

## 절연유에 의한 Silicone Rubber의 특성 변화 분석

김화중, 김현주, **이춘미**, 한지훈  
대한전선(주)

### The Analysis of Characteristics of Silicone Rubber in Insulating Oil

H.J.Kim, H.J.Kim, C.M.Lee, J.H.Han  
TAIHAN Electric Wire Co.,Ltd

**Abstract** - A description is given of impregnated silicone rubber used in accessories for application on outdoor termination (EB-A). We examines the effects of swelling and mechanical/electrical characteristics for impregnated silicone rubber to develop slip on type sleeve of silicone material. There are semi-conductive silicone rubber and insulation silicone rubber. This examination is monitored as a function of the viscosity and temperature of oil during 30hr. We measure elongation at breakdown and AC breakdown strength and volume resistivities of the oil-impregnated silicone rubbers. The measured values are compared to initial value as function of stress relief cone.

#### 1. 서 론

전력계통의 송전선로에 초고압 지중케이블의 적용이 확대됨과 동시에 적용되는 케이블 및 케이블 부속재의 낮은 단가 및 조립공정의 간소화가 요구되고 있다. 기중중단접속함에 전계완화 목적으로 기존에 적용되고 있는 Epoxy, EPR등의 절연 재료등이 원가절감 및 조립공정의 간소화라는 추세에 맞추어 Silicone Rubber재료로 변화되고 있는 것이 업계의 현실이다. 초고압 XLPE 케이블용 기중중단접속함의 절연 재료의 변화에 따라 충전 절연유 내에서 주요 전기적 스트레스 완화 장치인 Silicone Rubber 재질의 Stress Relief Cone의 팽윤 특성에 대한 검증은 해당 부속재의 전기적 신뢰성을 판단하는데 중요한 요인으로 작용한다.

본 연구에서는 Silicone Rubber 재질의 Stress Relief Cone을 적용한 초고압 XLPE 케이블용 기중중단접속함에 사용 가능한 충전 절연유를 판단하기 위해 절연유 내에서 Silicone Rubber의 팽윤 특성을 시험하였다. 팽윤특성 시험을 위해 절연 및 반도체 Silicone Rubber의 시편을 각각 제작하여 절연유 내부에서 팽윤되는 정도와 그에 따른 기계적 및 전기적 특성 변화를 확인하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 절연유 중에서 고분자의 팽윤 현상

전기절연물로 열경화성 고분자는 고전압 분야에 많이 응용되고 있으며 많은 발전을 가져왔다. 이와 같은 고분자들은 접속함 내부의 절연 성능을 유지하기 위하여 충전되는 절연유에 함침이 된다.

XLPE 접속함은 주로 실리콘 오일을 사용하고 상용화된 OF Cable용 접속함은 알킬벤젠 오일을 주로 사용한다. 이런 절연유와 함께 사용되는 고분자물질의 경우 내유성을 고려하게 되는데 이는 고분자물질 내에 절연유가 침투할 수 있기 때문이다. 고분자 절연물에는 결정영역과 비결정영역이 존재하며 비결정영역에서는 Chain이 일정하게 배열되어 있지 않아 자유공간(Free Volume)이 존재한다. 이 공간에 절연유가 침투하기 용이하고 이로 인해 팽윤현상이 일어난다. 절연유들과 고분자들은 그들의 화학구조에서 유사하다. 따라서 실질적으로 적용될 때 고분자의 팽윤이 예상되어지며 Slip on Type Sleeve의 적용에 있어서 절연유에 의한 고분자의 특성변화 시험이 기초화 되어져야 할 것이다.

Polymer의 팽윤은 함침 시간과 온도, 절연유의 점도에 영향을 받는다. 따라서 3가지 변수를 고려하여 팽윤특성 및 절연과 반도체의 특성변화를 확인하였다.

