

지중송전케이블 접속부에서의  
열전달에 관한 연구  
A Study on Heat Transfer of an Underground  
Power Transmission Cable-Joint.

박 만 흥\*, 김 재 근\*\*, 이 재 현\*\*\*  
M. H. Park, J. K. Kim, J. H. Lee

**Key words :** : Underground power transmission systems(지중송전계통), Cable-joint(접속부), Conjugate natural covection(복합자연대류), Horizontal concentric annuli(수평동심환상공간), Oil filled cable(OF케이블)

**Abstract**

Recently, underground transmission system is growing continuously according to the electric power demand increase in the downtown area. Even if domestic cable makers are manufacturing 154kV oil filled cable and joint, the design technology of cable-joint has not been fully self-reliance. This study is aimed at the detail heat transfer analysis of 154kV cable-joint. So, that is cut into the five sections in order to analyze a conjugate natural convection in two dimensional  $r-\theta$  coordinate. The streamline and temperature distributions are obtained for each sections. Also the changes of those are analyzed with respect to the variation of transmission currents and cable-joint surface heat transfer coefficients. The same analyses are also shown in view point of the maximum temperature of conductor and local equivalent conductivity.

기 호 설 명

$C$  : Electric capacity( $\mu F/m$ )  
 $Cp$  : Specific heat( $J/kg^{\circ}C$ )  
 $D$  : Diameter of cylinder(m)  
 $E$  : Maximum Voltage between cables(kV)  
 $f$  : Frequency(Hz)  
 $g$  : Acceleration due to gravity( $m/s^2$ )  
 $h$  : Heat transfer coefficient( $W/m^2^{\circ}C$ )  
 $I$  : Current(A)  
 $k$  : Thermal conductivity( $W/m^{\circ}C$ )  
 $k_{eq}$  : Local equivalent thermal conductivity  
 $n$  : Number of core  
 $Nu_{cond}$  : Nusselt number for conduction between

concentric cylinders  
 $Nu_{conv}$  : Nusselt number for convection between  
 concentric cylinders  
 $P$  : Pressure( $N/m^2$ )  
 $q_1$  : Heat generation rate in the conductor( $W/m$ )  
 $q_2$  : Heat generation rate in the insulation  
 paper( $W/m$ )  
 $Q$  : Heat flux per volume( $W/m^3$ )  
 $r$  : Radial distance(mm)  
 $r_1$  : Radius of internal insulation oil(mm)  
 $r_2$  : Radius of conductor(mm)  
 $r_3$  : Radius of insulation paper(mm)  
 $r_4$  : Radius of external insulation oil(mm)  
 $r_5$  : Radius of flange insulation(mm)  
 $r_6$  : Radius of cable jacket(mm)

\*한국전력기술(주)전력기술개발연구소

\*\*한양대학교 대학원

\*\*\*한양대학교 기계공학과

|              |                                     |
|--------------|-------------------------------------|
| $r_0$        | : Gab width of annulus(mm)          |
| $R$          | : Electric resistance( $\Omega$ )   |
| $S\phi$      | : Source term                       |
| $T$          | : Temperature( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| $t$          | : Time(Sec)                         |
| $\tan\delta$ | : Dielectric tangent                |
| $U$          | : Circumferential velocity(m/s)     |
| $V$          | : Radial velocity(m/s), Voltage(kV) |
| $Z$          | : Axial coordinate                  |

### Greek symbols

|          |   |
|----------|---|
| $\Gamma$ | : Diffusion coefficient   |
| $\Phi$   | : General dependent variable, Stream function( $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ ) |
| $\mu$    | : Dynamatic viscosity( $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ )                         |
| $\rho$   | : Density( $\text{kg/m}^3$ )  |
| $\delta$ | : Phase angle(rad.)   |
| $\theta$ | : Angular coordinate measured from vertical top(rad.)                         |
| $\nu$    | : Kinematic viscosity( $\text{m}^2/\text{s}$ )                                |

### Subscripts

|          |                             |
|----------|-----------------------------|
| $s$      | : Surface                   |
| $eq$     | : Equivalent                |
| max.     | : Maximum value             |
| min.     | : Minimum value             |
| $\infty$ | : Atmosphere                |
| $i$      | : Inner Surface of cylinder |
| $o$      | : Outer surface of cylinder |

## 1. 서 론

최근 도시의 인구집중현상에 따른 전력수요의 밀도가 급격히 높아짐에 따라 도심의 대용량 송전의 필요성이 날로 증대되고 있다. 인구 밀집지역내의 가공 송전이 갖는 여러가지 어려움 때문에 전력케이블의 지속적인 기술개발에 힘입어 지중송전계통이 건설되어 운전되고 있다. 그리고 이러한 추세는 앞으로도 계속 확산될 전망이다. 지중송전은 여러가지 잇점을 갖고 있는 반면 한회선당 송전용량이 적을뿐만 아니라 건설비 등 초기 투자비용이 많고, 설치 및 유지보수가 어려우며, 사고 발생시 고장개소의 발견이나 수리의 어려움 때문에 고장지속시간의 장기화가 결점으로 지적되고 있다. 그러나, 지

중송선이 갖는 이러한 결점에도 불구하고 이를 극복하기 위한 기술의 발달로 말미암아 구미 및 일본 등지에서는 500 kV급, 765 kV급, 1,100 kV급 계통까지 지중화하여 운전하고 있다. 한편, 국내에서도 154 kV급까지는 부분적으로 운전되고 있다. 그리고 90년대 중반에는 원활한 대용량 지중송전을 위해 345 kV급까지 격상되어 운전될 전망이다. 국내에서는 현재 154 kV급 OF(Oil-Filled) 케이블 및 접속부에 대해서는 생산 및 시공을 하고 있으나, 접속부는 구조가 복잡하여 설계기술은 완전자립에 이르지 못하고 있는 실정이다. 또한 해외의 고압지중케이블 접속부에 관한 연구동향을 면밀히 분석해 보면, 대부분 도체부분의 온도만을 연구대상으로 취급했고, 접속부 영역에 대한 상세한 열전달 연구는 거의 없다. 또한 접속부 설계가 전기 및 기계분야의 공통적인 관심의 대상이 되어야 함에도 그동안 전기분야에서 그 실재를 주도해왔다. 따라서 열해석 측면에서는 다소 소홀히 취급되어온 것이 사실이다. 1980년 Abdel Aziz와 Riege<sup>(1)</sup>가 300 kV(공칭단면적 2,000 mm<sup>2</sup>) 고압지중케이블 및 접속부에서 도체내부통로에 절연유가 강제로 흐를때, 도체 선상의 온도분포를 유사저항방법(analogous resistance mesh method)을 사용하여 구하였다. 1981년 Hayashi등<sup>(2)</sup>은 275 kV OF케이블접속부에서 열등가회로를 적용하여 열전달을 검토한 결과 케이블 축방향의 열의 흐름은 도체부분에만 고려하여도 계산결과에는 오차가 크지 않다는 것을 보였다. 그리고 이 결과로 부터 정상상태시 송전용량 및 도체온도에 관한 해석해를 구하였으며, 케이블 종단부에서의 실측치와 결과를 비교하였다. 또한 과도상태의 송전용량에 관해서는 열등가회로를 이용하여 수치해를 구하였다. 1982년 미국 전력기술연구소(EPRI)<sup>(3)</sup>에서는 고압지중 파이프형 케이블의 종단부분의 열해석을 위한 수치해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 종단부분의 냉각을 위한 여러가지 방법을 연구한 결과, 히트파이프 냉각방식을 제외하고는 기대치 이상의 결과를 얻었다. 종단부분의 열해석으로 자연냉각방식에는 보다 단순한 네트워크모델(network model)방법을, 강제냉각방식에는 보다 복잡한 매트릭스모델(matrix model)방법을 사용하였다. 1990년 CIGRE에서는 한 보고서<sup>(4)</sup>를 통해 고압지중케이블의 자연 및 강제냉각에 있어 열해석방법을 소개하였다. 케이블에 대해서 가장 간단한 열등가회로 방법을 소개했고, 접속부

