

지중케이블 접속부의 절연층 두께변화에 따른 열해석 연구

崔圭植

A Study on the Heat Transfer Analysis based on Insulation Thickness Variation of Cable Splice Part

Gyu Shik Che

요 약

지중케이블을 따라서 강제냉각관을 설치하여 케이블을 냉각시키는 방법은 특히 일본을 비롯하여 세계 선진국에서 일반적으로 사용하고 있는 방법이다. 그러므로 케이블의 강제냉각에 대한 연구는 국내외적으로 많이 이루어져 그 결과도 매우 성공적이다. 그러나, 케이블 접속부에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고 미미한 상황이다.

그러므로, 본 연구에서는 기존의 154kV 지중 케이블의 접속재를 전력구의 맨홀에 설치하여 냉동기를 이용한 냉각방식에 의해 맨홀의 온도를 10℃로 유지한다고 했을 때, 열해석을 통해 절연층의 두께변화에 따라 절연유의 열유동 및 등온선분포가 어떻게 형성되는가를 연구한다. 연구결과에 의해서 국내에서 도입하려는 지중케이블 접속부의 냉각방식에 대해 검토하고자 하였다.

ABSTRACT

The cable cooling through installing the cooling pipe along the transmission cable becomes universal in foreign leading countries, especially in Japan, and, there are so many study results inside and outside of the country. However, the remarkable study result for cooling method of cable splice part is not achieved in spite of its importance.

This paper is, therefore, carries out detailed heat transfer analysis of existing 154kV underground cable-splice, depending on the insulation thickness variation when it is installed in manhole of tunnel whose temperature is maintained as 10℃ using refrigerator. This paper studies also the cooling method of underground cable splice based on this result.

Key Words: heat transfer analysis, underground transmission, cable splice

1. 서 론

현재 일본 및 구미에서는 송전계통에 대해 최고 500KV급 까지 지중화하여 운전하고 있으며, 국내에서도 154KV까지 운전되고 있는 지중송전 계통이 왕십리 S/S - 동서울 S/S 사이의 345KV 지중선로 개통을 시작으로 추후로는 345kV까지 격상되어 운전되는 추세에 있다.

이와 같은 지중송전계통의 내용량화 추세에 대처하기 위해서는 회선당 송전용량을 증대시키는 방안이 구체적으로 강구되어야 하는데, 그 방법으로서 해외에서는 지중케이블계통에 강제냉각방식을 도입 운전함으로써 송전용량을 증대시키고

있다.

한편, 우리나라의 경우를 보면 한정된 루트로서 대규모의 전력수요에 대응하기 위해서 케이블의 송전 용량을 증가시킬 수 있는 강제냉각 시스템의 도입에 대한 연구를 수행하여 현재 적용하는 방향으로 사업이 진행되고 있다.

현재 154kV급 OF(Oil-Filled) 케이블 및 접속부는 국내에서 생산 및 시공을 하고 있으나, 접속부의 설계기술 및 제작 기술은 완전하게 자립하고 있지 못하다. 또한, 국내의 유명전선회사들은 최근 들어 345kV급 OF케이블을 개발하여 생산하기 시작하였으나, 지중케이블을 계통에 실제로 포설할 경우에는 케이블과 케이블 및 케이블과 가공선과를 접속시켜주

는 각종 접속부가 필요하다. 그런데, 이에 관련된 연구도 미흡한 상태여서 이에 관한 설계기술 및 제작기술의 자립이 필요하다.

고압지중케이블의 국내외 연구동향을 살펴보면 대부분 케이블의 도체부분만을 연구대상으로 취급하였고^(1~20) 접속부 영역에 대한 상세 열전달 연구는 거의 없다. 그러므로, 접속부에 대해서 상세 열전달 연구가 필요하다.

초고압케이블 접속부의 열해석과 관련된 국내외의 연구들을 살펴보기로 한다. 1980년 Abdel Aziz와 Riege⁽²¹⁾가 300 kV(공칭단면적 2,000mm²) 고압지중케이블 및 접속부에서 도체내부통로에 절연유가 강제로 흐를 때, 도체 선상의 온도분포를 유사저항메쉬법(analogous resistance mesh method)을 사용하여 구하였다. 1981년 Hayashi 등⁽²²⁾은 275 kV OF 케이블 접속부에서 열등가회로를 적용하여 열전달을 검토한 결과 케이블 축방향의 열의 흐름은 도체부분에만 고려하여도 계산결과에는 오차가 크지 않다는 것을 보였다. 그리고 이 결과로부터 정상상태시 송전용량 및 도체온도에 관한 해석해를 구하였으며, 케이블 종단접속부에서의 실측시와 결과를 비교하였다. 또한 과도상태의 송전용량에 관해서는 열등가회로를 이용하여 수치해를 구하였다.

1982년 미국 전력기술연구소(EPRI)⁽²³⁾에서는 고압지중 파이프형 케이블의 종단부분의 열해석을 위한 수치해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 1990년 CIGRE⁽²⁴⁾에서는 한 보고서를 통해 고압지중케이블의 자연 및 강제냉각에 있어 열해석 방법을 소개하였다.

