

초고압 전력기기에서의 실리콘 고무 응용

Applications of the Silicone Rubber in EHV Electric Appliances

김영호*, 지응서, 박현득, 허근도
LG전선(주) 전력연구소

Young-Ho Kim*, Eung-Seo Ji, Hyun-Duck Park, Gun-Do Huh
LG Cable Ltd.

ABSTRACT

In general, the main dielectric materials for EHV electric appliances were epoxy, EPDM and Silicone rubber. The Silicone rubber has been used so many among them in EHV appliances in the worldwide, especially in Europe and North America. The reason why it is very stable in the thermal, mechanical and electrical environment. Therefore, it is still becoming increasingly widespread in the application of the EHV appliances as a main dielectric material. On this study, investigated about real appliances and tested on basic properties of the Silicone rubber compared to organic dielectric material that is EPDM. At the result, the Silicone rubber is more dominant as main dielectric material for EHV appliances than any other organic polymers.

1. 서론

초고압 전력기기는 다양한 절연부품으로 구성되어 있다. 이들 절연부품들에 사용되는 주 절연재료로는 에폭시, EPDM, 실리콘 고무 등이 주로 사용되어지고 있다. 일반적으로 전력기기 절연부품의 주 절연재료로 사용되는 재료들은 절연과파전압이 높아야 함은 물론이고, 유전특성, 내아크성, 내열성, 내수성, 내후성, 내유성 등이 요구되어 지고 있다. 이러한 특성들은 전력기기의 종류와 역할 등에 따라 조금씩 다르게 요구되는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 송배전 가공선에 많이 사용되는 고분자 애자와 초고압 지중 케이블에 있어서 중간 접속함 및 종단 접속함 등에 절연연부품의 재료로 주로 사용되는 실리콘 고무에 관한 특성들에 대해 살펴 보았다. 물론, 앞에서 언급된 모든 경우에 전력기기 기술자들 사이에서 EPDM 고무도 동시에 추천되고 있다. 그러나, 기본적으로 EPDM 고무는 주성분이 석유 유화분과 동일하고, 그 기본 골격이 탄소-탄소 혹은 탄소-수소 결합으로 구성되어지기

때문에 실리콘 고무에 비해 열적 특성이 떨어지고, 전력기기의 통전 중에 발생하는 열에 의해 유전특성의 변화가 심해 온도에 따르는 절연특성은 실리콘 고무에 비해 떨어지는 것으로 알려져 있다.

실리콘 고무는 구조적으로 기본 골격이 Si-O로 구성되어 있으며, 일반적인 유기 고분자 즉 PE, EPR, PP 등의 기본 골격인 C-C 골격 보다 30% 정도 결합 에너지가 높다. 이는 보통 지중 전력 케이블의 도체 허용온도를 훨씬 상회하는 180℃에서도 열적으로 견디며 또한, 저온에서도 뛰어난 성능을 유지하는데 약-50℃에서도 깨어짐이 없이 유연성(flexibility)을 유지한다. 이것은 전력기기에 사용되는 고무 부품들이 주로 고무 자체가 가진 탄성(Elasticity)을 이용하는 점을 감안 할 때 뛰어난 기계적 특성을 가지는 것을 의미한다. 전기적인 특성에 있어서도 20~120℃ 범위에서 AC electric Strength와 Lightning Impulse test에서 온도 의존성이 나타나지 않았다고 보고되고 있다¹⁾. 박막시료를 이용한 V-t시험에서도 실제로 산업적인 전력기기에 응용한 상황을 가정하여, 최악의 상황 추정

의해 수명지수(life exponent)는 약 40정도 되는 것으로 알려져 있다²⁾. 본 연구에서는 위와 같이 기계적, 열적, 전기적 특성이 뛰어난 실리콘 고무의 응용사례를 중심으로 고찰한 내용과 기본적인 특성 평가 등에 대해 언급하고자 한다.

2. 실리콘 고무의 응용 사례

송.배전 가공선 사이의 구조물을 지지하고, 전기적인 절연을 담당하는 애자와 변.발전소 등에서 흔히 볼 수 있는 옥외용 애관의 주절연재료에는 오랫동안 자기재(Porcelain)에 의해 주도되어 왔다. 그러나, 최근에는 북미와 유럽을 중심으로 전기적, 기계적 특성, 유지 및 보수의 편리성, 1차 전력사고로 인한 자기재 파편의 비상에 의한 2차 사고의 위험성 등이 고려되면서 실리콘 고무를 주절연재료로 하는 고분자 애자(Polymer Insulator)와 고분자 애관(Polymer Bushing) 등이 등장하게 되었다. 그림 2-1에 나타난 바와 같이 다양한 형태의 고분자 애자 및 애관에 있어서 실리콘 고무가 응용되고 있다.