와 같은 복잡한 형상에 대해서는 보다 상세한 집중 매개변수법 (lumped parameter method) 및 유한요소법을 소개했다. 1988년에서 1990년 까지 한국전기연구소에서 수행한 345 kV 지중 OF케이블 접속부 개발을 위한 연구<sup>(5)</sup>에서는 현재 해외에서 실용화되고 있는 접속부의 구조, 특성 등을 파악하였고 유한요소법에 의한 접속부 전계 및 열해석 알고리즘을 확립하였다. 그리고 154 kV 및 345 kV 보통 접속부와 유지접속부에 대해서 열해석을 수행하였다. 그러나 절연유구역의 대류효과를 상세히 분석하지 않고 등가열전도계수로 가정하여 전도열전달 문제로 이상화하였다. 1986년 Bubnovich와 Kolesnikov<sup>(6)</sup>는 벽면이 내·외부에 존재하고 반경비가 2.0인 동심원환상 공간에서 경계조건은 등온이며, Prandtl수가 0.7(공기), Grashof수가  $10^4$ 인 경우 전도 및 대류 복합열전달현상을 연구하였다. 벽면두께, 유체 및 벽면의 열전도계수비 및 열확산계수비 등이 평균 Nusselt수에 미치는 영향을 분석하였으며, 벽의 열전도계수가 낮거나 벽면 두께가 큰 경우는 열전달계수가 이들 값에 따라 크게 변함을 보였다. 1991년 Kelkar등<sup>(7)</sup>은 열전도계수가 서로 다르고 형상이 불규칙하며 상호 접촉한 두 물체 사이의 열전달문제에서 비직교성 좌표를 이용하여 각각 분리하지 않고 일괄로 푸는 방법을 제안하였다. 이 방법을 사용하여, 벽면을 가지는 두개의 파이프가 편심으로 위치하고 양 경계는 등온, Prandtl수가 0.7, 양 경계의 온도차 및 두 원의 내경차이를 기준한 Rayleigh수가  $4.9 \times 10^4$  경우에 열전달해석 결과가 기존의 실험적 연구와 잘 일치하였다. 상기 연구동향을 분석해 보면 접속부 절연유부분의 대류효과를 포함하는 상세한 열전달해석을 수행치 못하였다. 따라서 본 연구에서는 고압지중 OF케이블 접속부 부분의 상세 열해석을 위해, 도체공칭단면적 1200 mm<sup>2</sup>인 154 kV OF케이블용 절연접속부를 선택하여 접속부 부분을 접속부의 길이 방향에 따라 반경방향으로 몇 개로 나누어 2차원화 ( $r-\theta$ 좌표)한 후, 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식을 세운 후 이들 방정식을 연립시켜 유한체적법을 사용하여 수치해석하여 유동 및 온도 분포를 구하였다. 그리고 접속부 주요설계 변수인 전류 및 표면대류경계조건 등에 따라 유동 및 온도 분포를 분석하였다. 또한 열전달 효과를 검토하기 위해 등가열전도계수를 정의하고 이것을 사용하여 여러가지 변수에 따른 각각의 영향을 상호 비교 검토하였다.

## 2. 지중송전케이블 접속부

### 2.1 접속부 종류

장거리전력케이블 선로는 제조, 수송 및 포설되는 장소의 조건에 따라 케이블의 길이 자체가 제약을 받으므로 공사 현장에서는 케이블을 여러번 상호 접속하지 않으면 안된다. 따라서 접속에 사용되는 접속부는 케이블 본체와 동일한 성능을 갖추어야 하는 동시에 시공이 용이하도록 하여야만 한다. 그리고 접속부로서 갖추어야 할 성능으로서는 여러가지가 있겠으나 열적인 측면에서는 다음과 같다.

- 사용 온도범위 내에서 장기간 사용해도 이상이 발생하지 않을 것

- 열전달 특성이 좋아야 하며 국부적인 고온 (Hot Spot)부위가 발생하지 않을 것

케이블 접속부는 접속장소, 케이블이 종류, 절연방법, 구조, 형상 및 그 목적에 따라 상당히 많은 종류가 있는데 케이블내에 절연유로 가득차 있는 OF케이블의 경우 중간접속부, 종단접속부, 이중케이블간 접속부 및 분기케이블 접속부로 나누어 진다. 이중 본 논문의 연구대상으로 잡은 것은 일반적으로 사용량이 많은 중간접속부의 일종인 절연접속부로 하였다.

### 2.2 접속부에서의 발열 메카니즘

케이블 및 접속부에 전류가 흐르면 도체부분에서는 도체재질에 따른 고유저항이 존재하므로 열이 발생하게 되며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$q_1 = I^2 \cdot R \quad (1)$$

여기서  $I$ 는 전류,  $R$ 는 도체저항이다.

또한 절연체를 전극에 끼우고 이것에 교류전압을 가할 경우 흐르는 전류는 전압의 방향에 대해서 보통 완전하게 90° 진행하지 않고  $\delta$ 만큼 처진다. 이로 인해 생기는 에너지손실을 유전체손실이라 하고 이것이 발열로 나타난다. 열발생량은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$q_2 = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot n \cdot \frac{E^2}{3} \cdot \tan \delta \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $C$ 는 정전용량,  $n$ 은 선심수,  $E$ 는 선간최고전압이며  $\tan \delta$ 는 유전정접 (Dielectric Tangent)이다.

### 3. 이론해석

#### 3.1 기하학적 모형화

열전달해석 대상인 접속부에 대해서 원통좌표계를 적용하여, 접속부의 도체 길이방향을  $z$ 좌표, 접속부 원형단면의 반경방향을  $r$ 좌표 그리고 원주 방향을  $\theta$ 좌표로 잡았다. 3차원적인 접속부에서 원형단면에서의 열전달 뿐만아니라 길이방향으로의 접속부 온도분포를 알아보기 위하여 본 연구에서는 길이방향으로의 유동이  $r-\theta$ 방향에서 나타나는 유동보다는 아주 작다는 가정하에 2차원적 유동으로 가정하여 길이방향을 따라 대표적인 5개의 단면을 선정하여 2차원 열전달해석을 수행하였다. Fig. 1 에는  $r-z$ 방향 단면으로 전체 접속부의 1/4만 나타내어 5개의 단면 위치(A, B, C, D 및 E)를 표시하였고 접속부의 단면 C의  $r-\theta$ 좌표 및 각 방향의 속도  $V$  및  $U$ 를 Fig. 2에 나타내었다. 접속부의 단면은 일반적으로 내부절연유, 도체, 절연체, 외부절연유, 후렌지절연체 및 외장층의 6개층으로 이루어져 있으며 그림에서 각각 ①, ②, ③, ④, ⑤ 및 ⑥으로 나타내었고 각층의 반경을  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  및  $r_6$ 로 지칭하였다.  $r_6$ 는 대류현상이 존재하는 외부절연유층의 폭을 나타낸다. 접속부의 중앙단면인 Fig. 1의 C단면을 제외한 단면은 접속부 외장을 접속시키기 위한 후렌지절연체층이 존재하지 않아 5개층으로 이루어져 있다. 도체층 ② 및 절연체층 ③에서는 각각 식(1)과 식(2)에서 지칭한 열량  $q_1$  및  $q_2$ 가 발생된다. Fig. 1에 나타낸 각 단면에서의 각 층의 첫수는 Table 1에 나타내었다.

