

## HVDC 절연유 중에서 Silicone Rubber의 팽윤특성 분석

이 태호, 김남열, 김정년, 전승익  
LS전선(주)

### The Analysis of HVDC Cable Oil Swelling Characteristics on the Silicone Rubber

T. H. Lee, N. Y. Kim, J. N. Kim, S. I. Jeon  
Advavanced R&D Center LS Cable Ltd.

**Abstract** - This work examines the effects of swelling MI type HVDC cable oil on the semiconductive silicone rubber and silicone rubber as used in accessories for application on outdoor termination (EBA) slip on sleeve. The behavior of volume resistivity is monitored as a function of the amount of cable oil diffused into the material. Resistivities of semiconductive silicone samples up to the typical insulator range ( $\sim 10^{10} \Omega\text{-cm}$ ) are observed as a consequence of swelling due to the presence of the diffused oil. The measured volume resistivities of the oil-impregnated semiconductive silicone rubber are compared to desired value as function of stress relief cone.

#### 1. 서 론

최근 전원이 원격화 되고 대용량화됨에 따라 장거리, 대용량용으로 송전 안정도 문제가 없는 직류송전이 각광을 받기 시작하고 있다. 해협 횡단 등 비교적 거리가 긴 해저케이블 송전이나 주파수가 서로 다른 지역 간의 계통연계 그 밖에 점점 증대하는 단락 용량 억제대책의 하나로서 교류•직류 연계 계통의 필요성이 높아짐에 따라 세계 각지에서 직류 송전을 채용하는 사례가 늘고 있다. 국내의 경우에도 제주-해남간 해저 케이블에 의한 직류 송전이 1997년부터 운전되고 있는 것뿐만 아니라, 국가 간 전력교류를 위한 동북아시아 전력계통 연계 시나리오인 러시아-북한-남한 간에 있어서 초고압 대용량 직류 송전선로의 건설 가능성도 제기되고 있다.

솔리드형 지절연 케이블은 이와 같은 HVDC 송전망 연결에 있어서 가장 경제적이며 실용적인 케이블로서 AC 34.5kV부터 DC 400kV/까지 사용되고 있다. 그러나 사용되고 있는 케이블 절연유의 고점도 때문에 과전단말을 접속하는데 있어서 상당한 작업시간과 기술적 어려움을 가지고 있다.

본 연구에서는 MI형 HVDC 케이블의 과전 단말 접속에 있어서 벨 마우스 대신 실리콘 고무 재질의 슬립 온 타입 슬리브 (slip on type sleeve)의 사용 가능성 검토를 위해 절연유 중에서의 팽윤 특성에 대해 시험 분석을 하였다. 팽윤 특성 시험을 위해 슬립 온 슬리브 절연재로 사용되는 실리콘 고무와 반도전 전극재로 사용되는 반도전 실리콘 고무를 시편 상으로 제작하여 팽윤되는 정도와 반도전 전극재의 체적 저항을 변화를 살펴보았다.

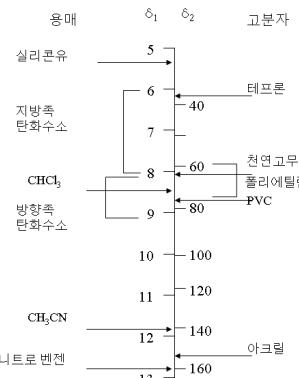
#### 2. 본 론

##### 2.1 절연유 중에서 Polymer의 팽윤 현상

플라스틱, 고무, 열경화성 수지 등과 같은 폴리머 재료들은 고전압 용융 분야에 주된 절연재료로 사용되고 있으며, 이와 같은 재료들에 발생할 수 있는 물리적 화학적 반응에 대한 이해는 케이블과 케이블 접속재들의 장기 성능을 예측하기 위한 기본적인 사항이라 할 수 있다.

