

전력구내 지중케이블 강제냉각에서의 적정냉각구간에 관한 연구

A Study on the Optimum Cooling Span of the Underground Power Transmission Cable Equipped by a Forced Cooling System

이 재 현* 정 상 호** 김 재 근** 박 만 홍***
J. H. Lee, S.H.Chung, J.G.Kim, M.H.Park

ABSTRACT

The forced cooling system has been widely applied to passing more electric current in the underground power transmission cable technology.

In this paper, the optimum cooling span of the in-trough-indirect water cooling method within an electric tunnel was investigated. A parametric study was performed for the cable currents, the coolant flow rates, and the coolant inlet temperatures.

As a result, the temperature of the inlet air has been found as the most important parameter in determination of the optimum cooling span.

기 호 설 명

T_C : 154kV 케이블 도체온도[°C]	T_{J1} : 345kV 케이블 외피온도[°C]
T_1 : 154kV 케이블 절연체온도[°C]	T_{W1} : 345kV 케이블이 있는 전조내 냉각수 온도[°C]
T_S : 154kV 케이블 시스온도[°C]	T_{AT1} : 345kV 케이블이 있는 전조내 공기온도[°C]
T_J : 154kV 케이블 외피온도[°C]	T_{TR1} : 345kV 케이블이 있는 전조 외면온도[°C]
T_W : 154kV 케이블이 있는 전조(trough)내 냉각수 온도[°C]	T_R : 귀환수온도[°C]
T_{AT} : 154kV 케이블이 있는 전조내 공기온도[°C]	T_A : 전력구내 냉각공기 온도[°C]
T_{TR} : 154kV 케이블이 있는 전조 외면온도[°C]	T_T : 전력구 온도[°C]
T_{C1} : 345kV 케이블 도체온도[°C]	T_G : 토양 온도[°C]
T_{I1} : 345kV 케이블 절연체온도[°C]	T_O : 기저 온도[°C]
T_{S1} : 345kV 케이블 시스온도[°C]	R_1 : 154kV 케이블 절연체 열저항[°C cm/W]
	R_J : 154kV 케이블 방식층 열저항과 케이

* 한양대학교 공과대학

** 한양대학교 대학원

*** 정회원

- R_3 : 154kV 케이블 표면공기와 전조내 공기 사이의 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_4 : 154kV 케이블 표면공기와 냉각관표면 사이의 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_{11} : 345kV 케이블 절연체 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_{J1} : 345kV 케이블 방식층 열저항과 케이블 접촉 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_{31} : 345kV 케이블 표면공기와 전조내 공기의 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_{43} : 345kV 케이블 표면공기와 냉각관표면 사이의 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_{41} : 냉각관 내면과 냉각수 사이의 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$] ($= R_{411}$)
 R_6 : 냉각관과 전조내 공기 사이의 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$] ($= R_{61}$)
 R_6 : 전조 내면 접촉 열저항(전조와 내면공기 사이) [$^{\circ}\text{C cm/W}$] ($= R_{61}$)
 R_7 : 전조 자체 열저항과 접촉 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$] ($= R_{71}$)
 R_8 : 전력구내 공기 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$] ($= R_{81}$)
 R_9 : 전조와 귀환관 사이의 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$] ($= R_{91}$)
 R_{10} : 귀환관 접촉 열저항(귀환관과 전력구내 공기사이) [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_{11} : 전력구 내면 열저항(전력구내 공기와 전력구 내면사이) [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_{12} : 전력구 자체 열저항 [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 R_G : 전력구 외면 열저항(전력구 외면과 토양사이) [$^{\circ}\text{C cm/W}$]
 W_C : 154kV 케이블 도체 열손실 [W/cm]
 W_D : 154kV 케이블 유전체 열손실 [W/cm]
 W_S : 154kV 시스 열손실 [W/cm]
 (= $P W_C$: P 는 154kV 케이블 전력손실율임)
 W_{E1} : 154kV 케이블이 있는 전조내의 2차 열손실 [W/cm]
 W_{C1} : 345kV 케이블 도체 열손실 [W/cm]
 W_{D1} : 345kV 케이블 유전체 열손실 [W/cm]
 W_{S1} : 345kV 시스 열손실 [W/cm]

- (= $P_1 W_{C1}$: P_1 는 345kV 케이블 전력손실율임)
 W_{E11} : 345kV 케이블이 있는 전조내의 2차 열손실 [W/cm]
 W_{E2} : 전력구내의 2차 열손실 [W/cm]
 $\rho_W C_W Q_W (\partial T_W / \partial X)$: 154kV 케이블이 있는 전조내 냉각관 1개에서 냉각수의 제거 열량
 $\rho_W C_W Q_W (\partial T_{W1} / \partial X)$: 345kV 케이블이 있는 전조내 냉각관 1개에서 냉각수의 제거 열량 [W/cm]
 $\rho_A C_A Q_A (\partial T_A / \partial X)$: 전력구내 냉각공기의 제거 열량 [W/cm]

1. 서 론

전세계적으로 산업의 고도성장과 생활수준의 향상에 따른 에너지 수요는 계속적으로 증가되고 있으며, 특히 전력에너지의 안정된 공급은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한 도시의 인구집중현상에 따라 전력수요가 급격히 증가하여 도심의 대용량 송전의 필요성이 날로 증대되고 있으며, 인구밀집지역내에서 지상으로의 고전압 송전에 따른 어려움이 많다. 이러한 도심지 전력의 부하 집중현상 및 도시미관 등의 영향으로 지중송전의 도입 필요성이 점증되어 지중송전계통이 도입되고 있으며 이러한 추세는 계속 확산될 전망이다.

지중송전계통의 도입과 더불어 전력수요의 증대에 따른 지중전력케이블의 대용량화 연구가 많이 행해지고 있다. 이러한 지중송전케이블에서 전력케이블의 전력손실을 줄이면서 송전용량을 증대시키는 방안으로 강구되어지고 있는 방법중의 하나가 지중송전계통에 강제냉각방식을 도입하는 것이다. 강제냉각방식을 도입한 지중송전은 일본 및 구미각국에서 널리 실용화되고 있지만 국내에서는 아직 그 운용이 미미한 실정이다. 현재 국내에서는 전압이 154kV 까지 지중송전이 이루어지고 있으나 '90년초에 원활한 대전력 수송을 위해 그 전압을 345kV 까지 격상하여 운용될 전망에 있으며^{1),2)} 앞으로 강제냉각방식의 도입을 전제

로한 345kV 케이블을 수용할 전력구 공사가 진행중에 있다.³⁾ 그러나, 국내에서는 이에 대한 기술적 대처방안이 아직 미흡한 상태에 있으며 지중송전연구와 더불어 강제냉각방식 도입을 위한 연구가 중요한 과제로 대두되고 있다.⁴⁾

여러가지 강제냉각방법 중 “전력구 전조(電槽) 간접 수냉방식”(in-trough-indirect-water cooling method within electric tunnel)은 다른 냉각방식보다는 비교적 긴 냉각구간을 기대할 수 있고 기존 사용선로에 쉽게 설치할 수 있으며, 냉각설비 고장 등에 의한 냉각상태 변동시에도 케이블 온도가 천천히 변화하여 계통운용에 여유가 있는 장점 등이 있으므로 외국에서는 전력구 전조 간접 수냉방식이 지중송전 계통의 설계시에 널리 이용되는 방식이다.^{5),6),7)}

이러한 전력구 전조 간접 수냉방식은 전력구에서 화재시 케이블 방제를 위해 설치된 전조에 냉각관을 설치하여 냉각수를 강제순환시킴으로써 전조 및 전력구내의 공기의 온도를 낮추어 케이블에서 발생한 열을 간접적으로 냉각시키는 방법이다.