접속부의 첫번째 층인 중심부는 절연유의 통로로

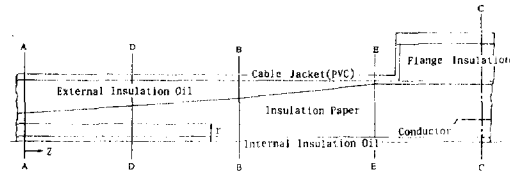
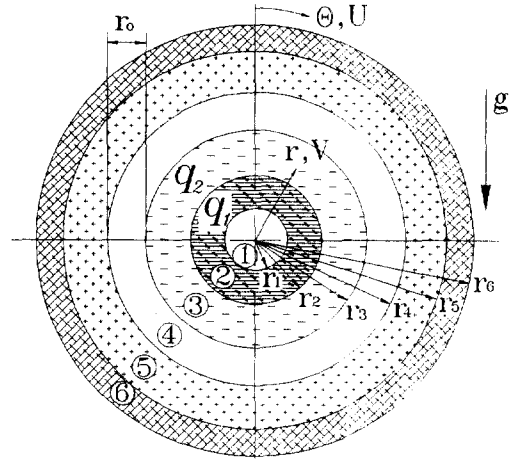


Fig. 1 OF cable-joint section view(154kV, r-z section)



- ① Internal Insulation Oil ② Conductor
- ③ Insulation Paper ④ External Insulation Oil
- ⑤ Flange Insulation ⑥ Cable Jacket

Fig. 2 154kV OF cable-joint section-C view

서 절연유로 채워져 있다. 두번째 층은 도체부분으로 전류가 흐름에 따라 자체저항에 의해 열이 발생하며 재질은 일반적으로 구리로 되어있다. 세번째 층인 절연층은 전기적 절연을 목적으로 한 특수한

Table 1 Dimension of 154 kV cable-joint section(Unit : mm)

|       | Section A | Section B | Section C | Section D | Section E |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $r_1$ | 7         | 7         | 7         | 7         | 7         |
| $r_2$ | 23        | 23        | 29        | 23        | 23        |
| $r_3$ | 36.3      | 54.5      | 73        | 45        | 73        |
| $r_4$ | 77.1      | 77.1      | 77.1      | 77.1      | 77.1      |
| $r_5$ | -         | -         | 125       | -         | -         |
| $r_6$ | 84        | 84        | 139       | 84        | 84        |

절연지로 이루어져 있다. 절연유에 젖어 있는 절연지에 전압이 발생하면 전기적인 유전체손실(Dielectric Loss)에 의해 열이 발생한다. 네번째 층은 전기적인 절연기능 뿐만 아니라 열전달 효과를 얻기위한 절연유층으로 형성되어 있다. 다섯번째 층은 접속부의 중앙단면인 C단면에만 존재하는 절연유층과 외장 PVC(Poly-Vinyl-Chloride)층 사이의 후렌지절연체층으로 재질은 에폭시이다. 마지막 여섯번째 층은 접속부의 외장으로 절연유의 밀봉 역할 뿐만 아니라 도체 및 절연층의 보호막 구실을 하며 재질은 일반적으로 PVC로 제작되어 있다.

3.2 지배방정식

접속부에서의 전도 및 대류 열전달 현상을 해석하기 위하여 실제적으로 물리적인 현상을 기술하는 완전한 방정식을 다음과 같은 가정을 도입하여 단순화 시킨다.

- 밀폐공간 내의 유동은 정상상태 2차원 층류유동이다.
- 압축성 효과, 점성소산 및 복사열전달은 무시한다.
- 도체 및 절연체에서 발생하는 열은 단위 체적당 일정한 값을 갖는다.

주어진 가정에 따라 채택된 모델에서 물성치가 다른 재질로 구성되어 있는 접속부의 각 층에 대한 지배방정식을 원통좌표계로 나타내면 아래와 같다.

연속방정식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho u) = 0 \quad (3)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho u^2) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta}) \\ &+ \left( \frac{2\mu}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{\mu u}{r^2} - \frac{\rho u v}{r} \right) + \rho \cdot g \cdot \sin \theta \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho u v) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}) \\ &+ \left( \frac{\rho u^2}{r} - \frac{2\mu}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{\mu v}{r^2} \right) - \rho \cdot g \cdot \cos \theta \quad (5) \end{aligned}$$

에너지 방정식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho c_p u T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho c_p r v T)$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q \quad (6)$$

연속방정식 및 운동량방정식은 도체내부의 내부 절연유 및 절연체외부의 외부절연유부분에 적용된다. 그리고 에너지방정식은 접속부 단면 각층에 적용되며, 도체부분과 절연체부분에서는 전류 및 전압이 흐르면서 발생하는 열손실에 따른 열이 발생하며 Q로 나타내었다.

위의 지배방정식 (3)~(6)은 아래와 같이 일반형 방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \phi) = \\ & \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right) + S\phi \quad (7) \end{aligned}$$

여기서  $\phi$ 는 일반적인 변수이고  $\Gamma$  및  $S\phi$ 는 각각의 일반변수에 해당하는 확산계수 및 생성항(Source Term)을 뜻한다.

3.3 경계조건

접속부의  $r-\theta$ 방향인 원형단면상의 열유동현상은 이 원형 단면상에 세운 연직선에 대하여 좌우가 대칭이므로 계산은 연직선에 대한 반원에 대해서만 수행한다. Fig. 2의 좌표계에 대한 지배방정식들을 만족하는 경계조건을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{For } 0 \leq r \leq r_6 \\ & \theta = 0, \pi \quad ; u = \partial v / \partial \theta = \partial T / \partial \theta = 0 \\ & \text{For } 0 \leq \theta \leq \pi \\ & r_1 \leq r \leq r_2 \quad ; u = v = 0 \\ & r_2 < r \leq r_3 \quad ; u = v = 0 \\ & r_4 \leq r < r_5 \quad ; u = v = 0 \\ & r_5 \leq r < r_6 \quad ; u = v = 0 \\ & r = r_6 \quad ; u = v = 0, \quad -k \partial T / \partial r = h(T_s - T_\infty) \quad (8) \end{aligned}$$

3.4 물성치 선정

접속부에서 절연유의 자연대류유동을 포함한 열해석에 있어 접속부 각층 구성요소의 물성치가 중요한 영향을 미친다. 고체부분인 도체, 절연체, 후렌지절연체 및 외장층의 열전도계수와 열용량을 Table 2에 나타내었다. 접속부에서 자연대류열전달이 발생하는 유체부분인 절연유층의 절연유는 전기적인 절연 역할 뿐만 아니라 열전달 측면에서 중요한 역할을 한다. 일반적인 절연유는 광물유 및

Table 2 Properties of cable materials (5)

| Parts             | Thermal conductivity<br>(W/m · °C) | Thermal capacity<br>(kJ/m <sup>3</sup> · °C) |
|-------------------|------------------------------------|--|
| Conductor         | 386                                | 3430   |
| Insulation Paper  | 0.1818                             | 1913   |
| Flange Insulation | 0.790                              | 2125   |
| Cable Jacket      | 0.1660                             | 2500   |