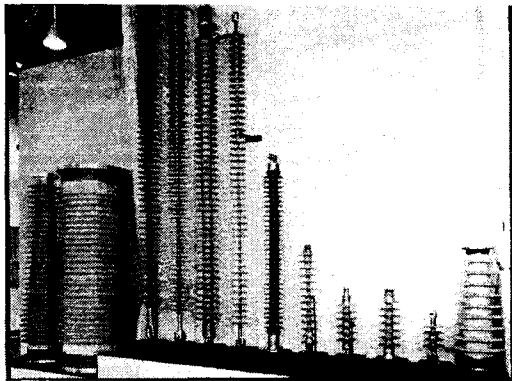


그림2-1 고분자 애자 및 애관³⁾

또 다른 형태의 응용에 있어서는 전력 케이블의 중간 접속함과 종단 접속함이다. 중간 접속함에 있어서는 PMJ(Premolded Joint)형 접속함에 주로 실리콘 고무가 응용되고 있다. Compression type 일명 Prefabricated Joint에서 스트레스 콘의 주절연재료로 사용되고 있으며, Slip-on type과 같은 고무 일체형 중간 접속함에서도 실리콘 고무가 응용되어 지고 있다. 특히 고무 일체형 접속함은 고무 자체가 가진 탄성을 이용하여, 전력 케이블과 접속함의 계면압(interface pressure)을 유지하여 연면파괴를 방

지하는 구조로 되어있다. 그림2-2는 전력 케이블 중간 접속함에서 실리콘 고무가 응용되는 사례이다.

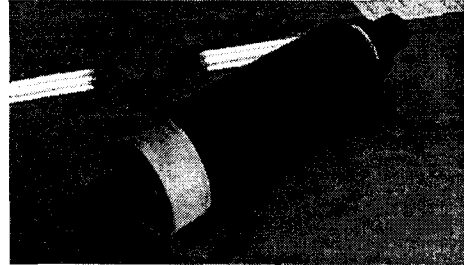


그림2-2 전력 케이블 중간 접속함

그 이외에도 배전급 전력 케이블의 종단과 GIS용 옥외 종단 절연물들에 이르기 까지 다양하게 응용되어 지고 있다. GIS용 옥외 종단 절연물과 같이 대형 고분자 절연물에서는 절연용 실리콘 고무의 대명사인 기존의 HTV(High Temperature Vulcanizing) type의 실리콘 고무로는 제조가 용이하지 못하기 때문에 LSR(Liquid Silicone Rubber) 혹은 RTV(Room Temperature Vulcanizing) type의 실리콘 고무가 응용되어 지고 있다.

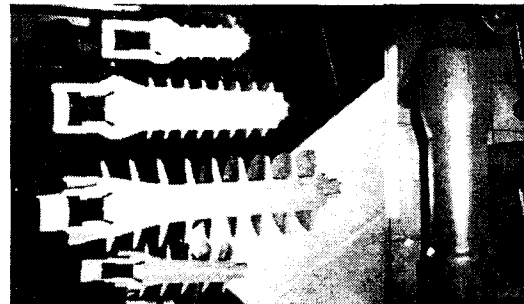


그림 2-3 전력 케이블 종단 Accessories

3. 실리콘 고무

3.1 개요

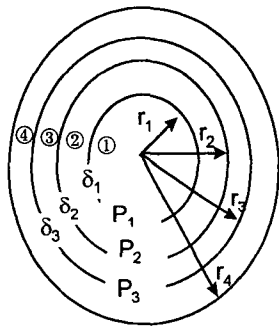
일반적인 천연고무나 합성고무들이 탄소-탄소의 기본골격을 가진 것과는 달리, 실리콘 고무는 규소-산소의 기본 골격을 가지고 있다. 따라서, 이를 구분하면 Organo-metallic 고분자이다. 규소-산소의 기본 골격은 유리, 수정(Quartz), 모래 등이 가지고 있는 기본 골격과 화학적으로 유사하다. 규소-산소의 기본 골격에 메틸, 비닐, 페닐, 플로오 기 등이 연결되어, MQ, VMQ, PMQ, PVMQ, FVMQ 등으로 나뉘어 진다. 실제로 이들 측쇄의 유기물들이 유

연성(Flexibility)을 부여하여 실리콘 고무가 고무의 특성을 가지게 된다⁴⁾.