##### 2.2 실험 방법

절연과 반도체 Silicone Rubber를 170℃에서 10min동안 가압하여 100mm\*100mm 시편으로 제작하였다. 함침 절연유는 케이블 접속함에 사용되는 광유계 오일로 25℃에서 50cts와 5700cts점도의 두 재료를 사용하였다. 초기 시료의 무게를 측정하고 함침용 수조에 넣고 함침온도를

50℃, 90℃, 120℃하에서 30시간동안 함침하여 실험하였다. 팽윤 전후의 무게 차이로 팽윤비를 측정하였다.

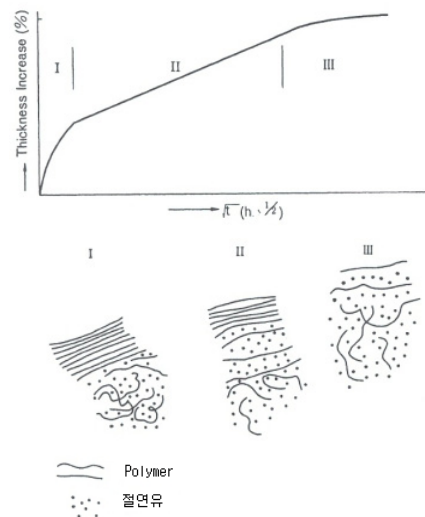
팽윤 전후 반도체의 체적저항은 상온에서 ASTM D991에 따라 휘스톤 브릿지를 이용하여 측정하였다. AC 절연파괴강도는 상온에서 ASTM D149에 따라 시험하였다. 반도체 및 절연재료의 기계적 특성시험은 KS M6518의 기준에 따라 신률과 인장강도를 측정하였다.

#### 2.3 실험 결과 및 고찰

##### 2.3.1 절연유에 의한 팽윤 현상

팽윤과정은 그림 1에서 보여주는 것과 같이 분석할 수 있다 3가지 단계가 있는데 빠르게 증가하는 영역과 느리게 증가하는 영역 그리고 침윤되는 영역으로 나누어진다.

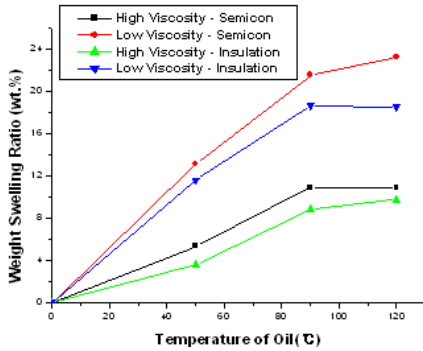
첫 번째 단계로 고분자(Polymer)의 비결정영역에 절연유가 침투된다. 두 번째 단계로 결정을 이루고 있는 부분을 변화시키고 절연유가 채워지게 된다. 세 번째 단계로 정해진 온도 조건에서 더 이상 팽윤될 수 있는 영역이 존재하지 않게 되며 단지 매우 느리게 절연유가 채워져 침윤상태가 된다. 첫 번째 단계에서 두께의 변화는 적다. 비결정 영역에 절연유가 채워지기 때문에 두께증가보다는 무게의 증가가 많을 것이다. 두 번째 단계로 결정영역이 변화되면서 비결정영역이 증가하게 되어 두께의 증가가 일어난다.



〈그림 1〉 절연유에 의한 고분자의 팽윤 단계

이는 시간의 제곱근에 비례하여 증가하며 두께 증가 및 무게 증가 모두 거의 비례적으로 일어난다. 세 번째 단계에서는 침윤된 상태로 보이는데 온도에 의존해서 어떤 결정영역이 팽윤되지 않은 상태로 남아있을 수 있으나 오랜 시간이 지난 후에는 결국 모든 영역이 팽윤될 것이다.[1]

그림 2의 시험결과에서 볼 수 있듯이 고분자의 팽윤은 함침 온도, 절연유의 점도에 큰 영향을 받으며 함침시간에도 영향을 받는다. 높은 온도에서 함침하는 경우 고분자 Chain의 자유도(The degree of freedom)가 증가하여 분자구조가 엉성해지면서 절연유의 침투가 용이하게 된다. 절연유 또한 높은 온도에서 Chain의 유동성이 증가하여 Silicone Rubber로 쉽게 침투하게 된다.