합성유로 대별되나 OF케이블 및 접속부에서 사용하는 절연유는 열안정성 및 수소가스 흡습성이 양호한 합성 탄화수소계인 알킬벤젠계 합성유를 많이 사용하고 있다. 절연유의 물성치는 온도변화에 따라 변하는 것으로 하였고 각 물성치를 구하는 식은 다음과 같다. <sup>(8)</sup>

$$\rho = -0.62T + 880 \quad (9)$$

$$C_p = 2.5T + 1750 \quad (10)$$

$$k = -7.0 \times 10^{-5} \cdot T + 0.113 \quad (11)$$

$$\nu = (\exp(\exp(-5.877 \times 10^{-3} \cdot T + 2.2585))) \times 10^{-8} \quad (12)$$

### 3.5 수치해석

식 (7)은 비선형 타원형 편미분방정식의 형태이며 이를 Patankar<sup>(9)</sup>의 제어체적 방법에 의해 이산화시켰다. 유도된 이산화방정식은 반복계산법에 의해 해를 구하였다. 본 연구에서는 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)을 이용한 선순법(Line-by-Line Method)에 의해 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 적용하여 이산화방정식에서 속도, 압력 및 온도장들을 구하였다. 격자수는  $r-\theta$  방향으로  $52 \times 52$ 로 하였다.  $\theta$ 좌표는 균일하게 배치하였으나  $r$ 좌표는 고체부분보다 유체부분에 보다 조밀하게 배치하였다. 수렴성을 개선하고 해가 발산하는 것을 방지하기 위해 하향이완계수를 사용하였다. 속도 및 압력에 대해서는 0.05, 온도에 대해서는 0.9999로 하였으며, 1000~1500회 반복계산후 수렴되었다. 이완계수를 온도에 대해서 1.0, 다른 변수에 대해서 0.1 이상으로 하면 해가 발산하였다. 온도에 대해서 0.9 이하로 하면 반복계산중 그 값이 변하지 않아 수렴된 것과 같이 보였으나 전체 열평

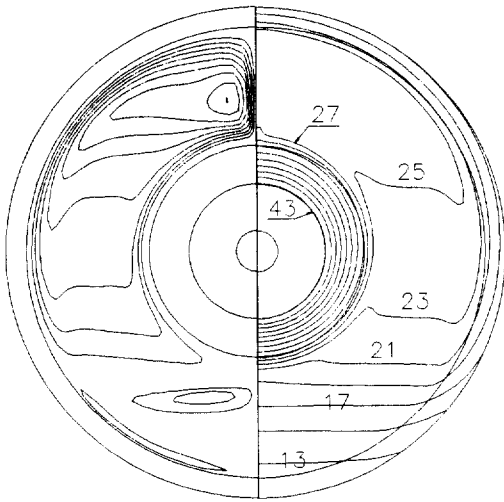
형이 맞지 않았다. 해의 수렴은 일회 반복계산마다 열평형을 조사하여 그 오차가  $\pm 0.1\%$  이하이고 각 변수들의 값들이 10회 이상 반복계산하는 동안 유효 4자리 안에서 변하지 않을 때를 수렴으로 보았다.

## 4. 결과 및 고찰

접속부 단면중 외부절연유 구간에 대한 유동 및 온도분포 특성을 살펴보고, 이에 대한 전류, 대류 경계조건 및 단면에 따른 영향을 조사한다. 그리고 외부절연유 구간의 내부면 및 외부면에서의 대류열 전달의 분포를 검토하고 마지막으로 단면에서 가장 높은 온도인 도체최고온도를 조사한다. 분석시 항상 전압은 154 kV, 외기 온도는 10°C로 하였다.

### 4.1 유동 및 온도 분포 특성

접속부에 전류가 1600 A 흐르고 외부표면의 열전달계수  $h$ 가  $11 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 인 경우 대표적으로 단면 A의 유선 및 등온선 분포는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보여주는 유동함수(단위 :  $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ )의 크기는 최대값  $4.0 \times 10^{-3}$ , 최소값  $0.5 \times 10^{-3}$ 을 유선간격  $0.5 \times 10^{-3}$ 으로 나타낸 것으로 기호는  $-\left[4.0(0.5)0.5\right] \times 10^{-3}$ 의 형태로 나타내었다. 유선분포에서는 외부절연유층의 대류열전달현상으로 인하여 외부절연유층 상부에서 유동함수의 최고값이 보인다. 외부절연유층의 하부에서는 상대적으로 미약한 유동이 존재한다. 등온선분포값은 최고온도 43°C, 최저온도 13°C를 온도간격 2°C로 나타낸 것으로 기호는 "43(2)13"형태로 나타내었다. 등온선분포를 살펴보면 내부절연유 및 도체부분에서 가장 높은 온도를 나타내고 있다. 절연체 부분에서는 낮은 열전도계

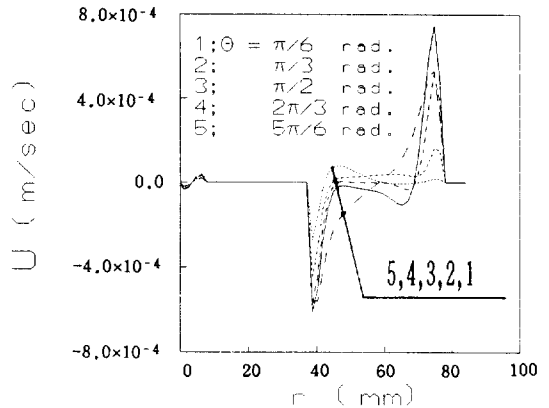


**Fig. 3** Streamlines(left) and isotherms(right) for  $V = 154\text{kV}$ ,  $I = 1600\text{A}$  and  $h = 11 \text{ W/m}^2\text{°C}$  of sec. A  
 $T_{\text{max}} : 43.8\text{°C}$ ,  $T_{\text{min}} : 11.6\text{°C}$ , Temperature : 43 (2) 13 [°C],  $\phi_{\text{max}} : -4.37 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ , Streamlines:  $-[4.0(0.5)0.5] \times 10^{-3}, + (0.03, 0.01) \times 10^{-3} [\text{kg/m}\cdot\text{s}]$

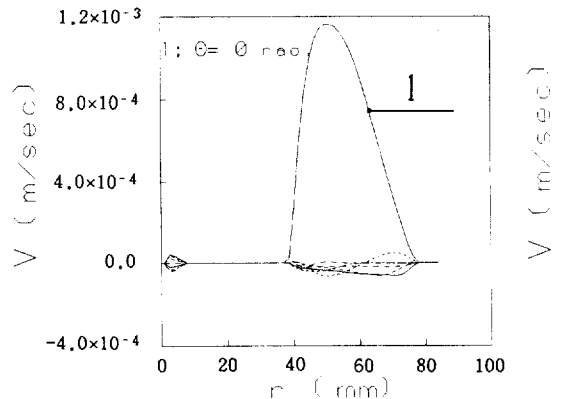
수로 인하여 큰 온도구배가 나타나는 전형적인 전도열전달 형태를 보이며 외부절연유층에서는 대류 열전달현상으로 인하여 접속부 외부절연유층 상부의 벽면 가까이에서 온도반전현상을 보인다. 외부절연유층의 하부에서는 유동이 미약하여 온도분포가 거의 수평인 열성층(Thermal Stratification) 형태가 나타난다.

원주방향속도  $U$ 를 반지름 방향에 따라 도시해 보면 Fig. 4와 같다.  $\theta = \pi/3 \text{ rad.}$ 에서 속도구배 및 크기가 가장 크다, 이는 밀폐공간의 내·외부면을 따른 유동이  $\theta = \pi/3 \text{ rad.}$  부근에서 가장 크게 일어남을 나타낸다.  $\theta = \pi/6 \text{ rad.}$ 에서 속도구배가 다소 떨어지는데 이는 벽면  $\theta = \pi/6 \text{ rad.}$  부근에서 유동이 위쪽으로 상승함으로써 경계층으로부터 분리됨을 나타낸다. 그리고 내·외면 가까이에서 곡선의 변곡점이 매우 날카로운 것은 내·외 벽면 가까이에 뚜렷한 유동경계층이 형성됨을 의미한다. 유동은 외부면  $\theta = 5\pi/6 \text{ rad.}$  부근에서 소멸된다. 공간 중앙부근에서 모든 곡선의 원주방향속도가 거의 영으로 나타난 것은 내·외 표면의 경계층에서 유체가 원주의 상·하 방향으로 빠르게 이동하기 때문이다.