전력케이블에서는 케이블에 흐르는 전류, 냉매의 온도 및 전력구내 공기온도 등의 영향에 의하여 전력케이블의 도체온도가 변동하게 되며 냉각매체 유입구로부터 거리가 증가함에 따라 이러한 온도들은 모두 상승하게 된다.

본 연구에서는 전력케이블의 기능을 상실하지 않도록 도체온도가 허용온도(보통 80℃ ~ 90℃) 이하로 유지할 수 있으며 아울러 전력구내의 공기온도가 전력구내에서 작업자의 환경을 고려한 허용온도(37℃) 이하로 유지되는 구간을 적정냉각구간이라 정의하고 이 냉각구간이 얼마인가를 예측하고자 하였다. 이를 위하여 전력구내의 8개의 전조가 설치되어 있고 각 전조내에는 3조의 케이블과 케이블 냉각을 위한 2개의 냉각관이 설치되어 있으며, 전력구 바닥에는 냉각수를 회수하는 2개의 귀환관이 있는 경우의 전력구 전조 간접 수냉방식에서 냉각수 및 냉각공기 유입구로부터의 거리에 따르는 전력케이블 도체의 온도,

냉각수의 온도 및 냉각공기온도 등을 예측하였으며 이 예측결과에 의하여 적절한 냉각구간을 결정하였다. 아울러 여러가지 파라미터 즉, 냉각수 유입온도, 냉각수 유량, 냉각공기 유량, 냉각공기 유입온도, 154kV 케이블 전류 그리고 345kV 케이블 전류를 변화시키면서 적정냉각구간의 변동을 살펴보았다.

2. 케이블의 배치 및 열등가회로

2.1 배 치

실제로 운용되고 있는 전력구 전조 간접 수냉방식에서의 예를 참조하여⁸⁾ 본 논문에서 선택한 케이블 및 냉각관의 배치를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보면 폭 d_8 , 높이 d_9 인 전력구내에서 폭 d_{18} , 높이 d_{19} 인 8개의 전조가 있으며 각 전조내에서는 두개의 냉각관과 3개의 케이블이 배치되어 있다. 또한 전력구 아랫면에는 2개의 귀환관이 보인다.

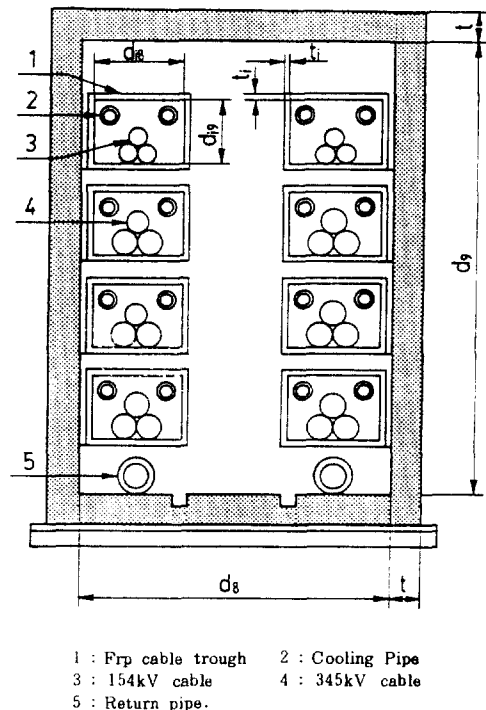


Fig. 1 layout of in-trough-indirect-water cooling method within an electric tunnel ;

8개의 전조중에 윗쪽 2개의 전조내의 케이블에서는 154kV가 송전되고 있으며 그외의 6개 전조내의 케이블에서는 345kV가 송전되고 있다.

2.2 열등가회로

케이블에 전기가 통과할 때 발생하는 도체 열손실 및 유전체 열손실에 따라 발생한 열은 케이블의 절연체 및 시스(sheath)를 통하여 외부로 방출된다. 이러한 열의 방출형태는 전기가 통과하는 초기에는 각부의 열용량 때문에 열이 케이블 및 케이블 주위의 각 물체에 축적되지만 점차 주위에 전달되어 최종적으로는 정상상태로 된다. 이러한 현상은 전기회로에서 전기저항 및 정전용량의 분포회로에 전류를 통하는 경우의 현상과 비슷하며, 정상상태에서 온도분포는 케이블 및 전력구내 구성요소의 열저항값만으로 결정된다.

본 연구에서는 전력구 전조 간접 수냉방식을 실제 냉각방식으로 채택할 경우 전력구내의 모든 열용량이 포화상태 이룬후 정상상태의 열해석만 고려하기로 한다. 강제냉각 방식에서 적정냉각구간 결정을 위한 케이블 및 냉매의 온도분포를 알기 위해서는 일반적인 열

해석 방법을 모든 계통내에서의 열적 평형상태에서 이에 대한 열등가회로(thermal equivalent 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 열등가회로에 의한 해석방법이 현재 대부분 이용되고 있는 실정이다.^{9),10),11)}

열등가회로를 적용하는데 따른 기본적인 가정은 다음과 같다.¹²⁾

- (1) 케이블의 전력손실은 길이에 따라 일정하다.
- (2) 모든 물질의 물성치는 계통내의 길이에 따라 온도 및 압력변화에 영향을 받지않는다.
- (3) 케이블 유전체내에 분포된 유전체 손실은 케이블 도체 및 시스에 일정하게 분포되어 있다.