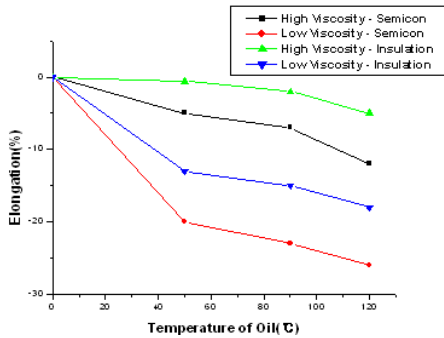


〈그림 2〉 절연유의 온도에 따른 팽윤변화

저점도 절연유 120°C 조건하에서 반도체 Silicone Rubber시료는 23%, 절연 Silicone Rubber시료는 19%로 반도체 Silicone Rubber시료가 비교적 더 큰 팽윤율을 보였다

### 2.3.2 팽윤현상에 의한 기계적 특성 변화

그림 3에 합침 절연유의 온도에 따른 절연과 반도체 Silicone Rubber 시료의 신율 변화를 나타내었다.

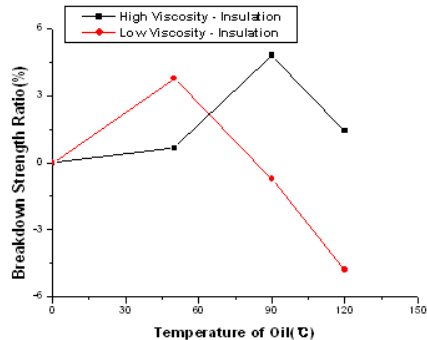


〈그림 3〉 절연유의 온도에 따른 신율특성 변화

절연과 반도체 Silicone Rubber시료 둘 다 신율의 감소를 보였다. 이는 절연유가 고분자의 결정영역에 침투하여 결정성을 파괴함으로써 분자의 구조가 엉성해지면서 신율 및 강도가 저하된 것으로 추정된다. 큰 팽윤율을 보인 반도체의 신율이 크게 감소했으며 낮은 점도의 절연유에 합침된 Silicone Rubber시료의 신율이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

### 2.3.3 팽윤현상에 의한 전기적 특성 변화

그림 5에 합침 절연유의 온도에 따른 절연 Silicone Rubber시료의 AC 절연파괴 강도를 나타내고 있다.

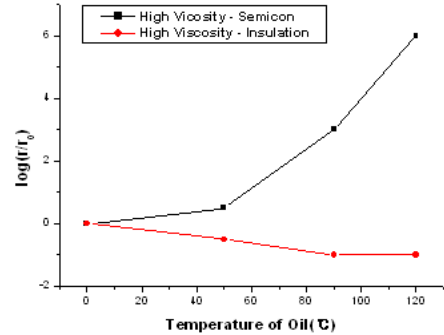


〈그림 4〉 절연유의 온도에 따른 AC파괴강도 변화

초기에는 AC절연파괴강도가 증가하는 추세를 보이다가 다시 감소되는 현상을 보이고 있다. 저점도절연유의 경우 90°C에서부터 감소를 보이고 있으며 고점도 절연유의 경우 120°C에서도 초기값보다 높은 강도를 보이고 있다. 팽윤에 의해 절연 Silicone Rubber시료가 영향을 받는 것을 볼 수 있다.[2] 팽윤 초기에 AC파괴 강도가 증가하는 것은 아마도 미세한 기공이나 Silicone Rubber 내의 자유공간에 절연유가 채워지면서 나타나는 현상일 것이다. 이 시기가 지나고 나면 절연유가 Silicone

Rubber의 결정영역을 침투하면서 결정영역을 감소시키기 때문에 AC 파괴강도가 감소할 것이다.