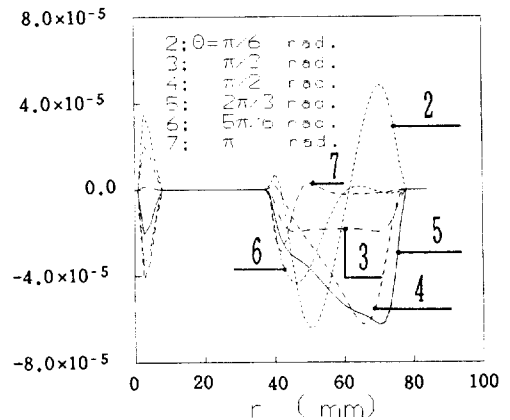
Fig. 3에서의 반경방향속도  $V$ 를 도시하면 Fig. 5 (a) 및 (b)와 같다. 속도는  $\theta = 0 \text{ rad.}$ 에서 양의 값



**Fig. 4** Circumferential velocity distribution for  $V = 154\text{kV}$ ,  $I = 1600\text{A}$  and  $h = 11 \text{ W/m}^2\text{°C}$  of sec. A



(a) Overall radial velocity



(b) Detail radial velocity (②~⑦)

**Fig. 5** Radial velocity distribution of  $V = 154\text{kV}$ ,  $I = 1600\text{A}$  and  $h = 11 \text{ W/m}^2\text{°C}$  of sec. A

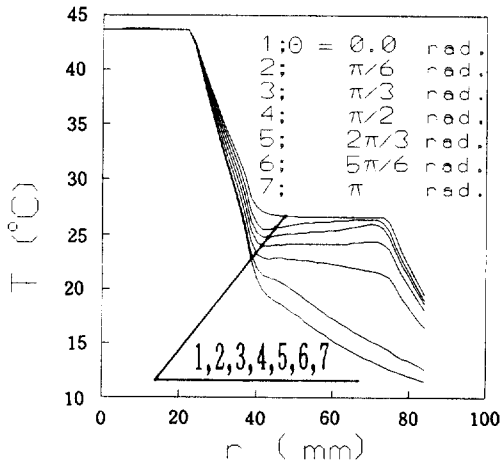
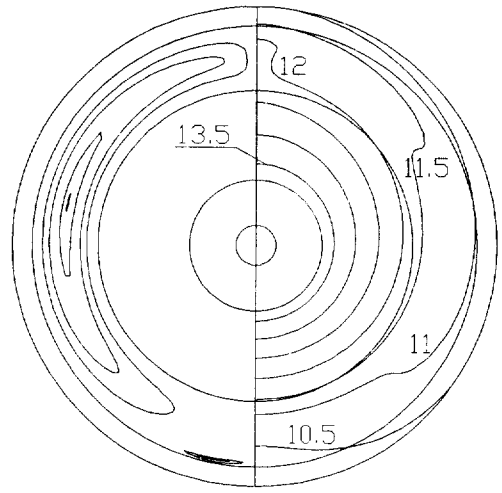


Fig. 6 Temperature distribution for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=1600\text{A}$  and  $h=11\text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. A

으로,  $\theta=2\pi/3\text{ rad.}$ 에서 음의 값으로 가장 크다. 이는 가열된 유체가  $\theta=0\text{ rad.}$  부근에서 상승하고  $\theta=2\pi/3\text{ rad.}$  부근에서 냉각된 유체가 외부면에서 내부면으로 역류하는 것을 의미한다.  $\theta=5\pi/6\text{ rad.}$  하부에서 또 하나의 와류가 생기며 이는 내부면 부근에서는 다소 강하나, 외부면 쪽으로 가면서 사라진다.

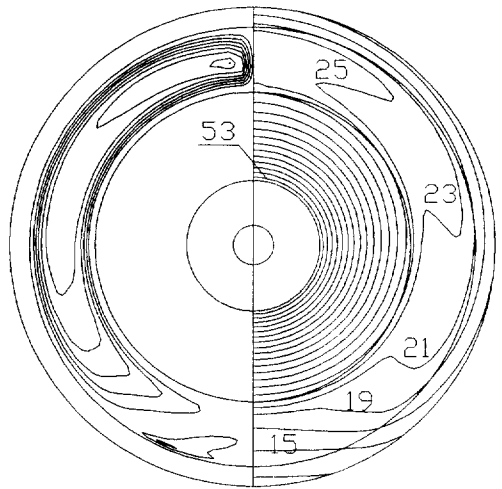
Fig. 3에서의 온도분포를 반경방향에 따라 도시하면 Fig. 6과 같다. 도체 내에서의 온도분포는 열전도계수가 크므로 거의 같다. 절연체 구간에서는 전 원주각에 걸쳐 거의 직선적으로 온도가 강하했으며, 하부로 내려옴에 따라 온도강하의 구배가 증가하였다. 그리고 외부절연유층 하부에서 유동이 미약하고 열성층현상이 나타난다. 접촉부 단면의 전체 온도분포를 살펴보면 도체 및 절연체 부분에서는 전도열전달형태이고 외부절연유 부분에서는 대류열전달현상으로 가열된 절연유의 상승으로 외부절연유 상부의 온도는 하부의 온도보다 높다. 이는 외부절연유 구간 하부에서는 내부면으로부터 열전달이 크다는 것을 의미한다. 외부절연유 구간 중심부에서는  $\theta=\pi/6\sim\pi/2\text{ rad.}$  사이에서 약간의 온도반전이 있고  $\theta=5\pi/6\text{ rad.}$  이하에서는 온도가 거의 직선적으로 강하한다. 이는 공간하부에서는 유체가 정체되어있고 내·외벽면 가까이에서 유동 경계층이 잘 발달되어 있는 것을 나타낸다.

4.2 유동 및 온도 분포 특성에 대한 전류의 영향  
단면 B에서 대류경계조건인  $h$ 가  $11\text{ W/m}^2\text{C}$ 일



(a)

Fig. 7 Streamlines(left) and isotherms(right) for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=400\text{A}$  and  $h=11\text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. B  
 $T_{\text{max}}: 13.8\text{C}$ ,  $T_{\text{min}}: 10.2\text{C}$ , Temperature : 13.5 (0.5)10.5 [C],  $\phi_{\text{max}}: -0.96 \times 10^{-3}\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  
Streamlines :  $-(0.9, 0.6, 0.3) \times 10^{-3}$   
 $+ (0.002, 0.001) \times 10^{-3}\text{ [kg/m}\cdot\text{s]}$



(b)

Fig. 7 Streamlines(left) and isotherms(right) for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=1600\text{A}$  and  $h=11\text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. B  
 $T_{\text{max}}: 54.6\text{C}$ ,  $T_{\text{min}}: 12.5\text{C}$ , Temperature : 53(2) 13[C],  $\phi_{\text{max}}: -2.2 \times 10^{-3}\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  
Streamlines :  $-[2.1(0.3)0.3] \times 10^{-3}$   
 $+ (0.002, 0.001) \times 10^{-3}\text{ [kg/m}\cdot\text{s]}$

때 유선 및 등온선 분포를 전류가 400 A 및 1600 A인 경우에 대해서 Fig. 7(a) 및 (b)에 각각 나타내었다. 1600 A 경우 최대유동의 세기가 400 A에



비해 약 2배이며, 최대유동 위치는 400 A인 경우 외부절연유층의 중간에서 약간 상부에 위치하나 1600 A인 경우  $\theta=0$  rad. 근처인 외부절연유층의 최상부에 위치한다. 그리고 1600 A 경우 도체의 최고온도는 약 4배이며, 외부절연유층의 중·상부 공간에서의 온도반전이 큼을 알 수 있다. 이는 전류의 증가에 의한 도체내에서의 발열량은 전류의 제곱에 비례하여 증가하지만 도체의 최고온도는 전류에 비례하여 증가하는 것으로 외부절연유층의 자연대류 현상에 의해 열전달이 잘 일어나기 때문이다. 또한 유동의 세기는 열발생량이 증가하여도 크게 증가하지 않는데 이는 절연유의 점성계수가 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다.