1988년에서 1990년까지 한국전기연구소⁽²⁵⁾에서 수행한 연구에서는 현재 해외에서 실용화되고 있는 접속부의 구조, 특성 등을 파악하였고 유한요소법에 의한 접속부의 전계 및 열해석 알고리즘을 확립하였다. 그리고 154kV 및 345kV 보통 접속부와 유지접속부에 대해서 열해석을 수행하였다. 그러나, 절연유구역의 대류효과를 상세히 분석하지 않고 절연유의 열전도계수에 일정한 수를 곱하여 곱한 만큼 열전달이 많이 일어난다고 가정한 전도열전달 문제로 이상화하였다.

상기 연구동향을 분석해보면 실제로 OF케이블의 접속부에서 전기적인 절연뿐만 아니라 접속부에서 발생한 열을 효과적으로 방출하는 역할을 하는 절연유부분의 대류효과를 포함하는 상세한 열전달해석을 수행치 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 고압지중 OF케이블 접속부 부분의 상세 열해석을 위해, 도체공칭단면적 1200mm²인 154kV OF 케이블용 절연접속부를 선택하여 접속부 부분을 접속부의 길이방향에 따라 반경방향으로 몇 개로 나누어 2차원화($r-\theta$ 좌표)한 후, 수치적인 해석방법으로 접속부 주요설계 변수인 전류 및 표면대류계조조건 등에 따른 유동 및 온도분포를 분석하였다. 또한 열전달 효과를 검토하기 위해 등가열전도율을 정의하고 이것을 사용하여 여러 가지 변수에 따른 각각의 영

향을 상호 비교 검토한다.

제 II 장에서는 접속부의 열해석을 하기 위한 각종 배경 및 이론을 전개하였으며, 제 III 장에서는 접속재의 부위를 두 가지로 취하여 절연부분의 두께가 변할 때 열유체의 유동 및 등온선 분포가 어떻게 변하는가를 분석하였다. 마지막으로 제 IV 장에서는 결론적으로 분석된 내용에 대한 검토를 하고 그 결과를 어떻게 이용해야 하는가를 기술하였다.

2. 연구방법 및 이론

2.1 이론적 배경

접속에 사용되는 접속부는 케이블 본체와 동일한 기계적 성능을 갖추어야만 한다. 접속부로서 갖추어야 할 기계적 성능으로서는 여러 가지가 있겠으나 열적인 측면에서는 다음과 같다.

- 사용 온도범위내에서 장기간 사용해도 이상이 발생하지 않을 것

- 열방산 특성이 좋을 것

- 국부적인 고온(Hot Stop)부위가 발생하지 않을 것

케이블 접속부는 접속장소, 케이블의 종류, 절연방법, 구조, 형상 및 그 목적에 따라 상당히 많은 종류가 있는데, 케이블 내에 절연유로 차 있는 OF 케이블의 경우 중간접속부, 종단 접속부, 이종케이블간 접속부 및 분기케이블 접속부로 나누어진다. 본 연구에서는 많은 접속부들중에서 일반적으로 사용량이 가장 많은 중간접속부의 일종인 절연접속부를 연구대상으로 선택하였다.

케이블 및 접속부에 전류가 흐르면 도체부분에서는 도체재질에 따른 고유저항이 존재하므로 열이 발생한다. 그리고 절연체를 전극에 끼우고 이것에 교류전압을 가할 경우 흐르는 전류는 전압의 방향에 대해서 보통 완전하게 90° 진행하지 않고 δ 만큼 치진다. 이로 인해 생기는 에너지손실을 유전체손실이라 하고, 이것에 의해서도 열이 발생한다.

2.2 기본이론

일반적인 열유체계통에서 열전달 및 유체유동을 나타내는 미분방정식은 종속변수로서 어떤 물리량을 가지고 있으며, 이들 종속변수에 영향을 끼치는 다양한 인자들이 서로 균형을 이루고 있어야 한다.

열유체계통에서의 열유동현상을 나타내기 위한 보존방정식들은 일반적으로 질량방정식(연속방정식), 운동량방정식 및 에너지방정식 등이다. 또한 계통내부에서 화학반응이 존재한다면 화학종 보존방정식이 필요하며, 유동이 층류가 아니고 난류라면 난류유동을 모사할 수 있는 난류모델방정식인 난류 유동 방정식이 필요하다.

2.2.1 계산모델

초고압 지중케이블접속부에 대한 해석을 하기 위해서, 원통좌표계를 적용하여, 접속부의 도체 길이방향을 z 좌표, 접속부 원형단면의 반경방향을 r 좌표 및 원주방향을 θ 좌표로 선정하여, 정상상태 2차원 열유동해석모델을 수립한다.

