

HVDC 케이블용 함침 절연지의 온도 및 전계 의존성

안미경, 전승익, 이태호, 김남열, 최창열  
LS 전선 기술개발본부

Dependence of DC Volume Resistivity of Mass Impregnated paper on Temperature and Electric Stres

M. K. Ahn, S. I. Jeon, T. H. Lee, N. Y. Kim, C. Y. Choi  
R&D Center LS cable Ltd.

**Abstract** - 오늘날 DC 케이블은 도서간의 장거리 전력전송 및 서로 다른 주파수간의 계통연계를 위해서 널리 확대되어 사용되고 있다. 일반적으로 AC케이블의 전계는 절연체의 유전율에 의해서 결정되는 용량성 전계분포를 가지며, DC케이블은 과전 초기에는 절연체의 유전을 뿐만 아니라 저항율에 의해서 결정이 되며 충분한 시간이 흐른 후에는 저항율에 의해서 결정되는 저항성 전계분포를 가진다.

본 논문에서는 해저 HVDC 케이블용 함침 절연지 절연저항의 온도 및 전계 의존성을 평가하기 위해서 저항율을 측정 하였으며 통계처리를 통해서 온도 및 전계의존성을 구하였다..

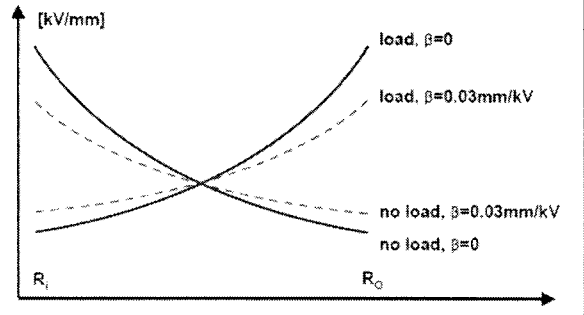
포가 결정되어 지는 특징을 가진다. 또한 절연체의 저항율은 온도 및 전계의존성을 보이며 각각 온도 의존계수( $\alpha$ ), 전계의존계수( $\beta$ )이라고 한다. 그림 2는 온도 및 전계의존계수에 따른 케이블 구조내에서 전계 분포를 나타낸 것으로 도체에 흐르는 전류 및 인가된 전압에 의해서 초기단계에서는 용량성 분포를 따르다가 시간이 지남에 따라 용량성분포에서 저항성 분포로 전계가 변화됨을 보여준다. 특히, DC케이블에서는 운전 중 급속 시스 전계가 도체 전계보다 높아지는 전계 역전현상이 발생함을 알 수 있다.

1. 서 론

1954년 스웨덴 본토와 발틱해의 Gotland사이에 처음 포설된 이후로 HVDC 케이블의 수요는 꾸준히 증가하고 있다. 특히 1970년대 이후 반도체 기술의 발달로 싸이리스트 밸브가 기존의 수은 아크밸브를 대체하면서 HVDC송전 기술이 급격히 향상되었고 교류송전에 비해 직류송전이 갖는 여러 가지 장점 때문에 HVDC 송전은 양적, 질적인 측면에서 비약적인 발전을 계속하였다. 또한, 부하증가에 따른 대용량 화력 및 원자력발전소 건설에 따른 경제적 송전 및 송전선로 증설과 전력계통의 대규모화에 따른 단락용량 증가등으로 직류송전의 필요성은 절실히 요구되고 있는 현실이다.

또한, 도서간의 장거리 해저구간의 전력연계를 위해서는 HVDC케이블 송전이 필수적이며, 대부분의 직류케이블은 강제함침방법을 사용한 지절연 방식이 적용되어 왔다. 최근에는 DC XLPE케이블이 개발되어 평가되고 있으나 운용적인 측면에서 공간전하문제를 완전히 해소하지 못하였다.

본 논문에서는 AC 및 DC케이블에서의 전계분포에 대해서 설명하고, 자사의 HVDC 케이블 개발시 필요한 절연지 특성 중 절연지의 절연저항을 실험을 통하여 측정하여 온도 및 전계의존계수를 산출하였다.

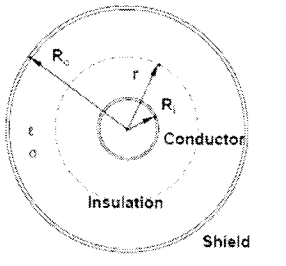


<그림 2> 원통형 구조에서의 DC 전계

2. 본 론

2.1 AC 와 DC 전계

일반적으로 단일 전연체로 이루어진 케이블에서 반경 r지점에서의 전계는 식(1)과 같이 계산되어 진다. AC전계 하에서는 온도가 변화하더라도 절연체의 유전율은 변함이 없기 때문에 전계분포를 예측하는 것이 용이하다. 여러 매질로 이루어진 AC전계의 경우 케이블의 구조, 인가전압 및 유전율에 의해 결정이 되며 전계는 도체가 가장 높고 급속 시스부분이 가장 낮다.