**4.3 유동 및 온도 분포 특성에 대한 대류경계조건의 영향**

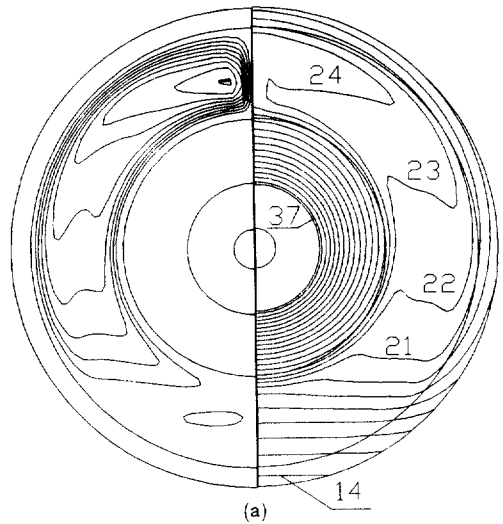
단면 D에서 전류가 1200 A일 때, 유선 및 등온선 분포를 대류경계조건인  $h$ 가  $5 \text{ W/m}^2\text{C}$  및  $20 \text{ W/m}^2\text{C}$ 인 경우에 대해서 Fig. 8(a) 및 (b)에 각각 나타내었다. 유동의 세기 및 모양은 양쪽이 거의 유사하나, 열전달이 잘 일어나는  $h$ 가  $20 \text{ W/m}^2\text{C}$ 인 경우 접속부 내부의 열발생량에 따른 상승온도를 감소시키므로 유동의 세기는 약간 감소하며 도체의 최고 온도도 약  $7\text{C}$  (20%) 감소하였다. 이는 대류경계조건의 변화에 따라 외부로의 방출되는 열량이 다르게 되어 절연유 유동의 모양은 유사하나 도체의 최고온도는 영향을 받음을 알 수 있다.

**4.4 단면에 따른 유동 및 온도 분포 특성**

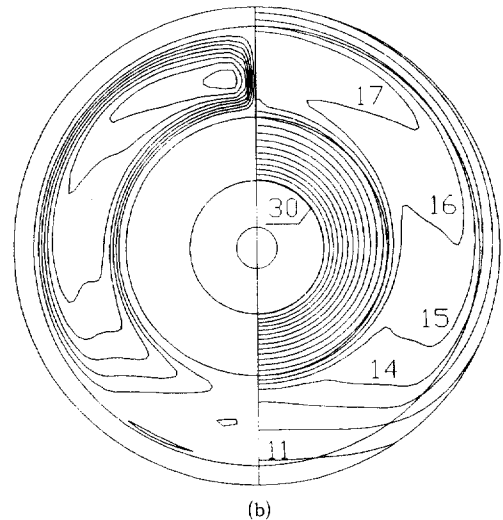
전류가 1200 A이고 대류경계조건  $h$ 가  $15 \text{ W/m}^2\text{C}$ 일 때 유선 및 등온선 분포를 단면 A 및 단면 B에 대해 Fig. 9(a) 및 (b)에 각각 나타내었다. 외부절연유 공간의 내·외경비(외경/내경)는 단면 A가 2.13, 단면 B는 1.41이다. 단면 A의 경우 최대유동의 세기는 단면 B에 비해 약 2배이고 위치는 최상부 부근이다. 그리고 도체 최고온도는 약  $5\text{C}$  (15%) 감소되었다. 이는 외부절연유의 공간이 크면 상대적으로 대류열전달 현상이 활발하게 일어나므로 외부절연유공간의 내·외경비가 절연유 유동에 영향을 크게 미치며 따라서 도체 최고온도에도 영향을 줄을 의미한다.

**4.5 대류 열전달량 분포**

외부절연유공간의 원주위치별 대류에 의한 열전



**Fig. 8** Streamlines(left) and isotherms(right) for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=1200\text{A}$  and  $h=5 \text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. D  
 $T_{\text{max}}: 37.1\text{C}$ ,  $T_{\text{min}}: 13.6\text{C}$ , Temperature: 37(1) 14[ $\text{C}$ ],  $\Phi_{\text{max}}: -2.71 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  
 Streamlines:  $-[2.7(0.3)0.3] \times 10^{-3} + 0.01 \times 10^{-3} [\text{kg/m}\cdot\text{s}]$



**Fig. 8** Streamlines(left) and isotherms(right) for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=1200\text{A}$  and  $h=20 \text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. D  
 $T_{\text{max}}: 30.4\text{C}$ ,  $T_{\text{min}}: 10.5\text{C}$ , Temperature: 30(1) 11[ $\text{C}$ ],  $\Phi_{\text{max}}: -2.58 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  
 Streamlines:  $-[2.4(0.3)0.3] \times 10^{-3} + 0.01 \times 10^{-3} [\text{kg/m}\cdot\text{s}]$

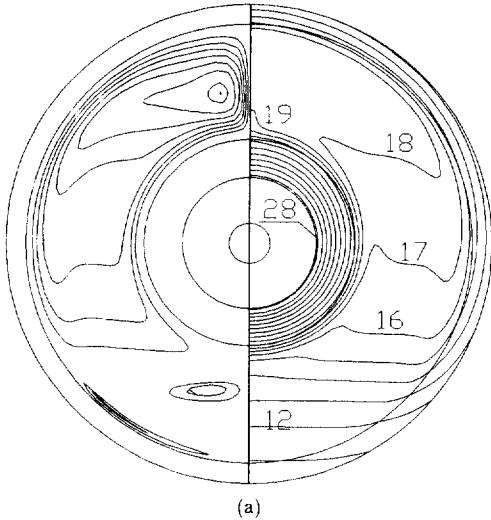
달 효과를 알아보기 위해 등가열전도계수  $k_{eq}$ 를 정의하였다. 등가열전도계수는 환상공간에서 열전달이 순수한 열전도에만 의존된다는 가정에서 얻어지

는 Nusselt수 ( $Nu_{cond} = 2 / \ln(D_o/D_i)$ )에 대한 대류가 고려되는 Nusselt수 ( $Nu_{conv} = hD/k$ )의 비로 아래와 같이 정의하였다.