또한, 본 연구에서는 3차원적인 접속부에서 원형단면에서의 열전달 뿐만 아니라 길이방향으로의 접속부 온도분포를 알아보기 위하여, 길이방향인 r-z 방향의 유동이 r- θ 방향에서 나타나는 유동보다는 아주 작다는 가정하에 2차원적 유동으로 가정하여 길이방향을 따라 대표적으로 외부절연유의 폭이 가장 큰 부분과 가장 작은 부분인 절연체 중심부분의 두 곳을 선정하여 정상상태 2차원 열전달해석을 수행하였다.

그림 2-1은 중간접속부를 r-z 단면으로 전체 접속부의 1/4만 나타내어 2개의 단면 위치를 표시하였고, 그림 2-2에는 접속부의 단면의 r- θ 좌표 및 각 방향의 유체 속도 V 및 U를 나타내었다.

접속부의 단면은 일반적으로 내부절연유, 도체, 절연체, 외

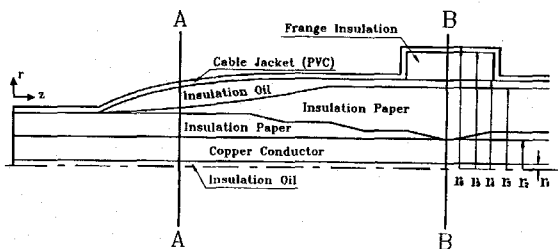
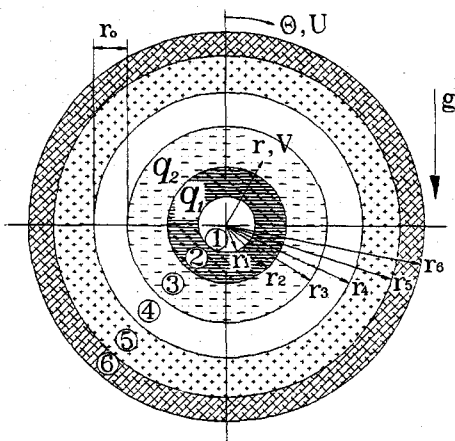


그림 2-1 OF 케이블 접속부의 r-z 방향 단면도
Fig. 2-1 cross section of r-z direction of OF cable splice part



- (1) 내부절연유 (2) 구리도체 (3) 절연체
- (4) 외부절연유 (5) 후렌지절연체 (6) 접속재 외장

그림 2-2 OF 케이블 접속부의 r- θ 방향 단면도
Fig. 2-2 cross section of r- θ direction of OF cable splice part

부절연유, 후렌지절연체 및 외장층의 6개층을 이루어져, 그림 2-2에 각각 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥으로 나타내었고 각 층의 반경을 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 및 r_6 로 지칭하였다. r_0 는 대류현상이 존재하는 외부절연유층의 폭을 나타낸다. 그림 2-2에 나타난 각 단면에서의 각 층들의 칫수를 표 2-1에 나타내었다.

표 2-1 케이블접속부 각 단면의 내부치수 (단위:mm)
Table 2-1 internal size of each cross section for cable splice(unit : mm)

반경	A 부분	B 부분
r_1	7	7
r_2	23	29
r_3	36.3	73
r_4	77.1	77.1
r_5	-	125
r_6	84	139

접속부의 첫번째 층인 중심부는 절연유의 통로로서 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 절연지로 이루어져 있으며 절연유에 함침되어 있는 절연지에 전압이 발생하면 전기적인 유전체손실(Dielectric Loss)에 의해 열이 발생한다. 네번째 층은 전기적인 절연기능 뿐만 아니라 열전달 효과를 얻기 위한 절연유층으로 형성되어 있다. 다섯번째 층은 접속부의 중앙단면에서만 존재하는 절연유층과 외장 PVC층 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.

본 항의 연구에서는 단면 A 및 B 부분에 대해서 절연유층의 두께에 따라 절연유의 유동현상 및 온도분포가 어떻게 변하는가를 연구하여 최적의 절연유층을 결정하고자 하였다.

2.2.2 지배방정식 및 경계조건

접속부에서의 전도 및 대류 열전달 현상을 해석하기 위해 물리적인 현상을 기술하는 방정식을 다음과 같은 가정을 도입하여 단순화시킨다.

- 밀폐공간내의 유동은 정상상태 2차원 층류유동이다.

유체가 케이블을 따라 흐르는 것이 아니라 접속부에 정체되어 있어서 난류유동현상이 없기 때문에 정상상태 2차원으로 가정해도 해석상에 오차가 발생하지 않음

- 압축성 효과, 점성소산 및 복사열전달은 무시한다.

본 절연체오일은 압축도가 적으며, 유동체에 의한 마찰이 측정할 수 없을 정도로 작으며, 복사 스테판-볼쯔만 상수가 현저히 작기 때문이다

- 도체 및 절연체에서 발생하는 열은 단위 체적당 일정한 값을 가진다.