Fig.2에는 Fig.1에 나타낸 전력구 전조 간접 수냉방식의 배치도에 대한 열등가회로를 나타내었다. 그림에서 T는 각 위치에서 온도

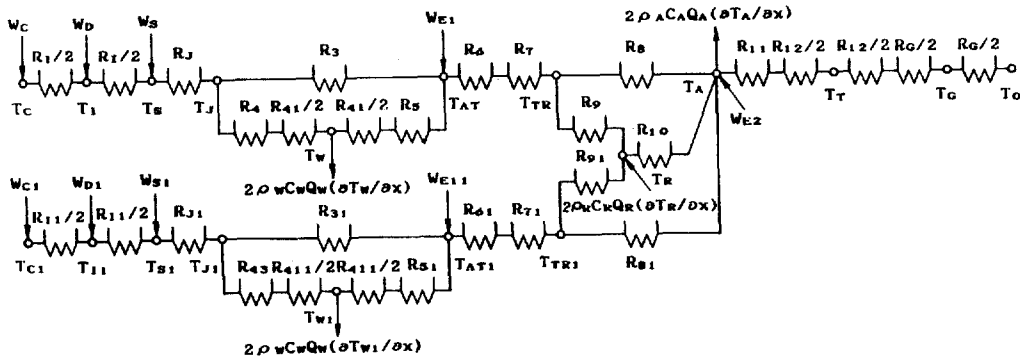


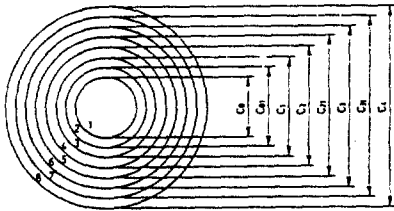
Fig.2 Thermal equivalent circuit of present investigation

를 나타내며 R은 열저항을 나타낸다. W는 이 회로로 유입되는 열량을 뜻하며 $\rho C Q \partial T / \partial x$ 항은 전력구 축방향을 X방향이라 하였을때 축방향 단위길이당 냉각수 혹은 냉각공기에 의해 제거된 열량을 나타낸다.

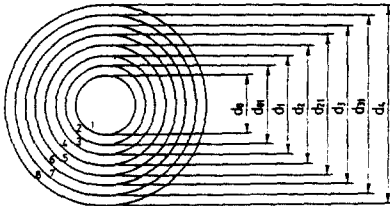
2.3 케이블, 냉각관 및 귀환관의 상세

케이블의 도체에서 발생된 열량은 우선 절연층, 시스, 자켓(jacket) 등의 케이블 보호구성물질을 통하여 외부로 전달되므로 케이블

의 내부구조는 열전달 측면에서 중요한 변수가 된다. Fig. 3은 154kV 및 345kV 케이블의 내부구조를 보여준다.¹³⁾ 그리고 Fig. 4는 냉각관과 귀환관의 내부구조를 보여준다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸 여러가지 치수는 Table 1에 상세하게 나타내었다.



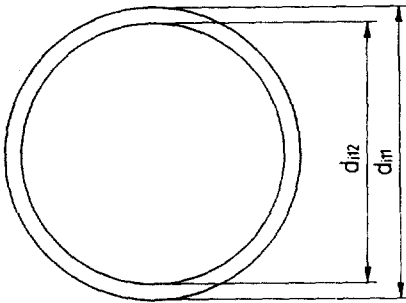
(a) 154kV cable



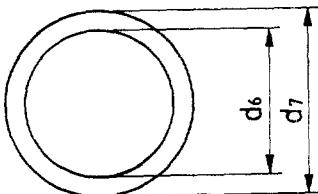
(b) 345kV cable

- 1 : Central oil duct 2 : Metal tape
- 3 : Conductor 4 : Insulation
- 5 : Screen 6 : Aluminum sheath
- 7 : Jacket 8 : Outer cover.

Fig. 3 Structure of cable



(a) Return pipe



(b) Cooling pipe

Fig. 4 Structure of water pipe

Table 1 Details of Cable and Cooling Elements

SECTION	ITEM	SYMBOL	LENGTH (mm)
154kV CABLE	Metal tape I.D	c ₀	14.0
	Conductor I.D	c ₀₁	15.6
	Conductor O.D	c ₁	57.5
	Insulation O.D	c ₂	84.5
	Screen O.D	c ₂₁	85.1
	Aluminum Sheath O.D	c ₃	89.9
	Jacket O.D	c ₃₁	98.9
	Cable O.D	c ₄	111.0
345kV 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 ₆	100.0
	O.D	d ₇	110.0
RETURN PIPE	O.D	d ₁₁₁	200.0
	I.D	d ₁₁₂	190.0
TROUGH	Width	d ₁₈	630.0
	Height	d ₁₉	400.0
TUNNEL	Width	d ₈	2300.0
	Height	d ₉	2600.0

— note — I.D.; 내경, O.D.; 외경

3. 기본방정식 및 풀이방법

3.1 연립방정식의 구성

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

154kV 케이블;

$$\frac{T_c - T_1}{R_1/2} = W_c \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{T_1 - T_s}{R_1/2} = \frac{T_c - T_1}{R_1/2} + W_D \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{T_s - T_J}{R_J} = \frac{T_1 - T_s}{R_1/2} + W_S \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{T_J - T_{AT}}{R_3} + \frac{T_J - T_W}{R_4 + R_{41}/2} = \frac{T_s - T_J}{R_J} \dots\dots (4)$$

154kV 케이블이 있는 전조내 냉각관;

$$\begin{aligned} \frac{T_W - T_{AT}}{R_{41}/2 + R_5} + 2\rho_w C_w Q_w (\partial T_w / \partial X) \\ = \frac{T_J - T_W}{R_4 + R_{41}/2} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

154kV 케이블이 있는 전조;

$$A_{64} = \frac{1}{R_3}, \quad A_{65} = \frac{2}{R_{41} + 2R_5}, \quad A_{66} = -\frac{1}{R_3} - \frac{2}{R_{41} + 2R_5} - \frac{1}{R_6 + R_7},$$

$$A_{67} = \frac{1}{R_6 + R_7},$$

$$A_{76} = \frac{-1}{R_6 + R_7}, \quad A_{77} = \frac{1}{R_6 + R_7} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9},$$

$$A_{78} = \frac{-1}{R_9},$$

$$A_{716} = \frac{-1}{R_8},$$

$$A_{87} = \frac{1}{R_9}, \quad A_{88} = -\frac{1}{R_9} - \frac{1}{R_{91}} - \frac{1}{R_{10}} + \rho_R C_R Q_R (2/\Delta X),$$

$$A_{815} = \frac{1}{R_{91}}, \quad A_{816} = \frac{1}{R_{10}}$$

$$A_{99} = \frac{2}{R_{11}}, \quad A_{910} = \frac{-2}{R_{11}}$$

$$A_{109} = \frac{-2}{R_{11}}, \quad A_{1010} = \frac{4}{R_{11}}, \quad A_{1011} = \frac{-2}{R_{11}}$$

$$A_{1110} = \frac{-2}{R_{11}}, \quad A_{1111} = \frac{1}{R_{J1}} + \frac{2}{R_{11}},$$