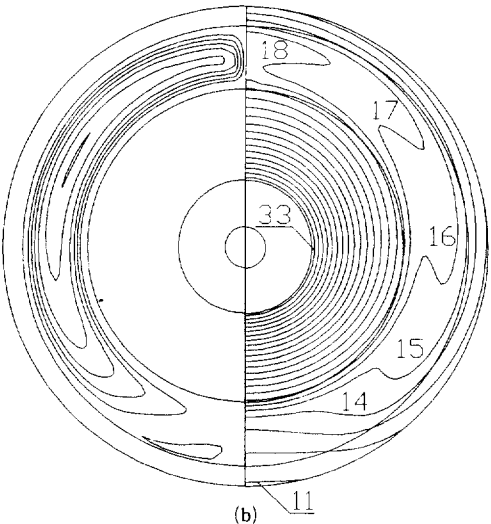
$$k_{eq} = Nu_{conv} / Nu_{cond} \tag{13}$$

따라서 아래와 같이 성립된다.

$$k_{eq} = hD \ln(D_o/D_i) / 2k = - \left( \frac{dT}{dr} \right) \frac{D \ln(D_o/D_i)}{2(T_i - T_o)} \tag{14}$$



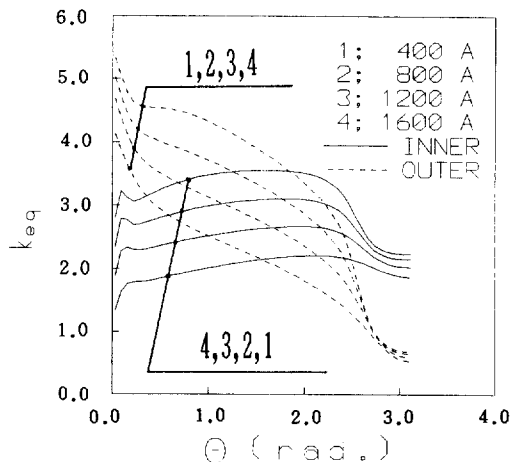
**Fig. 9** Streamlines(left) and isotherms(right) for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=1200\text{A}$  and  $h=15\text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. A  
 $T_{\max} : 28.5^\circ\text{C}$ ,  $T_{\min} : 10.6^\circ\text{C}$ , Temperature : 28(1) 11 [°C],  $\phi_{\max} : -3.65 \times 10^{-3}\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  
 Streamlines :  $-[3.5(0.5)0.5] \times 10^{-3}$ ,  
 $+ (0.02, 0.01) \times 10^{-3}\text{ [kg/m}\cdot\text{s]}$



**Fig. 9** Streamlines(left) and isotherms(right) for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=1200\text{A}$  and  $h=15\text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. B  
 $T_{\max} : 33.7^\circ\text{C}$ ,  $T_{\min} : 10.9^\circ\text{C}$ , Temperature : 33(1) 11 [°C],  $\phi_{\max} : -1.62 \times 10^{-3}\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  
 Streamlines :  $-[1.5(0.3)0.3] \times 10^{-3}$ ,  
 $+ 0.01 \times 10^{-3}\text{ [kg/m}\cdot\text{s]}$

단면 B의 외부절연유 구간에서 대류경계조건  $h$ 가  $11\text{ W/m}^2\text{C}$ 일 때 전류의 변화에 따른 국소등가 열전도계수를 Fig. 10에 나타내었다. 내부표면에서의 열전달 변화정도는 하부를 제외하고는 거의 일정하다. 가장 큰 열전달은  $1600\text{ A}$  경우  $\theta=1.6\text{ rad}$ . 부근에서 생기며 전류가 감소함에 따라 점차 아래로 내려가  $400\text{ A}$ 일 때  $\theta=2.2\text{ rad}$ . 부근에서 일어난다. 이는 전류가 낮을수록 환상공간 하부지역에서 상부로 갈수록 열경계층의 두께가 커지기 때문이다. 그러나 외부표면의 열전달은  $\theta=0\text{ rad}$ . 부근에서 최고이며 하부로 가면서 급격히 감소한다. 이는 내부면 상부에서 외부면으로 향하는 열 Plume이 외부면 상부 부근에 충돌하면서 열전달이 최대가 되고 하부로 가면서 열전달이 급격히 감소함을 의미한다.

단면 D에서 전류가  $1200\text{ A}$ 일 때 열전달계수  $h$ 의 변화에 따른 국소등가 열전도계수를 Fig. 11에 나타내었다. 내부표면에서 열전달정도의 변화는 하부를 제외하고는 거의 일정하다. 국소등가 열전도계수가  $\theta=2.2\text{ rad}$ . 상부에서는  $h$ 가  $20\text{ W/m}^2\text{C}$ 일 경



**Fig. 10** Influence of electric currents on local equivalent conductivity of external insulation oil for  $V=154\text{kV}$  and  $h=11\text{ W/m}^2\text{C}$  of sec. B

우가 가장 높으나,  $\theta=2.2$  rad. 하부에서는 그 경향이 역전된다. 이는  $h$ 가  $20 \text{ W/m}^2\text{C}$ 인 경우 상부에서는 유동이 활발하나 하부에서는 절연유의 정체가  $h$ 가  $5 \text{ W/m}^2\text{C}$  경우보다 오히려 큰 것을 의미한다. 그러나 외부 표면에서는  $\theta=0$  rad. 부근에서 가장 열전달이 활발하여 원주각도에 따른 열전달 변화도 대류경계조건  $h$ 값에 거의 영향을 받지 않음을 나타내며  $\theta=2.5$  rad. 부근에서 국소등가열전도계수가 내부 표면에서와 같이 경향이 역전된다.

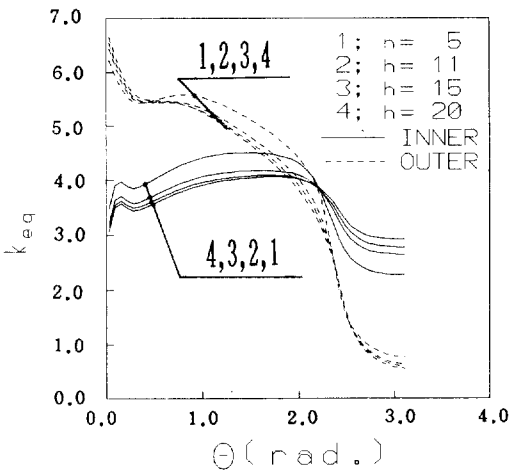


Fig. 11 Influence of convective boundary conditions on local equivalent conductivity of external insulation oil for  $V=154\text{kV}$  and  $I=1200\text{A}$  of sec. D

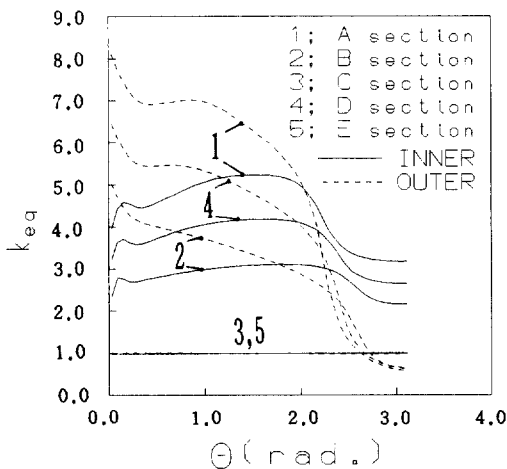


Fig. 12 Influence of cable-joint section on local equivalent conductivity of external insulation oil for  $V=154\text{kV}$ ,  $I=1200\text{A}$  and  $h=11 \text{ W/m}^2\text{C}$

전류가  $1200 \text{ A}$ , 대류경계조건  $h$ 가  $11 \text{ W/m}^2\text{C}$ 일 때 단면별 국소등가열전도계수를 Fig. 12에 나타내었다. 단면의 내·외경비가 큰 순서인 A, D 및 B 순서로 대류열전달이 활발했으며, 단면 C 및 E에서는 절연유구역의 폭이 아주 작아서 자연대류 열전달현상보다는 전도 열전달현상이 주로 일어난다.