줄 열이나 유전체손에 의한 발생열이 길이방향에 따라 일정함

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

가) 연속방정식(Continuity Equation)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho U) = 0 \quad (2-1)$$

나) 운동량방정식(Momentum Equation)

(a) θ -방향

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho UV) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho U^2) = \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial U}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}) \\ + (\frac{2U}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{\mu U}{r^2} - \frac{\rho UV}{r}) + \rho g \sin \theta \end{aligned} \quad (2-2)$$

(b) r-방향

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r V^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho UV) = \\ -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial U}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}) + \\ + (\frac{-2\mu}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} - \frac{\mu V}{r^2} - \frac{\rho U^2}{r}) - \rho g \cos \theta \end{aligned} \quad (2-3)$$

다) 에너지방정식(Energy Equation)

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho C_p UT) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho C_p VT) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}[\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[kr \frac{\partial T}{\partial r}] + Q \end{aligned} \quad (2-4)$$

연속방정식 및 운동량방정식은 도체내부의 내부 절연유 및 절연지외부의 외부절연유 부분에 적용되며, 에너지방정식은

접속부 단면 각층에 적용된다. 도체 부분과 절연지 부분에서는 전류가 흐르면서 발생하는 열손실에 따른 열이 발생하며 단위체적당 발생열량 Q로 나타낸다.

위의 지배방정식들은 식 (2-5)와 같이 일반형 미분방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r V \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho UV \phi) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\frac{\Gamma}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r}) + S_\phi \end{aligned} \quad (2-5)$$

여기서, ϕ 는 일반적인 변수이고 Γ 및 S_ϕ 는 각각의 일반 변수에 해당하는 확산 계수 및 생성항(Source Term) 등을 나타내며, 지배방정식에서 각 변수의 정의는 표 2-2와 같다.

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

표 2-2 지배방정식에서, Γ 및 S 의 정의
Table 2-2 Definitions of Γ and S

방정식	ϕ	Γ		S	
		액체	고체	액체	고체
Mass	1	0	0	0	0
θ -Momentum	u	μ	∞		0
r-Momentum	v	μ	∞		0
Energy	T			0	0

$$0 \leq r \leq r_6$$

$$\theta = 0, \pi$$

$$0 \leq \theta \leq \pi$$

$$r_1 < r < r_2 \quad ; \quad U = V = 0$$

$$r_2 < r < r_3 \quad ; \quad U = V = 0$$

$$r_3 < r < r_5 \quad ; \quad U = V = 0$$

$$r_4 < r < r_6 \quad ; \quad U = V = 0$$

$$r = r_6 \quad ; \quad -K \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_s - T_\infty)$$

2.2.3 접속부내의 열발생

케이블 및 접속부에 전류가 흐르면 도체부분에서는 도체재질에 따른 고유저항이 존재하며 이로 인하여 열이 발생하게 되며 단위길이당 발열량은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$q_1 = I^2 R \quad (2-6)$$

여기서, I는 전류, R는 도체저항이다.

유전체손실에 의한 단위길이당 열발생량은 다음식으로 나타낼 수 있다.^[26]

$$q_2 = 2\pi f C n \frac{E^2}{3} \tan \delta \quad (2-7)$$

여기서, f는 주파수, C는 정전용량, n는 선심수, E는 순간 최고전압이며 $\tan \delta$ 는 유전정접(Dielectric Tangent)이다. 위의 단위길이당 열발생량 q_1, q_2 는 단위체적당 열발생으로 환산되어 에너지방정식인 식 (2-4)의 Q에 적용된다.

2.2.4 물성치 선정

접속부에서 절연유의 자연대류유동을 포함한 열해석에 있어 접속부 각종 구성요소의 물성치가 중요한 영향을 미친다. 고체부분인 도체, 절연지, 후렌지절연체 및 외장층의 열전도계수와 열용량을 표 2-3에 나타내었다.

접속부에서 자연대류열전달이 발생하는 유체부분인 절연유층의 절연유는 전기적인 절연 역할 뿐만 아니라 열전달 측면에서 중요한 역할을 한다.

표 2-3 케이블 접속부 내부 물질의 물성치^[27]
Table 2-3 Internal Material Properties of Cable Splice

물 질	열전도도 (w/cm)	열용량 (w/cm)
도체 (Cu)	386	3,430
절연지	0,1818	1,913
케이블자켓	0,1660	2,500
플랜지 절연체	0,790	2,125

일반적인 절연유는 광물유 및 합성유로 대별되나 OF 케이블 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.^[28]

$$\rho = -0.62T + 880 \quad (2-8)$$

$$C_p = 2.5T + 1750 \quad (2-9)$$

$$k = -7.0 \times 10^{-5} \cdot T + 0.113 \quad (2-10)$$

$$v = \{\exp(-5.877 \times 10^{-3} \cdot T + 2.2585)\} \times 10^{-8} \quad (2-11)$$

여기서, ρ : 유동체의 밀도(kg/M³), C_p : 비열(J/kg°C), k : 열전도도(W/m°C), v : 동적 점성계수(m²/S), T : 온도(°C)이다.