<그림 1> 케이블 구조

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(R_2 / R_1)} \quad \text{식(1)}$$

여기서, R<sub>1</sub>: 내부 절연 반경 [mm]  
R<sub>2</sub>: 외부 절연 반경 [mm]  
V: 인가 전압 [V]

그러나 DC 전계의 경우 AC와는 달리 절연체의 저항율에 의해서 전계분

2.2 전계와 온도 계수 측정

2.1절에서 설명한 바와 같이 절연층의 체적 저항율은 온도와 전계에 따라 크게 변화되며 일반적으로 DC케이블 절연체 내에서의 체적저항율은 아래 식(2)와 같은 경험식으로 나타내진다.

$$\rho = \rho_0 e^{-(\alpha T + \beta E)} \quad \text{식(2)}$$

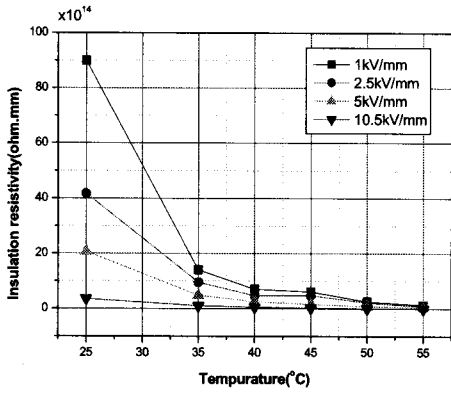
여기서,  $\rho_0$ 는 기준온도(25°C)와 낮은 전계(약 1kV/mm)에서의 체적 저항율을 나타낸다. 또한 T, E는 측정시 온도 및 인가된 절연체의 스트레스(전계)를 나타낸다.

본 절에서는 함침 절연지의 온도와 전계 의존계수를 산출하기 위한 시험에 대해서 설명하고자 한다. 절연지의 수분을 제거를 위해 진공건조를 실시하며, 진공건조 조건은 24시간 동안 110도에서 0.1torr의 진공 속에 둔다. 그리고 난 후 그 샘플을 진공도 0.1torr 이하 온도 110°C에서 72시간 동안 절연 컵과온도내에 넣고 함침 공정을 진행시켰다.

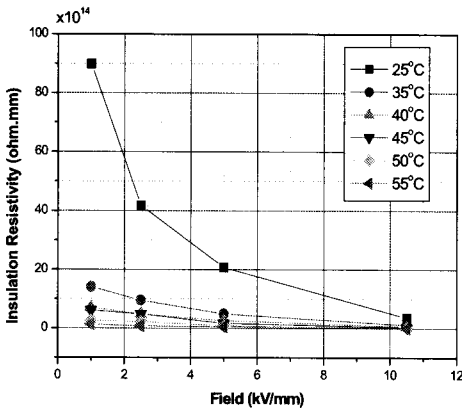
샘플의 직경과 전극 구조, 시험방법 등은 일반적으로 IEC 93에 따라 시행한다. 본 실험에서 사용된 전극은 직경 80mm인 구리 전극 및 가드전극으로 구성된 절연저항 측정 장치를 통하여 실험을 진행하였다.

절연지의 절연저항 측정시 온도조건은 25°C, 35°C, 40°C, 50°C, 55°C에서 측정하였으며 전계는 각각 1 kV/mm, 2.5kV/mm, 5kV/mm, 10.5kV/mm가 인가된 상태로 측정을 수행하였다. 또한, DC절연지의 체적저항율은 Microcal Origin version 6.0에 의한 통계처리 기법을 활용해 식(2)에 따라  $\alpha, \beta$  값을 산출하였다.

그림 3은 각 전계별 함침 절연지의 온도 의존성을 보여주며, 그림 4는 각 온도별 함침절연지 절연저항율의 전계의존성을 보여주고 있다.



〈그림 3〉 온도에 따른 체적 저항률



〈그림 4〉 전계에 따른 체적 저항률

상기의 두 그래프를 살펴볼 때 DC절연저항은 온도와 전계에서 따라 급격히 감소함을 알 수 있으며 최대 저항률은 온도 25°C, 전계 1 kV/mm 일 때  $9 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{mm}$  로 나타나며 반면 최소 저항률은 온도 55°C, 전계 10.5 kV/mm 일 때  $0.8 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{mm}$ 임을 알 수 있다.

표1.2는 DC절연저항의 온도와 전계 의존계수를 나타낸 것이다.

표1. 전계에 따른  $\alpha$  계수 의존성(온도 의존계수)

전계(kV/mm)	1	2.5	5	10.5	평균값
$(\alpha)$	0.17	0.14	0.13	0.11	0.14

표2. 온도에 따른  $\beta$  계수 의존성(전계 의존계수)

온도(°C)	25	35	40	45	50	55	평균값
$\beta$ [mm kV <sup>-1</sup> ]	0.43	0.32	0.30	0.28	0.28	0.26	0.30

실험에 사용 한 절연지의 의존 계수를 측정하여 평균값을 계산 한 결과  $\alpha$  는 0.14이며  $\beta$  는 0.03도임을 알 수 있다. 이 검토에 따르면 온도 의존계수인  $\alpha$  는 0.14로 다른 문헌과 비슷하지만 전계 의존계수인  $\beta$  는 0.3으로 다른 문헌과 비교하여 다소 높음을 알 수 있다.