$$A_{1112} = \frac{-1}{R_{J1}}$$

$$A_{1211} = \frac{-1}{R_{J1}}, \quad A_{1212} = \frac{1}{R_{31}} + \frac{2}{2R_{43} + R_{411}} + \frac{1}{R_{J1}},$$

$$A_{1213} = \frac{-2}{2R_{43} + R_{411}}, \quad A_{1214} = \frac{-1}{R_{31}}$$

$$A_{1312} = \frac{-2}{2R_{43} + R_{411}}, \quad A_{1313} = \frac{2}{R_{411} + 2R_{51}} + \frac{2}{2R_{43} + R_{411}} + \rho_W C_W Q_W (2/\Delta X),$$

$$A_{1314} = \frac{-2}{R_{411} + 2R_{51}}$$

$$A_{1412} = \frac{1}{R_{31}}, \quad A_{1413} = \frac{2}{2R_{51} + R_{411}},$$

$$A_{1415} = \frac{1}{R_{61} + R_{71}}$$

$$A_{1414} = -\frac{2}{R_{411} + 2R_{51}} - \frac{1}{R_{61} + R_{71}} - \frac{1}{R_{31}},$$

$$A_{158} = -\frac{1}{R_{91}}$$

$$A_{1514} = \frac{-1}{R_{61} + R_{71}}, \quad A_{1515} = \frac{1}{R_{61} + R_{71}} + \frac{1}{R_{81}} + \frac{1}{R_{91}}$$

$$A_{1516} = -\frac{1}{R_{81}}, \quad A_{167} = -\frac{1}{R_8}, \quad A_{168} = -\frac{1}{R_{10}},$$

$$A_{1615} = -\frac{1}{R_{81}}$$

$$A_{1616} = \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_{81}} + \frac{1}{R_{10}} + \frac{2}{2R_{11} + R_{12}} + \rho_A C_A Q_A (1/\Delta X)$$

$$A_{1617} = \frac{-2}{2R_{11} + R_{12}}, \quad A_{1716} = \frac{-2}{2R_{11} + R_{12}}$$

$$A_{1717} = \frac{2}{R_{12} + R_G} + \frac{2}{2R_{11} + R_{12}},$$

$$A_{1718} = \frac{-2}{R_{12} + R_G}$$

$$A_{1817} = \frac{-2}{R_{12} + R_G}, \quad A_{1818} = \frac{2}{R_G} + \frac{2}{R_{12} + R_G}$$

$$B_1 = W_C, \quad B_2 = W_D, \quad B_3 = W_S$$

$$B_4 = 0, \quad B_5 = 2\rho_W C_W Q_W (T_{Wold}/\Delta X)$$

$$B_6 = -W_{E1}, \quad B_7 = 0$$

$$B_8 = 2\rho_R C_R Q_R (T_{Rold}/\Delta X), \quad B_9 = W_{C1}$$

$$B_{10} = W_{D1}, \quad B_{11} = W_{S1}, \quad B_{12} = 0$$

$$B_{13} = 2\rho_W C_W Q_W (T_{Wold}/\Delta X), \quad B_{14} = -W_{E11}$$

$$B_{15} = 0, \quad B_{16} = W_{E2} + \rho_A C_A Q_A (T_{Aold}/\Delta X)$$

$$B_{17} = 0, \quad B_{18} = 2T_O/R_G \dots\dots\dots (19)$$

여기서 하첨자 “old” 는 하나의 계산구간인 ΔX 이전에서의 값을 뜻한다.

상기 식에서 냉매의 순환조건에 따른 경계조건을 대입하여 행렬식을 풀면 정상상태에서의 케이블 및 전력구내의 각 부분의 온도를 냉각수 및 냉각공기 유입구로부터의 거리 X 에 따라 구할 수 있으며 이 온도분포에 따라 케이블 및 전력구내 공기의 허용온도 범위내에서의 적정냉각구간을 결정할 수 있다.

3.2 열저항 값 및 열발생량의 산정

(1) 열저항

R_1 는 케이블 도체에 인접한 절연체의 열저항을 나타내며, R_j 는 케이블 자켓의 열저항을 나타낸다. 이 값들의 산정은 원통형계에서

정상 1 차원 전도 열전달이 발생한다는 가정에서의 열저항 R 을 아래식에 의하여 산정하였다.

$$R = \ln(d_2/d_1)/(2\pi k) \dots\dots\dots (20)$$

여기서 d_1 , d_2 및 k 는 각각 열전달 물질의 내경, 외경 및 열전도계수이다.

원형케이블 표면과 전조 내부의 공기 사이에는 자연대류에 의한 열전달이 발생된다. 이 두 표면사이의 열저항을 $R_3 (=R_{31})$ 로 나타내었으며 $10^{-5} < R_{ad} < 10^{12}$ 범위에서 Churchill과 Chu¹⁴⁾가 추천한 아래와 같은 상관관계식을 이용하여 그 값을 결정하였다.

$$Nu_D = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 R_{ad}^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2 \dots\dots\dots (21)$$

$$R_3 = 1/(\pi k Nu_D) \dots\dots\dots (22)$$

여기서 Pr은 주위공기의 Prandtl 수이며 Rayleigh 수인 R_{ad} 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{ad} = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) D^3}{\alpha \nu} \dots\dots\dots (23)$$

여기서 T_s 및 T_∞ 는 각각 케이블 표면온도 및 주위 공기온도이며 실제계산에서 $(T_s - T_\infty)$ 의 값은 30 °C로 정하였다. α , ν 및 D 는 각각 공기의 열확산계수, 동점성계수 및 케이블 외경이다.

$R_4 (=R_{43})$ 는 케이블표면과 전조내의 냉각관표면 사이의 열저항을 뜻하며 두 표면 사이의 자연대류 이외의 열전달에서의 열저항을 나타낸다. 엄밀하게는 복사 및 전도 열전달이 발생하지만 실제 공학적인 열저항 값을 인위적으로 아주 크게 규정하였다.

$R_{41} (=R_{411})$ 은 냉각관 내부면과 냉각유체 사이의 열저항을 나타내며 냉각관에 흐르는 냉각수에 기초하여 Reynolds 수가 10^5 정도이므로 Dittus¹⁵⁾가 제한한 아래의 강제대류에 관한 Nusselt 수 상관관계식을 이용하여 산정하였다.

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.3} \dots\dots\dots (24)$$

$$Re_D = u D/\nu \dots\dots\dots (25)$$

$$R_{41} = 1/(Nu_D k \pi) \dots\dots\dots (26)$$

여기서 Re는 Reynolds 수이며 u 및 D 는 각각 냉각관내 유동의 평균속도 및 관의 내경이다. 하첨자 D 는 관의 내경에 기준한 것임을 나타낸다.