2.2.5 수치해석

식 (2-1)은 비선형 타원형 편미분방정식의 형태이며 이를 수치적으로 해석하기 위해서 Patankar의 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 원통좌표계의 r- θ 방향으로 52×52로 하였으며 θ 좌표는 균일하게 배치하였으나, r 좌표는 접속부 외부절연유의 유동 및 열전달현상이 전체 접속부의 온도분포에 큰 영향을 미칠 것으로 판단하여 고체부분보다 유체부분에 보다 조밀하게 배치하였다. 그림 2-3에는 본 수치계산에 적용된 단면 A 및 단면 B에서의 격자배치를 나타내었다.

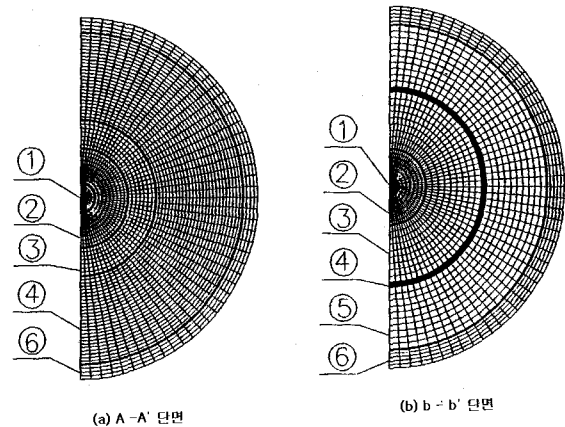


그림 2-3 각 단면에서의 격자배치
Fig. 2-3 structural arrangement of each cross section

3. 실험결과 및 고찰

접속부 단면중 외부절연유층의 두께에 따른 유동 및 온도분포 특성을 살펴보고, 이에 대한 전류 및 대류경계조건에 따른 영향을 조사한다. 그리고, 외부절연유 구간의 내부면 및 외부면에서의 대류열전달의 분포를 검토한다. 수치계산시 전압은 154kV이고, 냉동기를 이용한 강제냉각방식을 채택할 경우 전력구내의 온도를 10°C로 유지할 수 있기 때문에 외기온도는 10°C로 일정하게 유지되는 것으로 한다.

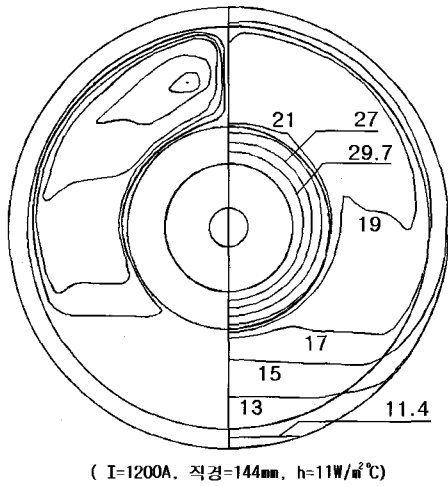


그림 3-3 단면 A 유선 및 등온선 분포(직경=144mm)
 Fig. 3-3 distribution of fluid and isothermal lines of cross section A(dia. = 144mm)

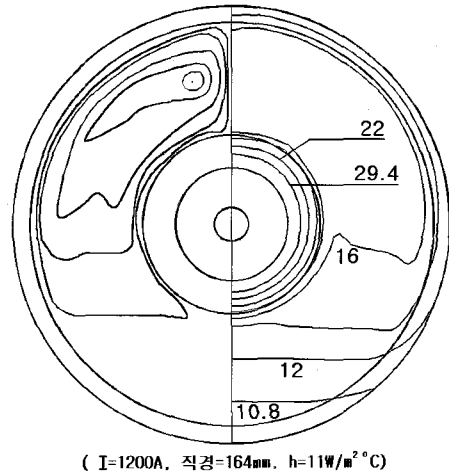


그림 3-5 단면 A 유선 및 등온선 분포(직경=164mm)
 Fig. 3-5 distribution of fluid and isothermal lines of cross section A(dia. = 164mm)

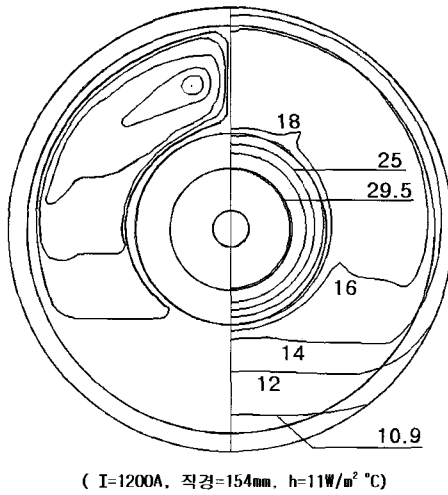


그림 3-4 단면 A 유선 및 등온선 분포(직경=154mm)
 Fig. 3-4 distribution of fluid and isothermal lines of cross section A(dia. = 154mm)