그림 5에 고점도 절연유의 온도에 따른 절연 및 반도체 시료의 체적 저항을 변화를 나타내었다. 결과에서 보는바와 같이 절연 Silicone Rubber의 절연성이 1 order정도 감소하는 반면 반도체 Silicone Rubber의 도전성은 6 order정도 까지 지속적으로 감소함을 알 수 있다.



〈그림 5〉 절연유의 온도에 따른 체적 저항 변화

Carbon Black이 함유된 고분자의 도전성에 있어서 삼투(Percolation), 양자 터널링(Quantum tunneling), 열적 체적 증가(Thermal Volume Expansion)로 설명되어 진다.[3] 팽윤 후 반도체 Silicone Rubber시료의 도전성 저감은 Silicone Rubber내부에 절연유가 침투되면서 Carbon Black간의 간격이 넓어짐으로 인하여 체적증가를 유발하고 Carbon Black의 열적 체적증가를 억제하고 터널링 효과를 감소시킴으로 인한 결과로 여겨진다. 합침된 절연 Silicone Rubber시료의 경우 체적 저항율이 1 order정도 감소하는 현상을 보인다. 절연 Silicone Rubber의 초기 체적저항  $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ , 절연유의 체적저항  $10^{15}\Omega\cdot\text{cm}$ 로 절연유가 Silicone Rubber에 유입되면서 체적저항이 낮아지는 것으로 추정된다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 Silicone Rubber 재질의 Stress Relief Cone을 적용한 초고압 XLPE 케이블용 기중중단접속함에 사용 가능한 충전 절연유를 판단하기 위해 절연유 내에서 Silicone Rubber의 팽윤현상을 파악하고 그에 따른 기계적 특성 및 전기적 특성 변화를 분석하였다.

팽윤현상은 절연유의 합침 온도가 높을수록 점도가 낮을수록 팽윤율이 높았다. 저점도 절연유 120°C 조건하에서 반도체 Silicone Rubber시료는 23%, 절연 Silicone Rubber시료는 19%로 반도체 Silicone Rubber시료가 더 큰 팽윤율을 보였다

합침 후 절연과 반도체 시료 모두 신율이 감소하였다. 저점도 절연유 120°C 조건하에서 반도체 Silicone Rubber시료는 25%, 절연 Silicone Rubber시료는 18%로 반도체 Silicone Rubber시료가 더 큰 감소를 보였다

팽윤된 절연 Silicone Rubber시료의 AC 파괴강도가 초기에는 다소 증가했다가 다시 감소하는 현상을 보였다. 체적저항은 합침 후 절연 Silicone Rubber시료의 절연성이 1 order정도 감소하였으며 반도체 Silicone Rubber시료의 도전성은 6 order정도 까지 지속적으로 감소하였다.

절연유에 합침된 Silicone Rubber의 중요한 두 가지 문제점은 팽윤현상과 특성변화이다. 팽윤특성은 고분자재료에서 우려되어져 왔던 사항이다. 합침된 절연재료의 장기적 신뢰성을 보장할 수 있는 절연재료에 맞는 절연유를 적절히 선정하고 팽윤현상에 주요 인자 중 하나인 점도를 고려하여 선정해야 될 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] T. Tanaka, "Characteristics of composite insulation ; liquid - impregnated insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation Vol. EI-21 No 6, pp.881~888 Dec 1986
- [2] Y. Nitta and T. Tanaka, "Swelling of Biaxially Oriented Polypropylene Film and its Effect on Breakdown strength", CRIEPI Tech. Rept. No. 280074, pp. 1-23, 1981
- [3] R.D. Sherman, L.M. Middleman, and S.M. Jacobs, Polym. Eng. Sei., 23, pp.36 (1983)