절연유는 접속점 내부의 절연 성능 유지를 위해 충진하며, XLPE 접속함은 주로 실리콘 오일을 사용하고 상용화된 OF 케이블용 접속함은 알킬벤젠 오일을 주로 사용한다. OF 절연유는 케이블의 특징 때문에 점도를 낮게 할 필요가 있으며, 현재 국내에서 사용되고 있는 OF용 절연유는 KS C 2301에 규정된 2종 1호 또는 이와 동등이상의 성능을 갖는 알킬벤젠계 합성유를 사용하도록 규정되어 있다. 이와 같은 절연유에 대해서 고분자 물질과의 내용제성 혹은 내유성을 언급할 때 팽윤현상 (swelling) 또는 용해성(solubility)을 가지고 설명한다. 비결정 영역에는 결정 영역에서는 존재하지 않는 분자체 간 사이에 자유공간(free volume)이 존재하고, 이 공간 속으로 용매나 오일이 침투해 들어가기가 용이하므로 팽윤이 일어나게 된다. 물론 모든 고분자들이 이런 자유공간을 가진다고 해서 모든 용매가 쉽게 침투해 들어가는 것은 아니다. 그보다 더 중요한 요인이 용해도 개념으로, 이는 고분자의 물리적 성질에

의존한다. 즉, 두 매체가 유사한 용해도 상수값( $\delta$ , solubility parameter)을 가질수록 쉽게 에너지 장벽을 극복하여 쉽게 용해되거나 팽윤되는 현상이 나타나게 된다. 이는 고분자와 용매(오일)간에 분자구조가 유사한 경우 팽윤이 잘 일어나고, 전혀 다른 분자구조로 이루어져 있을 경우 팽윤이 쉽게 일어나지 못한다고 할 수 있다.



<그림 1> 용매 대 고분자의 용해도 상수

실제 탄화수소(-CH<sub>2</sub>-)를 기본 분자골격으로 가지는 알킬벤젠계 OF 절연유의 경우, 기본 골격이 탄화수소를 기본으로 하고 무극성 고분자 사슬구조로 되어 있는 XLPE와 분자 구조적 유사성이 높고 또한 비슷한 용해도 상수를 가짐으로서 높은 팽윤현상을 나타낸다. 한 연구결과에서는 상용 폴리부텐(polybutene) 오일 중에서의 EPDM의 팽윤 현상을 시험하였는데, 팽윤에 따라서 부피변화가 크게 일어나지 않더라도 반도전 EPDM의 전기전도도는 크게 변할 수 있음을 제시하고 있다[1]. 이와 같은 고분자의 용해도나 팽윤 특성을 파악하는데 있어서 용해도 상수가 널리 쓰이고 있으나 열경화성 고분자의 경우 끊는점, 표면장력, 반데르발스 상수, 기화열, 압축인자 등의 상수가 알려져 있지 않아 용해도 상수를 측정하는 직접적인 방법은 없다. 간접적인 방법으로 일정온도에서 최대팽윤이 일어나는 용매의 인자와 경화된 고분자의 용해도 인자가 같아는 가정에서 출발하는 Gee의 방법, 그 외에 Boyer와 Spencer 방법, Brisow와 Watsons의 방법 등이 알려져 있다. 본 연구에서도 MI(Mass Impregnated)형 HVDC 케이블에 사용되는 광유 베이스의 절연 캡파운드에 대한 용해도 상수가 알려져 있지 않아 용해도 상수를 측정하기 보다는 직접 실리콘 고무를 함침하여 그 팽윤 특성을 살펴보자 하였다.

##### 2.2 HVDC용 종단 접속함

일반적으로 150kV 이하의 OF 케이블은 에폭시 벨마우스형이, 154kV XLPE 케이블은 스트레스콘형이 중단접속함으로 사용되고 있다. 벨마우스형은 케이블의 차폐층과 접속부 보강 절연부 차폐층간의 영역을 전기적으로 순조롭게 접속함은 물론 절연접속함의 전체길이를 축소시킬 수 있다.



<그림 2> HVDC 벨마우스형 종단접속함의 조립

현재 개발 중인 MI형 HVDC 케이블 단말에서도 그림 2와 같은 벨마우스형 종단 접속함이 사용되고 있지만, 절연유의 점도가 대단히 높아 유침지의 지원이나 애관으로의 절연유 유입이 상당히 어렵고 긴 작업시간을 요하고 있다. 따라서 실리콘 재질의 슬립 온 타입 슬리브 적용 가능성을 살펴보자, 절연유 중에서의 팽윤 특성을 시험하였다.