$R_5 (=R_{51})$ 은 냉각관과 전조 내부공기 사이의 열저항이므로 R_3 의 환산방법과 같은 방법으로 결정하였다.

$R_6 (=R_{61})$ 은 전조내면과 전조 내부공기와 접촉열저항을 나타내며 아래식으로 나타내었다.^{16,17)}

$$R_6 = \frac{10 M_t \Omega_5}{\pi \sqrt{(xy)}} \dots\dots\dots (27)$$

여기서

M_t ; 전조내 케이블의 수

Ω_5 ; 전조의 접촉열저항계수 [°C cm²/W]

x ; 전조의 폭 [mm]

y ; 전조의 높이 [mm]

이다.

R_7 은 전조 자체의 열저항을 나타내며 아래식으로 나타내었다.¹⁷⁾

$$R_7 = \frac{\Omega_6}{2\pi} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(xy)} + 2t_i}{\sqrt{(xy)}} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

여기서

Ω_6 ; 전조의 고유열저항 [°C cm / W]

t_i ; 전조의 두께 [mm]

이다.

R_8 은 전조표면과 전력구 내부면사이의 열저항을 나타내며 전력구 내부로는 냉각공기가 강제대류되고 있으므로 R_{41} 을 산출할때와 같은 방법으로 결정되어진다. 다만 R_{41} 의 산출시에는 강제대류 유체가 물이지만 여기서는 공기인 것이 다르다.

$R_9 (=R_{91})$ 은 전조와 귀환관 사이의 열저항을 나타내며, R_4 의 값을 아주 크게 정의한것과 같은 이유에서 큰 저항값으로 규정하였다.

R_{10} 은 귀환관과 전력구 내부공기 사이의 열저항을 나타내며 R_8 을 선정하는 방법과 동일한 방법으로 결정하였다.

R_{11} 은 전력구 내부면에서의 접촉열저항을 나타내며 아래와 같이 나타낸다.^{16,17)}

$$R_{11} = \frac{10 M_t \Omega_7}{\pi \sqrt{(ZY)}} \dots\dots\dots (29)$$

여기서

- M_t ; 전력구내 전조의 수
- Ω_7 ; 전력구의 접촉열저항계수 [$^{\circ}\text{C cm}^2/\text{W}$]
- Z ; 전력구의 폭 [mm]
- Y ; 전력구의 높이 [mm]

이다.

R_{12} 는 전력구 자체의 열저항을 나타내며 아래식으로 나타내었다.¹⁷⁾

$$R_{12} = \frac{\Omega_8}{2\pi} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(ZY)} + 2t}{\sqrt{(ZY)}} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

여기서

- Ω_8 ; 전력구의 고유열저항 [$^{\circ}\text{C cm} / \text{W}$]
- t ; 전력구의 두께 [mm]

이다.

R_G 는 전력구의 외표면과 기준 지표면 사이의 열저항이며 이는 전력구 외표면과 주위토양 사이의 접촉열저항 및 토양에서 지표사이의 열저항의 합으로 볼 수 있다. 이중 전자는 R_{11} 을 환산한 방법으로 산정하였으며 후자는 전력구 외표면의 열전달 면적이 아주 크므로 저항값을 0으로 두었다.

(2) 열발생량

$W_C (=W_{C1})$ 은 도체에서 발생하는 열량을 나타내며, 아래식에 의하여 산정하였다.¹⁶⁾

$$W_C = I^2 r_{ac} \dots\dots\dots (31)$$

여기서 I 는 도체에 흐르는 전류이며, r_{ac} 는 최대교류 저항이다.

$W_D (=W_{D1})$ 은 절연체에 의하여 발생하는 유전체 열발생량을 나타내며, 아래식에 의하여 산정하였다.¹⁶⁾

$$W_D = 2\pi f C n \frac{E^2}{3} \tan \delta \times 10^{-5} [\text{W/cm}] \dots (32)$$

여기서

- f ; 주파수 [Hz]
- C ; 정전용량 [$\mu\text{F/km}$]
- n ; 케이블내의 전력선수
- E ; 최고 선간전압 [kV]
- $\tan \delta$; 유전 탄젠트(dielectric tangent)

이다.

$W_S (=W_{S1})$ 은 시스에서 발생하는 열량을 나타내며 아래식에 의하여 산정하였다.¹⁶⁾

$$W_S = PW_C \dots\dots\dots (33)$$

여기서 P 는 전력 손실율을 나타내며 회로 손실율과 와전류 손실율을 합한것과 같다.

W_{E1} 은 154kV 케이블이 3조 들어있는 전조내에서의 2차 계통 발생열량을 나타낸다. 이는 하나의 154kV 케이블을 기준으로 하였을때 나머지 두개의 154kV 케이블은 전조내의 공기를 데워주는 열원 구실을 하기 때문이다. 따라서 $W_{E1} = 2(W_C + W_D + PW_C)$ 와 같이 산정하였다.

W_{E11} 은 345kV 케이블이 3조 들어있는 전조내에서 2차계통 발생열량을 나타내며 계산 방법은 W_{E1} 의 환산방법과 유사하다.

W_{E2} 는 154kV 케이블이 3조 있는 전조 2개와 345kV 케이블이 3조 있는 전조 6개를 가지고 있는 전력구내에서의 2차계통 발생열량을 나타낸다. 이는 154kV 케이블이 있는 전조 1개와 345kV 케이블이 있는 전조 1개를 기준으로 하였을때 나머지 전조는 전력구내의 공기를 데워주는 열원구실을 하기 때문이다. 따라서 $W_{E2} = 3(W_C + W_D + PW_C) + 15(W_{C1} + W_{D1} + P_1 W_{C1})$ 와 같이 산정하였다.

3.3 풀이방법

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

계산과정에 야기되는 약간의 어려움은 귀환 냉매의 온도 계산이다. 귀환 냉매는 유입된 냉매가 냉각구간의 끝에서 되돌아오기 때문에, 냉각구간 초기 위치에서부터 전력의 영향으로 가열되는 유입 냉매의 냉각구간 끝 온도와 귀환 냉매의 출발온도가 일치되어야 한다. 그러나 냉각구간의 시작 위치부터 출발하여 차례로 전진(marching)하여 냉각구간 끝까지 진행되는 계산방법에서는 냉각구간 시작 위치의 귀환냉매 온도를 가정해줄 수 밖에 없다. 이 가정된 온도에 의하여 계산된 냉각구간 끝에서의 귀환냉매 출발온도는 유입냉매의 냉각구간 끝온도와 다르다. 그러므로 냉각구간 시작 위치의 귀환냉매온도를 다시 수정하여 계산을