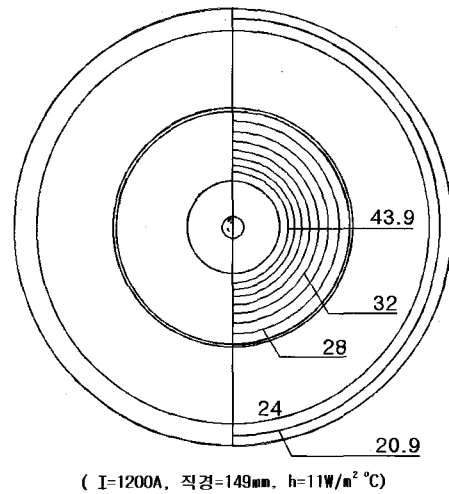


그림 3-6 단면 B 유선 및 등온선 분포(직경=149mm)
 Fig. 3-6 distribution of fluid and isothermal lines of cross section B(dia. = 149mm)

의 중심부근에서는 층류로서 거의 수평온도분포를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 여기에서 보면 전류의 증가에 의한 도체 내에서의 발열량은 전류의 제곱에 비례하여 증가하지만 도체의 최고온도는 외부절연유층의 자연대류 현상에 의해 열전달이 잘 일어나 외부로의 열방출이 활발하여 전류가 증가하여도 온도는 크게 상승하지 않음을 알 수 있다. 또한, 유동의 세기는 열발생량이 증가하여도 크게 증가하지 않는데 이는 절연유의 점성계수가 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다.

상기 3개의 그림에서 절연유층의 폭이 커질수록 냉각효과가 커진다는 것을 알 수 있다. 즉, 접속부의 표면온도를 10℃

로 가정했을 때(냉동기를 이용한 강제냉각방식일 경우) 접속부의 표면 부근에서는 온도차이가 별로 없으나, 도체부분에 접근할수록 냉각효과의 차이에 의해서 온도차이가 커진다. 그림 3-3의 경우를 보면 접속부 내의 최저온도가 11.4℃, 최고온도가 29.7℃이다. 그림 3-4의 경우는 10.9℃와 29.5℃이며, 그림 3-5의 경우는 10.8℃와 29.4℃이다. 전체적으로 도체부분에서 케이블도체의 최고허용온도인 85℃를 초과하지는 않는 것으로 나타났다.

단면 B에서 대류경계조건인 h 가 $11\text{w/m}^2\text{°C}$ 이고, 전류 I가 1200A인 조건에서 절연유층까지의 직경을 149mm에서 시작

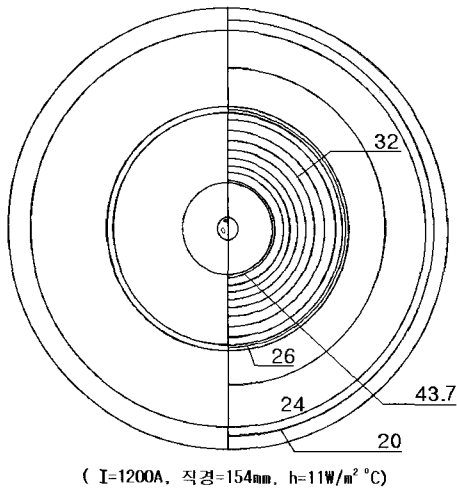


그림 3-7 단면 B 유선 및 등온선 분포(직경=154mm)
 Fig. 3-7 distribution of fluid and isothermal lines of cross section B(dia. = 154mm)

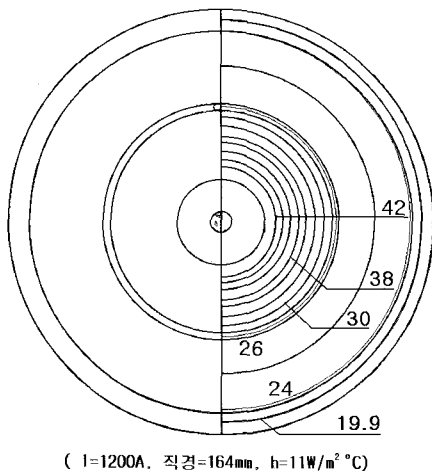


그림 3-8 단면 B 유선 및 등온선 분포(직경=164mm)
 Fig. 3-8 distribution of fluid and isothermal lines of cross section B(dia. = 164mm)

하여 154mm, 164mm로 5mm 또는 10mm씩 증가시켰을 경우에 대한 유선 및 등온선 분포를 그림 3-6~3-8에 나타내었다. 이 부분은 중심부에서 절연층의 폭이 작아서 대류열전달이 잘 일어나지 않는다. 따라서, 유체의 유동이 눈에 띌 정도가 아니라, 이 폭을 크게 하면 3-7과 3-8에서처럼 열유동이 서서히 시작된다. 그림 3-6의 경우를 보면 접속부 내의 최저온도가 20.0℃, 최고온도가 43.9℃이다. 그림 3-7의 경우는 20.0℃와 43.7℃이며, 그림 3-8의 경우는 19.9℃와 42.0℃이다.