### 2.3 Experimental

팽윤 특성 시험을 위해 슬립 온 슬리브 절연재로 사용되는 실리콘 고무와 반도전 전극재로 사용되는 카본블랙이 함유된 반도전 실리콘 고무를  $10 \times 10 [\text{cm}^2]$  시편 상으로 제작하여 무게팽윤비와 반도전 전극재의 체적 저항 변화를 살펴보았다.

합침 절연유는 MI형 HVDC 케이블에 사용되는 광유베이스의 절연 컴파운드로, 상온에서 밀도가  $0.92 [\text{g}/\text{cm}^3]$ 이며, 점도가  $60 [\text{cSt}]$ 에서  $1200 [\text{cSt}]$ 로 대단히 높다.

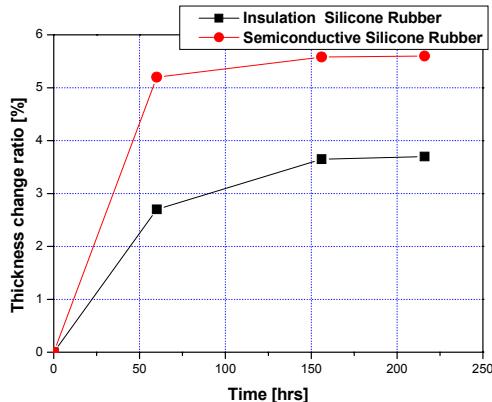
실험 이전에 건조된 시료 무게를 측정하기 위해 각 샘플들을  $100[\text{^\circ C}]$ 에서  $24[\text{hrs}]$  동안 진공 건조시켰다. 건조된 샘플들은 무게와 두께를 측정한 후, 합침용 조에 넣고, 실제 단말 조립 시 가장 가혹한 조건이라고 할 수 있는  $120^\circ \text{C}$ 로 합침하여 시험하였다...무게팽윤비 (weight swelling ratio)는  $(W_s - W_p)/W_p$ 로 정의하였으며, 여기서  $W_s$ 는 팽윤된 시료의 전체 무게이고  $W_p$ 는 건조 상태에서의 시료 무게를 나타낸다.

팽윤 전 후의 체적 저항의 측정은 상온에서 ASTM D 991에 따라 휴스톤브릿지 측정법으로 측정하였다. 측정된 값은 각 시료들을 측정하여 이를 평균한 값을 사용하였다. 여기서 휴스톤브릿지를 사용하여 측정할 수 있는 범위에 한계가 있으므로, 합침 후 저항이 높은 샘플들은 ASTM D 257에 따라 메가오옴미터(megaohmmeter)를 사용하여 측정하였다. 메가오옴미터의 단자는 저항 셀의 전극 중앙에 연결하여 1000V 인가전압 범위에서 측정한 후 평균하여 나타내었다.

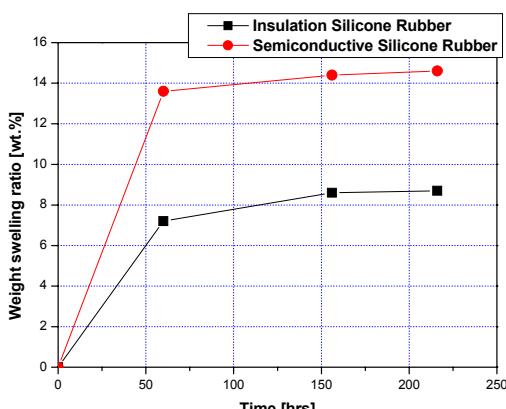
### 2.3. 실험 결과 및 고찰

#### 2.3.1 팽윤에 따른 두께 변화와 무게 팽윤비

합침 시간에 따른 시료 두께의 변화 및 무게 팽윤비 변화를 각각 그림 3, 4에 나타내었다. 합침 전과 비교하여 볼 때 반도전 실리콘 고무가 절연 실리콘에 비해 두께 변화 및 무게 팽윤비 변화가 크게 나타났다.