반복하여야 한다. 이때 수정량은 냉각구간 끝에서의 두 냉매의 온도차이 만큼이 알맞으나 여타 부위에서의 온도 영향 때문에 하향이완 (under relaxation)시킬 필요가 있다. 반복 계산횟수는 냉각구간 초기위치에서의 귀환수 온도설정에 따라 다르며 대략 20 회 정도의 반복 계산후에 수렴된다. 수렴 기준 판정은 냉각구간 끝에서 두 냉매의 온도차이가 0.1℃ 이하로 될 때를 기준하였다. 반복계산 과정에서는 최초 1회의 계산 진행도중에 선정된 냉각구간내에서 케이블 도체의 온도가 최고 허용온도를 초과하거나 혹은 전력구내의 공기온도가 허용온도를 초과하면 냉각구간을 축소시켜 재조정 한 후 이후의 반복과정을 계속하여 최종 온도값들을 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 지중송전계통의 전력구 전조 간접 수냉방식에 실제 운용되는 자료를 참조하여⁸⁾ 하나의 표준자료를 설정하고 이 표준자료를 기준으로 하여 적정냉각구간을 결정 한 후 냉각수 유입온도, 냉각수 유량, 냉각공기 유량, 냉각공기 유입온도, 154kV 케이블의 전류, 345kV 케이블의 전류 등의 각 파라미터를 변화시키면서 적정냉각구간의 변화를 검토하였다.

4.1 표준자료

(1) 전력자료

케이블 : OF (Oil-Filled) 케이블 (도체공칭 단면적 2,000mm²)
 전 압 : 154kV 및 345kV
 전 류 : 154kV 케이블에서 800A, 345kV 케이블에서 400A

(2) 냉각계통 관련자료

냉각수 유입온도 : 25℃
 귀환수 출구온도의 가정값 : 30℃
 냉 매 : 물 및 공기
 물의 밀도 : 1,000 kg/m³
 물의 열용량 : 4,190 J/kg℃
 유입 냉각수 유량 : 0.003m³/s

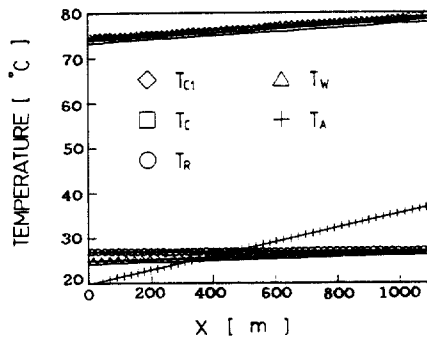
귀환 냉각수 유량 : 0.048m³/s
 공기의 밀도 : 1.1614kg/m³
 공기의 열용량 : 1.007J/kg℃
 공기의 유량 : 19.435m³/s

(3) 기타자료

기저온도 : 25℃
 도체 최고허용온도 : 80℃
 전력구내 공기 최고허용온도 : 37℃
 전진계산 거리간격 : 1m
 수렴 이완계수 : 0.5

(4) 표준자료에 의한 계산결과

Fig. 5에는 냉각매체 유동시에 냉매유입 시작 위치로부터 전력구의 축방향 X에 따른 154kV 케이블의 도체온도 T_C, 345kV 케이블의 도체온도 T_{C1}, 154kV 케이블이 설치된 전조내의 냉각수 온도 T_w, 전력구내의 귀환수온도 T_R 그리고 전력구내의 냉각공기 온도 T_A를 나타내었다. 그림에서 횡축은 냉매유입 시작 위치로부터 전력구 축방향으로의 거리를 나타내며 종축은 온도를 나타낸다. 아울러 이 그림은 각 케이블 도체온도 및 전력구내 공기온도가 모두 허용온도 이하로 유지될 수 있는 한계까지의 축방향 거리 범위내에서 각 부위의 온도분포를 보여주고 있다. 여기서 보면 냉매유입 시작 위치로부터 1,095m에 걸쳐서 154kV 케이블의 도체온도가 약 74℃에서 79℃ 정도로 상승되며 154kV 케이블이 설



T_{C1} : Conductor temperature of 345kV cable
 T_C : Conductor temperature of 154kV cable
 T_R : Temperature of return pipe
 T_w : Temperature of cooling pipe
 T_A : Air temperature in tunnel.

Fig. 5 Temperature distribution of various elements in tunnel ;

치된 전조내의 냉각 매체온도는 25℃에서부터 27℃ 정도로 상승되며, 345kV 케이블의 도체온도는 75℃에서 79℃ 정도로 상승된다. 이 과정중 귀환 냉매온도는 거의 일정함을 알 수 있으며 전력구내의 공기온도는 20℃에서 37℃로 약 17℃ 상승된다.

적정냉각구간은 케이블 도체의 온도와 전력구내의 공기온도 모두가 각각의 허용온도를 넘지 않는 최대 축방향 거리로 결정된다. 따라서 상기 표준자료에 의한 위와 같은 온도변화에 의하면 축방향거리 1.095m에서 전력구내의 공기온도가 허용한계인 37℃에 접근되었으므로 표준 자료에서의 적정냉각구간은 1.095m라고 할 수 있다. 이후 논의되는 파라미터 변화에 따른 적정냉각구간의 결정은 모두 이러한 방법에 의하여 구하여진다.

4.2 각 파라미터의 변화에 따른 적정냉각구간의 변동

(1) 냉각수 유입온도 변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 냉각수의 유입온도만을 5℃에서 50℃까지 5℃ 간격으로 변화시키면서 적정냉각구간을 산출한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 횡축 T_{inlet} 는 냉각수 유입온도를 나타내며 종축 S 는 적정냉각구간을 나타내고 있다.

표준자료에 해당되는 25℃ 이하의 냉각수 유입온도에서는 전력구내의 공기온도가 표준

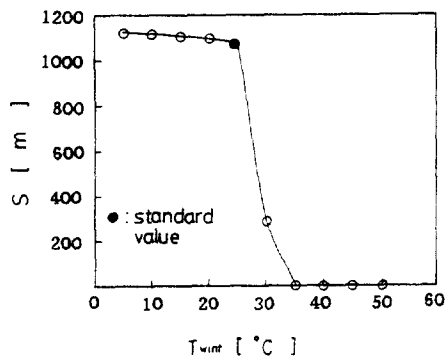


Fig. 6 Effect of optimum cooling span on inlet water cooling temperature variation

자료 경우의 공기온도보다 약간 낮아졌으며 이에 따라 냉각구간이 다소 길어졌다. 그러나 25℃ 이상에서는 상황이 달라진다. 즉, 30℃의 냉각수 유입온도에서는 축방향거리 약 300m에서 벌써 345kV 케이블의 도체온도가 허용온도 범위를 초과한다. 35℃ 이상의 냉각수 온도에서는 축방향거리 처음부터 345kV 케이블 도체온도가 허용한계를 넘어서므로 35℃ 이상의 냉각수는 냉각효과를 전혀 갖지 못한다고 할 수 있다.