4.6 도체최고온도

케이블 및 접속부에서의 열발생량에 따른 도체최고온도( $T_{\text{max}}$ )는 설계상에 중요한 의미를 갖는다. 왜냐하면 케이블 및 접속부내에서 설계상 정하여진 온도이상이면 전기적인 절연을 위한 절연지 및 절연유의 열화손상이 가속화되어 완전한 전기적인 절연이 안될 뿐만 아니라 케이블 및 접속부의 수명이 급격히 감소하기 때문이다. 일반적으로 정해진 OF케이블의 도체최고온도는  $85^\circ\text{C}$ 로 실제로 현장에 설치해 운전될 때 도체최고온도 이하로 운전하는 것이 가장 중요한 사항 중의 하나이다.

대류경계조건  $h$ 가  $11 \text{ W/m}^2\text{C}$ 일 때 전류의 변화에 따른 단면별 도체의 최고온도를 Fig. 13에 나타내었다. 단면별 도체최고온도의 변화 경향은 거의 같다. 접속부의 중심부인 단면 C 경우가 가장 높았으며, 이는 외부절연유 구역이 좁아 대류가 활발하게 일어나지 못해 열전달이 전도에 의존하며, 후랜지 절연체의 두께가 커 열저항이 큰데 원인이 있다. 나머지 단면에 대해서는,  $500 \text{ A}$  이상에서는

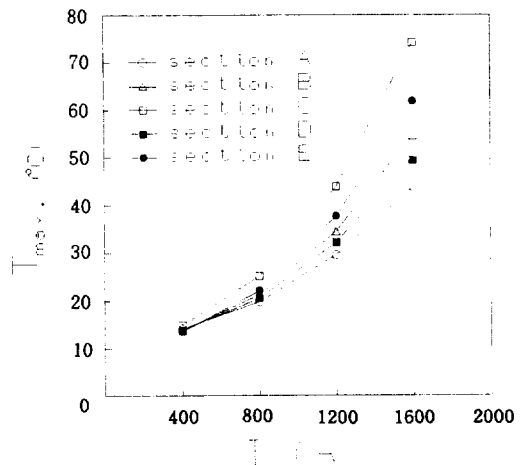


Fig. 13 Maximum temperature of conductor on the variation of current for  $V=154\text{kV}$  and  $h=11 \text{ W/m}^2\text{C}$

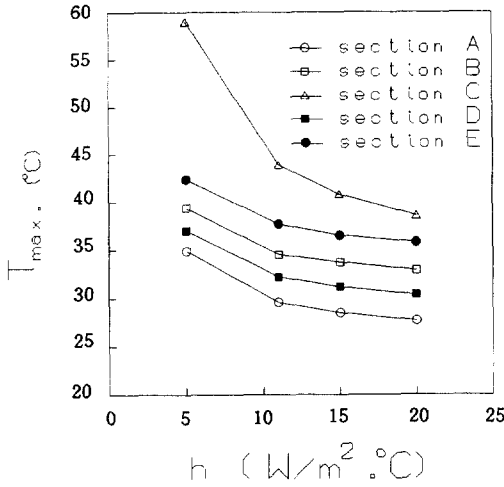


Fig. 14 Maximum temperature of conductor on the variation of heat transfer coefficient for  $V=154\text{kV}$  and  $I=1200\text{A}$

내·외경비가 작은 순서대로 도체의 최고온도가 높게 나타났으며 이는 외부절연유구역의 공간폭이 작아짐에 따라 대류열전달이 활발하지 않기 때문이다. 그리고  $500\text{A}$  이하에서는 오히려 단면 A의 도체최고온도가 C단면을 제외하고는 높게 나타난다. 이는 전류가 낮아 도체에서 발생하는 열량이 적으면 외부절연유공간에서의 대류효과가 급격히 감소하며 오히려 외부 절연유층이 열전달을 저해하는 역할을 하기 때문이다.

전류가  $1200\text{A}$ 일 때 대류경계조건의 변화에 따른 단면별 최고온도를 Fig. 14에 나타내었다. 단면별 최고온도의 변화 경향은 모두 유사하게 나타났다.  $h$ 가  $10\text{W/m}^2\text{°C}$  이상에서는 열전달계수가 변하여도 도체최고온도 변화율이 완만하지만  $h$ 가  $10\text{W/m}^2\text{°C}$  미만인 경우에는 도체최고온도 변화율이 크다. 따라서 케이블 및 접속부를 설치할 경우 원활한 전력공급을 위해서 접속부 주위공기의 열전달 환경이 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다. 또한 접속부의 중심부인 단면 C인 경우는 열전달계수가 더욱 중요한 변수로 나타났다.

## 5. 결 론

이상과 같이  $154\text{kV}$  지중송전케이블 접속부의 상세열전달 해석을 수행하였다. 접속부의 주요설계 변수인 전류, 표면대류경계조건 및 외부절연유공간

폭에 따라 절연유 유동 및 온도분포, 국소등가열전도계수 그리고 도체최고온도 등을 분석하였다. 연구결과로는 우선 접속부 상세 열해석 방법론을 Set-up할 수 있었다. 그리고 접속부 부위별 유동 및 온도분포곡선등 설계 데이터를 얻었으며, 접속부의 최고 운전한계전류등 운전조건을 얻었다. 또한 지중케이블이 설치되는 전력구의 환기장치 설계 데이터도 추출할 수 있었다.

지중송전케이블 접속부의 열전달 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 도체 및 절연체부분의 온도분포이며 이를 간접적으로 나타내는 것이 도체최고온도이다. 도체의 최고온도는 절연유공간의 폭에 가장 관계가 크며 접속부 표면의 열전달계수, 절연유의 점성계수, 접속부 중심부(단면 C)과 같이 단면의 대부분이 유침절연체 및 후렌지절연체로 되어 있는 부분에서는 절연체의 열전도계수 값에 관계됨을 알 수 있다. 따라서 향후 접속부설계에 있어서는 전제해석에 영향이 없는 한, 절연유 공간의 폭을 넓혀야 할 것이다. 또한 접속부가 설치되어 있는 전력구내에서 열제거 측면에서의 환기장치 설계에도 관심을 가져야 할 것이며 장기적으로는 접속부 재료의 물성치(열전도계수, 점성계수등)에 대한 심도있는 연구가 필요하다 하겠다.

## 참고문헌

- (1) Abdel Aziz & Riege, H., 1980, "A new method for cable joints thermal analysis," IEEE Trans. PAS-99, No. 6.
- (2) Hayashi, M., et al., 1981, "Current carrying capacity of power cable accessories," Fujikura Densen Gibo, No. 63.
- (3) EPRI, 1982, "High-Ampacity terminations," EPRI, EL-2233.
- (4) CIGRE, 1990, "The steady state thermal behaviour of accessories for cooled cable systems," CIGRE WG 21-08, Electra No. 128.
- (5) 한국전기연구소, 1989~1990, "초고압 지중OF 케이블 접속재 국산화 및 접속공법에 관한 연구 (I)(II)"
- (6) Bubnovich, V.I. & Kolesnikov, P. M., 1986, "Conjugate transient heat transfer in laminar natural convection in a horizontal cylindrical annulus," J. of Engineering Physics, Vol. 51, No.

- 4, pp. 1175~1181.
- (7) Kelkar, K. M. et al, 1991, "Numerical method for the computation of conjugate heat transfer in nonorthogonal boundary-fitted coordinates," Numerical Heat Transfer, Part 8, Vol. 20, pp. 25~40.
- (8) EPRI, 1984, "Designer's handbook for forced-cooled high-pressure Oil-Filled Pipe-type cable systems," EPRI, EL3624.
- (9) Patankar, S. V., 1980, "Numerical heat transfer and fluid flow," McGraw-Hill, New York.