3.3 고찰

지중전송케이블 접속부의 열전달 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 도체 및 절연체부분의 온도분포이며 이를 간접적으로 나타내는 것이 도체의 최고온도이다. 단면 A에서 우선 유선분포를 살펴보면 외부절연층의 대류열전달현상으로 인하여 절연유층 상부에서 유동함수의 최고값이 나타나며, 절연유층의 두께가 두꺼울수록 열유동이 자유로워진다. 온도분포면에서 보면 도체 주위에 열이 방사형으로 균일하게 발생되나 유체의 대류 열전달 현상으로 인하여 절연유의 윗부분이 아래 부분에 비하여 더 뜨거워지는 현상을 나타낸다. 단면 B의 경우는 절연유층이 매우 얇기 때문에 절연유에 의한 냉각 및 대류효과를 기대할 수가 없기 때문에 접속부의 온도가 더 상승하며, 등온선도 접속재 주위로 원형으로 균일하게 분포된다.

그림들에서 보는 바와 같이 단면 A의 경우는 절연유층의 두께변화에 따른 냉각효과의 변화가 작으나, 단면 B의 경우는 그 효과가 크게 나타난다. 여기서 중요한 것은 외부 공기 온도 즉, 전력구내의 온도를 10℃ 부근으로 유지해줄 수 있는지가 문제인데, 일본의 경우를 보면 냉각탑에 의한 냉각으로서 어렵고, 냉동기에 의해서만 가능하다. 도체의 최고온도는 절연유의 점성계수 및 접속재 중심부(단면 B)와 같이 단면의 대부분이 유침절연지 및 후렌지절연체로 되어 있는 부분에서는 절연체의 열전도계수 값에 관계됨을 알 수 있다. 따라서, 향후 접속재설계에 있어서는 전계해석에 영향이 없는 한, 절연유 공간의 폭을 넓혀야 할 것이다. 또한, 접속재가 설치되어 있는 전력구내에서 열제거 측면에서의 HVAC 설계에도 관심을 가져야 할 것이며 장기적으로는 접속재 재질의 물성치(열전도계수 및 점성계수등)에 대한 심도있는 연구가 필요하다. 서론에서도 언급한 바와 같이 국내외에 접속재의 냉각에 관한 연구논문이 흔하지 않아서 본 논문에서 검토해본 내용과 비교할 수 없는 것을 애석하게 생각한다.

4. 결 론

이상과 같이 154kV 지중송전케이블 접속재에 대해서 열전달 해석을 수행하였다. 접속재의 주요설계변수인 전류, 표면 대류경계조건 및 외부절연유 두께의 변화에 따른 절연유 유동 및 온도분포를 분석하였다. 연구결과로는 우선 접속재 열해석 방법론을 확립할 수 있었다. 그리고 접속재 부위별 유동 및 온도분포곡선 등 설계 데이터를 얻었으며, 접속재의 최고 운전한계전류등 운전조건을 얻었다.

지중케이블접속부의 제일 두꺼운 층과 제일 얇은 층의 절연유층에 대한 열해석을 통하여 절연유유동 및 온도분포를 분석하였다.

열해석에 의하면 전력구 맨홀의 공기온도를 10℃ 이하로

유지할 수 있다면 단면 A의 경우 직경이 144mm이어도 도체의 최고허용온도 이내로 냉각시킬 수 있으며, 단면 B의 경우도 마찬가지로 최저직경인 149mm이어도 된다. 그러나, 뜨거운 여름 한낮의 온도가 40℃ 전후가 되는 우리의 현실에서는 냉각탑에 의해서 얻을 수 있는 최저온도가 25℃ 이상이기 때문에 현재와 같은 접속재를 사용할 경우 접속재 도체의 온도가 도체허용최고온도를 초과할 우려가 있다. 따라서, 이러한 경우는 냉동기에 의한 냉각을 시행하여 접속부의 외부공기온도를 낮추어야 한다.

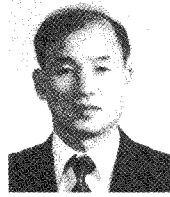
* 이 연구는 96년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임
* 과제번호 : 961-0912-064-1