절연지의 표면에 있는 오일과 오염 정도에 약간씩 차이가 있으므로 전계 의존계수에 오차가 발생했을 가능성이 높다.

### 2.3 DC 전계해석 프로그램 개발

DC전계해석을 위해서 자사에서 DC전계계산 프로그램을 개발하였으며 개발된 프로그램을 이용하여 전계해석을 수행하였다.

계산방법은 가우스의 법칙을 응용하여 식(3)을 통하여 얻을 수 있다.

$$\rho = \nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) \quad \text{식(3)}$$

HVDC 케이블 해석에서는 자장의 영향은 무시해도 되므로 패러데이 법칙을 다시 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\vec{E} = -\nabla V \quad \text{식(4)}$$

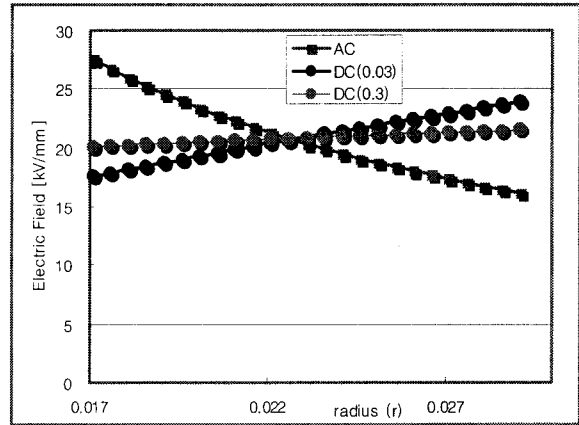
이러한 방정식을 적용하여 정리하면 식(5)를 얻을 수 있으며

$$\rho \nabla^2 V + \epsilon \nabla^2 \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad \text{식(5)}$$

식(5)를 계산하기 위해 후퇴차분법을 적용하여 알고리즘을 구성하였다. 여기에서 도전율은 온도와 전계의 함수로 식(2)와 동일하게 적용하였다.

### 2.4 전계와 온도 계수에 따른 전계분포

개발된 프로그램을 이용하여 250kV, 800mm<sup>2</sup> MI 케이블의 AC와 DC 전계 분포를 계산하였다. 이때 체적 저항률은  $9 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{mm}$ , 유전율은 4.2 초기 시험값으로 얻은 온도 의존계수인  $\alpha$ 는 0.14, 전계 의존계수인  $\beta$ 는 0.03 및 0.3을 적용하였다.



〈그림 5〉 AC & DC 전계 분포 ( $\alpha = 0.1, \beta = 0.03 \text{ \& } 0.3, \Delta T = 7.2^\circ\text{C}$ )

그림5를 살펴볼 때 AC전계 경우에는 가장 높은 전계는 도체쪽에서 나타나며 가장 낮은 전계는 절연에서 각각 27.5kV/mm, 16.16kV/mm 임을 알 수 있다. DC전계의 경우에는 12시간 이상 흐른 뒤에는 전계 역전현상이 발생하여 전계 의존계수인  $\beta$  값이 0.3, 0.03에 따라 각각 도체 전계가 20.6 kV/mm, 17.55kV/mm 그리고 절연 전계가 21.5kV/mm, 23.58kV/mm 로 나타남을 알 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 HVDC 케이블 합침절연지의 온도 및 전계 의존계수 측정을 수행하였으며 자체개발한 DC전계계산 프로그램을 이용하여 전계해석을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 자사 HVDC케이블 개발을 위해 절연지의 온도 및 전계의존계수를 확보하여 절연설계 시 필요한 데이터를 확보하였다.

2) HVDC 케이블 전계해석 프로그램 자체개발을 통하여 DC케이블에서 시간에 따른 전계분포를 계산할 수 있었다. 또한 개발된 프로그램을 통하여 케이블 및 접속함의 절연설계가 가능하게 되었으며 체적 저항률의 변화에 따른 전계 역전현상 등 AC와는 다른 특성들을 고려하여 제품설계가 가능하게 되었다.

### [참 고 문 헌]

1. Diego Valenza and Gerri Cipolini, "HVDC submarine power cable systems-state of the art and future developments" IEEE catalogue No. 95TH8130, pp283-287, 1995
2. 안정석, 이석진, 신진철, 김찬기, "HVDC 기술동향", 전력전자학회지, Vol. 8, No. 3, pp17-21, 2003
3. A. Fujimori, T. Tanaka, H. Takashima, T. Imajo, "Development of 500 kV DC PPLP-insulated oil-filled submarine cable" IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 11, No. 1, pp43-50, Jan. 1995