(2) 유입냉각수 유량의 변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 유입냉각수 유량만을 0.0005m³/s에서 0.0055m³/s까지 0.0005m³/s 간격으로 변화시키면서 적정냉각구간을 산출한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 횡축 q_w 는 유입냉각수 유량을 나타내며 종축 S 는 적정냉각구간을 나타내고 있다. 여기서 보면 표준자료에 해당되는 0.003m³/s 이하의 냉각수 유량으로 0.0025m³/s까지는 적정냉각구간이 1.090m 정도로 유지되었으나 이 이하로 유량이 감소하면 적정냉각구간이 급격히 짧아진다. 이는 0.0025m³/s 이하의 냉각수 유량 상황에서는 짧은 축방향거리에서도 345kV 도체온도가 허용한계에 도달하기 때문이다. 또한 냉각수 유량이 0.0025m³/s 이상일 때 적정냉각구간이 1.095m로 일정한 것은 유입냉각수의 유량이 증가하더라도 전력구내 공기온도가 이미 허용온도에 도달되었기 때문이다.

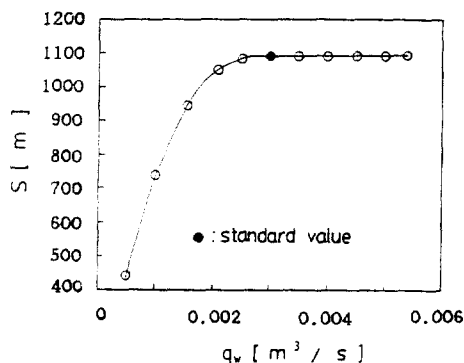


Fig. 7 Effect of optimum cooling span on inlet water flow rate variation

(3) 유입공기유량의 변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 유입공기유량을 $4.435 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 $49.435 \text{ m}^3/\text{s}$ 까지 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 간격으로 변화시키면서 적정냉각구간을 산출한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 횡축 q_A 는 유입공기유량을 나타내며, 종축 S 는 적정냉각구간을 나타내고 있다. 여기서 보면 표준자료에 해당되는 $19.435 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 공기유량을 전후하여 공기유량이 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때까지 적정냉각구간이 유량에 거의 비례하여 증가된다. 구체적인 계산결과에 의하면 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 정도 이하에서는 적정냉각구간은 전력구내 공기온도 허용치에 따라서 결정되고 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상일 때는 345 kV 케이블 도체허용온도에 의하여 결정되었다.

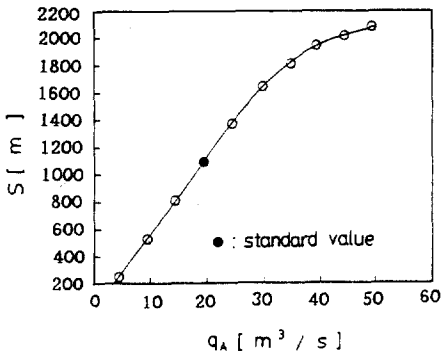


Fig. 8 Effect of optimum cooling span on inlet air flow rate variation

(4) 냉각공기 유입온도의 변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 유입공기의 온도를 -5°C 에서 37°C 까지 변화시키면서 적정냉각구간을 산출한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 횡축 T_{air} 는 냉각공기 유입온도를 나타내며, 종축 S 는 적정냉각구간을 나타낸다. 여기서 보면 표준자료에 해당되는 20°C 의 냉각공기 유입온도를 전후하여 냉각공기 유입온도에 따라 적정냉각구간은 거의 반비례함을 알 수 있다. 구체적인 계산결과에 의하면 10°C 이하에서는 적정냉각구간이 345 kV 케이블의 도체허용온도에 따라 결정되며 10°C 이상에서는 전력구 공기온도에 따라 결정되었다. 이 그림을 냉각수 유입온도

변화에 따른 적정냉각구간을 제시한 Fig. 6과 비교하여 보는것은 특별한 의미가 있다. 즉, 냉각수 및 냉각공기의 유입온도가 표준자료의 값보다 높아지면 적정냉각구간의 감소 거동이 유사하다. 그러나, 냉각수 유입온도가 표준자료 값보다 낮아져도 적정냉각구간은 더 길어지지 않으며 냉각공기 유입온도가 표준자료 값보다 낮아지면 적정냉각구간은 유입온도 값에 반비례하여 증가됨을 알 수 있다.

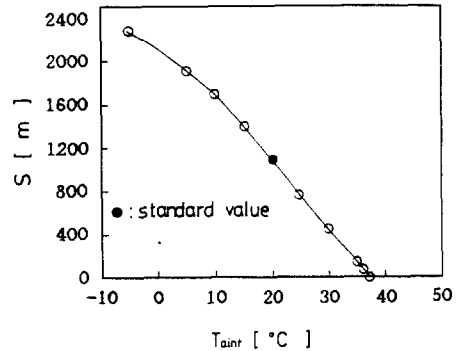


Fig. 9 Effect of optimum cooling span on inlet air temperature variation

(5) 154kV 케이블의 전류변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 154 kV 케이블의 전류를 100 A 에서 $1,000 \text{ A}$ 까지 100 A 간격으로 변화시키면서 적정냉각구간을 산출한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 횡축 I 는 154 kV 케이블의 전류를 나타내며, 종축 S 는 적정냉각구간을 나타낸다. 여기서 보면 표준자료에 해당되는 800 A 이하에서는 전류에 반비례하여 적정냉각구간이 약간 증가됨을 알 수 있으며 800 A 이상에는 적정냉각구간이 급격히 짧아짐을 알 수 있다. 구체적인 계산결과에 따르면 800 A 이하에서는 적정냉각구간이 전력구내 공기온도 허용치의 영향에 의하여 결정되며 800 A 이상에서는 154 kV 케이블의 도체허용온도의 영향에 의하여 결정되었다.