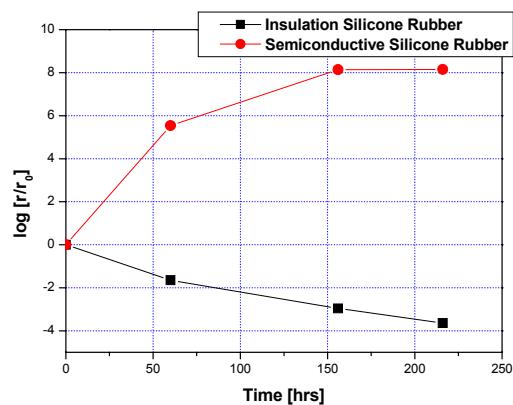
<그림 3> 합침 시간에 따른 시료의 두께 변화



<그림 4> 합침 시간에 따른 시료의 무게팽윤비 변화

### 2.3.2 체적 저항의 변화

그림 5에 합침 시간에 따른 시료의 체적 저항을 변화를 나타내었다. 여기서  $\rho_0$ ,  $\rho$ 는 각각 합침 전 후의 시료의 저항율을 나타낸다. 그림 5에서 보는 바와 같이 반도전 실리콘 고무의 도전성은 팽윤량이 거의 포화될 때까지 8 order 정도 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 카본블랙-폴리머 조성의 도전성에 대해서는 삼투(percolation), 양자 터널링(quantum tunneling), 열적 체적 증가(thermal volume expansion)으로 설명되어 왔다[2]. 본 실험에서 팽윤에 의한 반도전 실리콘 고무의 체적 저항 증가는 카본블랙-실리콘 사이의 자유 공간에 절연 오일이 침투함으로써 체적 증가를 유발하여, 카본블랙의 열적 체적 증가를 억제하고 터널링 효과를 저감시키도록 도전성을 저감시키는 결과로 생각된다. 이와 같은 팽윤에 따른 도전성 저감에 대한 보다 명확한 이론적 해석을 위해서는 팽윤 전 후의 반도전성 폴리머 내부 카본 블랙의 격자 구조나 카본 블랙 함량에 따른 카본 블랙간 전자 터널링 거리, 유효 터널링 포텐셜(effective tunnelling potential [eV]) 등에 대한 고찰이 추가로 필요할 것으로 생각된다. 반면 절연 실리콘 고무의 저항율은 4 order 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이것은  $120^\circ \text{C}$ 로 합친 시편이 상온으로 냉각하는 과정에서 실리콘 내부로 침투했던 절연유가 빠져나오면서 저분자 실리콘도 같이 용출되면서 생긴 결과로 추정된다.



<그림 5> 합침 시간에 따른 체적 저항 변화

### 3. 결 론

본 연구에서는 MI형 HVDC 케이블의 광유 베이스 절연컴파운드 반도전 실리콘 고무와 절연 실리콘 고무를 합침하여 시편상 팽윤 특성 및 저항율 변화를 살펴보았다.

- 1) 합침 후 반도전 실리콘 고무 시료의 무게변화는 14.6%, 절연 실리콘 고무 시료는 8.7%로서, 반도전 실리콘 고무의 무게팽윤비 변화가 절연 실리콘 고무에 비해 더 크게 나타났다.
- 2) 합침 후 반도전 실리콘 고무 시료의 체적 저항율 변화는 약 8 order 정도 증가하였으며, 절연 실리콘 고무 시료는 4 order 정도 감소하였다.

이러한 반도전 재료의 팽윤에 의한 체적저항 증가는 케이블 접속함의 기능에 있어서 전계 완화를 위해 설계된 전극 슬리브로서의 역할에 심각한 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 절연 실리콘 고무의 경우도 장시간 합침되어 있을 경우 절연 성능의 저하가 예상된다.

### [참 고 문 현]

- [1] R. Garcia-Ramirez and S. Sundhararajan, "The Effect of Cable Oil Diffusion on the Electrical Conductivity of EPDM Compounds", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, pp. 463~467, October 20~23, 1996
- [2] R.D. Sherman, L.M. Middleman, and S.M. Jacobs, Polym. Eng. Sci., 23, pp. 36 (1983).
- [3] Abe, K., maeda, T., Shimonaka, T., Umemura, T., "A swelling characteristics of PET in oil", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1992. Annual Report., Conference on, pp. 753~758, Oct. 1992
- [4] T. Tanaka, "Characteristics of composite insulation ; liquid -impregnated insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation Vol. EI-21 No 6, pp. 881~888 Dec 1986