad A_{1212} = \frac{2}{R_{J3}} + \frac{2}{R_{J3} + R_{G3}},$$

$$A_{1218} = \frac{-2}{R_{G3} + R_{J3}},$$

$$A_{134} = \frac{-2}{R_{J1} + R_{G1}}, \quad A_{1313} = \frac{1}{R_{W1}} + \frac{1}{R_{R1}} + \frac{2}{R_{G1}}$$

$$+ \frac{2}{R_{J1} + R_{G1}},$$

$$A_{1314} = \frac{-1}{R_{W1}}, \quad A_{1315} = \frac{-2}{R_{R1}},$$

$$A_{1413} = \frac{-1}{R_{W1}}, \quad A_{1414} = \frac{1}{R_{G1W1}} + \frac{1}{R_{W1}}$$

$$+ \rho_{W1} C_{W1} Q_{W1} (1/\Delta X),$$

$$A_{1513} = \frac{-2}{R_{R1}}, \quad A_{1515} = \frac{1}{R_{G1R1}} + \frac{4}{R_{R1}}$$

$$- \rho_{R1} C_{R1} Q_{R1} (1/\Delta X), \quad A_{1516} = \frac{-2}{R_{R1}},$$

$$A_{168} = \frac{-2}{R_{J1} + R_{G1}}, \quad A_{1615} = \frac{-2}{R_{R1}},$$

$$A_{1616} = \frac{2}{R_{W2}} + \frac{2}{R_{R1}} + \frac{2}{R_{G2}} + \frac{2}{R_{J1} + R_{G1}},$$

$$A_{1617} = \frac{-2}{R_{W2}},$$

$$A_{1716} = \frac{-2}{R_{W2}}, \quad A_{1717} = \frac{1}{R_{G1W2}} + \frac{4}{R_{W2}}$$

$$+ \rho_{W2} C_{W2} Q_{W2} (1/\Delta X), \quad A_{1718} = \frac{-2}{R_{W2}},$$

$$A_{1812} = \frac{-2}{R_{J3} + R_{G3}}, \quad A_{1817} = \frac{-2}{R_{W2}},$$

$$A_{1818} = \frac{2}{R_{W2}} + \frac{1}{R_{R2}} + \frac{2}{R_{G3}} + \frac{2}{R_{J3} + R_{G3}},$$

$$A_{1819} = \frac{-1}{R_{R2}},$$

$$A_{1918} = \frac{-1}{R_{R2}}, \quad A_{1919} = \frac{1}{R_{G1R2}} + \frac{1}{R_{R2}}$$

$$- \rho_{R2} C_{R2} Q_{R2} (1/\Delta X)$$

$$\begin{aligned}
 B_1 &= W_{C_1} & B_2 &= W_{D_1} & B_3 &= W_{S_1} & B_4 &= 0, \\
 B_5 &= W_{C_2} & B_6 &= W_{D_2} & B_7 &= W_{S_2} & B_8 &= 0, \\
 B_9 &= W_{C_3} & B_{10} &= W_{D_3} & B_{11} &= W_{S_3} & B_{12} &= 0, \\
 B_{13} &= 2T \circ R_{G1}, & B_{14} &= \rho_{W1} C_{W1} Q_{W1} (T_{W1old} / \Delta X) + \\
 & T \circ R_{GW1}, \\
 B_{15} &= -\rho_{R1} C_{R1} Q_{R1} (T_{R1old} / \Delta X) + T \circ R_{GR1}, \\
 B_{16} &= 2T \circ R_{G2} \\
 B_{17} &= -\rho_{W2} C_{W2} Q_{W2} (T_{W2old} / \Delta X) + T \circ R_{GR2}, \\
 B_{18} &= 2T \circ R_{G3} \\
 B_{19} &= -\rho_{R2} C_{R2} Q_{R2} (T_{R2old} / \Delta X) + T \circ R_{GR2}
 \end{aligned}$$

여기서 하첨자 "old"는 하나의 계산구간인  $\Delta X$  이전에서의 값을 뜻한다.

상기 식에서 냉각수의 순환조건에 따른 경계 조건을 대입하여 행렬식을 풀면 정상상태에서의 케이블 및 냉각수의 각 부분에서의 온도를 냉각수 유입구로부터의 거리  $X$ 에 따라 구할 수 있으며 이 온도분포에 따른 케이블 최고허용 온도 범위내에서의 각 케이블의 송전전류를 결정할 수 있다.