(6) 345kV 케이블의 전류변화

표준자료에서 여타 모든 변수를 고정시키고 345 kV 케이블의 전류를 50 A 에서 500 A 까지 50 A 간격으로 변화시키면서 적정냉각구간을

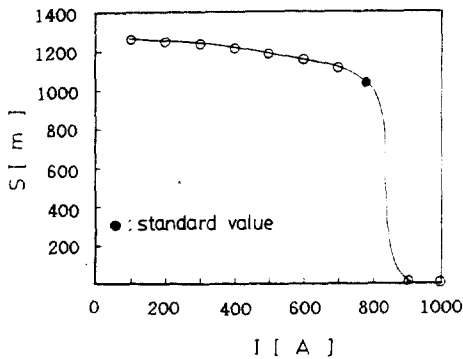


Fig. 10 Effect of optimum cooling on the current variation of 154 kV cable

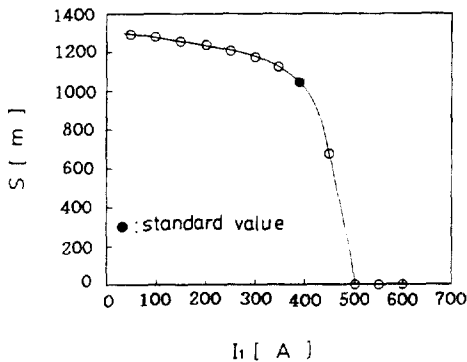


Fig. 11 Effect of optimum cooling span on the current variation of 345 kV cable

산출한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 횡축 I_1 는 345kV 케이블의 전류를 나타내며, 종축 S 는 적정냉각구간을 나타낸다. 여기서 보면 표준자료의 400A 이하에서는 전류에 반비례하여 적정냉각구간이 약간 증가됨을 알 수 있으며 400A 이상에는 적정냉각구간이 급격히 짧아짐을 알 수 있다. 구체적인 계산 결과에 따르면 400A 이하에서는 적정냉각구간이 전력구내 공기온도 허용치의 영향에 의하여 결정되며 400A 이상에서는 345kV 케이블의 도체허용온도의 영향에 의하여 결정되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 전력구내에 154kV 케이블 3조와 2개의 냉각관을 가진 전조 2개, 345

kV 케이블 3조와 2개의 냉각관을 가진 전조 6개를 합하여 모두 8개의 전조가 설치되어 있으며, 전력구 바닥에는 냉각수를 회수하는 2개의 귀환관이 있는 전력구 전조 간접수냉방식에서 하나의 표준조건을 설정하여 전력구 축방향 거리증가에 따라 각 부위의 온도변동을 규명하여 적정냉각구간을 결정하였으며 나아가서 표준조건을 자료로부터 6가지의 파라미터 즉, 냉각수 유입온도, 냉각수 유량, 냉각공기 유량, 냉각공기 유입온도, 154kV 케이블 전류 그리고 345kV 케이블 전류를 하나씩 변화시키면서 적정냉각구간의 변동을 살펴보았다.

표준자료에 의하여 계산된 적정냉각구간은 1.095m이었으며 전력구내 공기온도에 의해서 결정되어졌다. 냉각공기 유입온도를 제외한 5개의 파라미터 값들이 표준자료 값보다 작아지면 전력구내 공기온도에 의해 적정냉각구간이 결정되어지며 표준자료 값보다 커지면 케이블 도체허용온도에 의해 적정냉각구간이 결정되어지는데 154kV 케이블 보다 345kV 케이블에서의 도체허용온도에 영향을 더 많이 받는다.

특히 냉각수 및 냉각공기 유입온도 변화에 따른 적정냉각구간 변동은 냉각수 및 냉각공기의 유입온도가 표준자료의 값보다 높아지면 적정냉각구간의 감소 거동이 유사하다. 그러나 냉각수 유입온도가 표준자료 값보다 낮아져도 적정냉각구간은 더 길어지지 않으며 냉각공기 유입온도가 표준자료 값보다 낮아지면 적정냉각구간은 유입온도 값에 반비례하여 증가됨을 알 수 있다.

그러므로 실제 지중송전계통에서 전력구 전조 간접냉각방식을 채택하여 설계할 시에는 적정냉각구간을 결정하는데 중요한 역할을 하는 유입냉각공기의 온도를 다른 파라미터 보다도 신중히 고려해야 한다.

참 고 문 헌

1. 김세일, "지중송전 현황과 전망", 한국전력공사 기술연구원, 지중 송배전 Work-

- shop, pp. 3~29. 1984. 3.
2. 김세일, "송전계통의 지중화 계획", 대한전기학회지, Vol. 27, No. 10, pp. 4~10. 1988.
 3. 한국전력기술(주), "345kV 동서울 S/S - 왕십리 S/S 간 전력구 건설공사", 한국전력기술(주), 기본설계보고서 1987. 12.
 4. 이종범, 김대경, 강동식, 강도현, 이수현, 정성환, "지중송전계통의 냉각방식에 관한 연구", 한국전기연구소, '8E A030. 1989.
 5. K. Yamada, T. Hayakawa and K. Hushimi, "Indirect Water Cooling for Electric Power Cable Laid with in Trough in Tunnel", Furukawa Review. No.2, pp. 51-60, 1982.
 6. K. Kaninaga, K. Yamada, Y. Kazama, M. Fagasawa, N. Suzuki and M. Midorigawa, "INstallation of Water Cooling 275 Kv Oil-Filled Cables in Tunnel of Juhoku - Line of Tokyo Electric Power Co., Inc.", 日立評論 Vol.63, No.9, pp.1-6, 1981.
 7. H. ONo, K. Kanemaru, and I. Minagawa, "Cooling Performance and its Verification of Separate Pipe Cooling System Installed in Trough", 日立電線 No.3, pp.9-4, 1983.
 8. Hitachi Cable, Ltd., "Feasibility Study on 345 KV Cable Shingi Project for Messers Tainwan Power Company", Hitachi Cable, Ltd., Technical Data, TD 40-5479, pp.1-21, 1981.
 9. S. Fujiki, K. Shibata and K. kido, "A Theoretical Study of Cooling Technology", Furukawa Review No.2, pp.43-50, 1982.
 10. M. Hayashi, K. Uchida, W. Kumai, k. Sanjo, M. Mitani, N. Ichiyangi and T. Goto, "Development of Water Pipe Cooling System for Power Cables in Tunnels", IEEE Trans. of Power Delivery, Vol.4, No.2, pp.963-872, 1989.
 11. H. Nagakawa, H. Ohno, K. Kawasaki, S. Maeda and K. Sujiyama, "Consideration of the Cooling Effect by Water Pipe in Trough on Separately Installed Cables", 大日本電線時報 Vol.69, pp.37-51, 1983.
 12. D.J. Sikipper, "The Calculation of Continuous Ratings for Forced Cooled. Cables", ELECTRA, No.66, pp.59-84, 1979.
 13. TAIHAN Electric Wire Co. LTD., *Oil-Filled Power Cable Catalogue*, 1982.
 14. Churchill, S.W. and H.H.S. Chu, "Correlating Equatios for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder, Int. J. Heat Transfer, Vol.18, p.1049, 1975.
 15. Dittus, F.W. and L.M.K. Boelter, *University of California Publications on Engineering*, Vol.2, p.443, Berkeley, 1930.
日立評論, 日立電線, 大日本電線時報.
 16. 日本電線工業會, "日本電線工業會 規格電力ケーブルの許容電流", JCS 제 168호 D, pp. 6~60. 1980.
 17. 神永建二, 知福謙治, 二宮慶三, 中島峰夫, "トラフ内間接水冷OFケーブルの送電容量向上" 日本電氣學會 電線研究會資料, EC-74-3. 1974.