참고 문헌

- [1] 박만홍, 최규식, 김재근, 서정운, "전력구트라프내 간접 수냉방식에서의 송전용량변화에 관한연구", 전기학회 논문집, 제41권 제5호, pp. 445~458, 1992
- [2] C.A.Arkell, E.H. Ball, "The Design and Installation of Cable System with Separate Pipe Water Cooling", CIGRE, 21-01, 1978
- [3] C.A.Arkell, G.Bazzi, G.Ernst, W.D.Schuppe, W.Trausteiner, "First 380kV Bulk Power Transmission System with Lateral Pipe External Cable Cooling in Austria", CIGRE, 21-09, 1980
- [4] W.Boone, H.G.Tempelaar, C.W.M.Vos, G.M.L.W.Van de 썩디, "Some Results of Trials of an Externally Cooled 400kV Cable System", KEMA-Laboratories, Arnhem, the Netherland
- [5] H.Ono, K.Kanemaru, "Cooling Performance and its Verification of Separate Pipe Cooling System Installed in Trough", 日立電線, No.3, pp. 9~14, 1983
- [6] K.Yamada, T.Hayakawa, K.Fushimi, M.Kinoshita, T.Suzuke, T.Inoue, "Indirect Water Cooling for Electric Power Cable Laid within Trough in Tunnel, The Furukawa Electric Co. Ltd.", Furukawa Review, No.2 pp. 51~60, 1982
- [7] D.E.Williams, "Natural and Forced Cooling of HV Underground Cables : UK Practice", IEE proc., vol.129, Pt. A. No.3, pp. 137~161, 1982
- [8] E.Peschke, "The Calculation of Continuous Rating for Forced-Cooled High Pressure Oil-Filled Pipe-Type Cables", ELECTRA, No.113, pp. 97~121
- [9] M.Hayashi, K.Uchida, W.Kumai, K.Sanjo, M.Mitani, N.Ichianagi, T.Goto, "Development of Water Pipe Cooling System for Power Cable in Tunnels", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.4, No.2, pp. 863~872, 1989
- [10] K.Kimura, S.Hiyama, N.Shiseki, I.Miura, "Transient Temperature Rise of Underground Power Cable(Part 1 Theoretical Analysis)", The Fujikura Cables Works, Ltd., Fujikura Densen Giho, No.53, pp. 7~12, 1975
- [11] G. Luoni, A.S.MOrello, A.E.Crockett, "Continuous Current Rating for External and Surface Cooled Cables Systems", IEE Proc., vol.128, No.3, pp. 129~139, 1981
- [12] T. Kobayashi, J. Mori, M. ogino, M. Nakagawa, I. Kume, H. Kojima, K. Kawasaki, T. Okamoto. "Development of 275kV Internally Water-Cooled XLPE Cables", IEEE PAS, vol. PAS-104, No.4, pp.775~784,1985
- [13] Z. Iwata, N. Ichianagi, M.Kinoshita, "Separate-Type Internal Oil-Cooled (SIOC) Cables", The Furukawa Electric Co. Ltd., Furukawa Review, pp.83~85, 1980
- [14] D.J.Skipper. "The Calculation of Continuous Ratings for Forced Cooled Cables", ELECTRA, No.66,pp. 59~84,1979
- [15] K.Ogawa, M.Kurata, H.Suzuki,K. Kawasaki, N. Imai, S. Nakamura, S.Sakai, "Field Test of 275kV Internally Water Colled XLPE Cables System", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.4, No.1, pp. 8~18, 1989
- [16] Z.Iwata, N. Ichianagi, "High Power Transmission with Conductor-Cooled Cables", The Furukawa Electric Co. Ltd., Furukawa review, No.2 pp. 61~69, 1982
- [17] J.H. Willyard, J.C. Chato, J.M. Crowley, "Pressure Drop and Heat Transfer in Entrance and Exit Chambers of Forced Cooled High Pressure Oil Filled Cable Systems",IEEE PAS, vol. PAS-101, No.9, pp. 3028~3035, 1982
- [18] J.A. Hitchcock, M.J. Thelwell, "The Cooling of Underground EHV Transmission Cables", IEEE PAS, vol. PAS-87, No.1, pp. 129~134, 1968
- [19] C.A. Arkell, R.B. Hutson, J.A. Nicholson, "Development of Internally Oil-Cooled Cable

- Systems", Proc. IEE, vol.124, No.3, pp. 317~325, 1977
- [20] H.J Kunisch, P. Blasius, B. Harjes, M. Henschel, W. Martin, "Testing a 110kV Low Pressure Oil-Filled Cable with a Water Cooled Conductor in Berlin (West)", CIGRE, 21-01, 1982
- [21] Abdel Aziz, et al., "A new method for cable joints thermal analysis", IEEE Trans. PAS-99, No.,1980
- [22] M. Hayashi, et al., "Current carrying capacity of power cable accessories", Fujikura Densen Gibo, No. 63, 1981
- [23] EPRI, "High-Ampacity terminations", EPRI, EL-2233, 1982
- [24] CIGRE, "The steady state thermal behaviour of accessories for colled cable systems", CIGRE WG 21-08, Electra, No. 128,1990
- [25] 한국전기연구소, "초고압 지중OF케이블 접속재 국산화 및 접속공법에 관한 연구(I)(II)", 1989~1990
- [26] 日本電線工業會, "日本電線工業會規格電力ケーブルの許用容電流", JCS168D, 1980, pp. 6~60
- [27] 한국전기연구소, "초고압 지중 OF 케이블 접속재 국산화 및 접속공법에 관한 연구(I),(II)", 1989~1990
- [28] EPRI, "Designer's Handbook for Forced-Cooled High-Pressure Oil-Filled Pipe-type Cable Systems", EPRI,EL3624, 1984

〈 저 자 소 개 〉



최규식(崔圭植)

1948년 12월 29일생. 1976년 3월 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 6월 뉴욕공과대학 전기과 졸업(석사). 1993년 명지대학교 전기공학과 졸업(박사). 1978.2-1993.2 한국전력기술연구소 근무. 현재 건양대학교 교수.