또한 분자량(Molecular Weight)에 따라 Gum상 Liquid상, Paste상 등으로 구분되며, 가교되는 방식에 따라 HTV, RTV 실리콘 고무로 분류된다. 주로 Gum상의 HTV Type의 실리콘 고무는 분자량이 500,000-1,000,000 정도이며 Peroxide에 의한 가교반응으로 고상화 된다. 그러나, Liquid 혹은 Paste상의 RTV Type 실리콘 고무는 분자량이 10,000-100,000 정도이며 말단에 존재하는 Hydroxy Group이나 다이올에 의한 축합반응(Condensation Reaction)에 의해 가교가 이루어진다.

3.2 실리콘 고무를 기본적 물성

실리콘 고무가 사용되는 전력기에는 주로 계면압력을 유지하는 고무의 탄성이 중요한 역할을 수행하는데, 이를 이론적으로 살펴보면 다음과 같다.



- ① 케이블도체 ② 케이블절연체
- ③ 고무 Spacer ④ 고무절연관

그림 3-1 고무 슬리브의 계면압력 모델

그림3-1에서는 케이블 도체, 절연층, 고무 슬리브 등을 동심원으로 가정하면, 접속 경차 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 에 대한 각 계면압력 P_1, P_2, P_3 는 탄성이론에 의해 구해질 수 있다.

- 여기에서 r_1 ≙ 중심축①의 외반경과 원통관
 ②의 반경의 평균
 r_2 ≙ 원통관②의 외반경과 원통관
 ③의 내반경 평균
 r_3 ≙ 원통관③의 외반경과 원통관
 ④의 내반경 평균
 r_4 ≙ 원통관④의 외반경

E : 탄성정수

ν : Poisson's ratio

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \left| u_1, r=r_1 \right| + \left| u_2, r=r_1 \right| \\ \delta_2 &= \left| u_2, r=r_2 \right| + \left| u_3, r=r_2 \right| \\ \delta_3 &= \left| u_3, r=r_3 \right| + \left| u_4, r=r_3 \right| \end{aligned}$$

여기에서부터 계면압력 P를 구하면

$$P_3 = \frac{\frac{\delta_3}{r_3} + \frac{1}{E_3} \cdot \frac{2P_2 \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2}}{\frac{1}{E_3} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \nu_3 \right) + \frac{1}{E_4} \left(\frac{r_4^2 + r_3^2}{r_4^2 - r_3^2} + \nu_4 \right)} \quad (1)$$

$E_3 = E_4, \nu_3 = \nu_4$ 라 하면

$$P_3 = \frac{\frac{E_3}{r_3} \cdot \delta_3 + \frac{2P_2 \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2}}{\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{r_3^2 + r_4^2}{r_4^2 - r_3^2}} \dots \dots \dots (2)$$

결국 계면압력 P는 직경 공차에 비례하게 된다.

$$P = \frac{r_4^2 - r_3^2}{r_4^2 r_3} E \delta \dots \dots (3)$$

이것을 그림으로 나타내면 그림 3-2와 같이 된다.

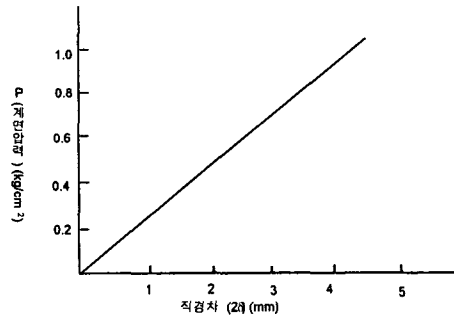


그림 계면압력과 결합공차 직경차와의 관계

그림 3-2 계면압력과 결합공차와의 관계

이와 같이 전력기의 고무 부품들은 자체의 탄성으로 계면압을 유지하게 되고, 열적 기계적 거동에 따라 변형이 없어야 안정적인 전력기의 수명을 보증할 수 있다. 이를 재료적인 측면에서 널리 쓰이고 있는 대체 시험법이 영구신장 늘임율이다. 이는 일정한 힘에서 측정되어지는 잔류 변형량이다. 일반적으로 덤벨 타입의 시편을 이용하여 소정의 시편을 약 10분간 연신하고, 10분간 방치한 다음 잔

류신장을 측정하여 원래 시편의 길이에 대한 비율을 산출한다.

$$\text{영구신장늘음율(\%)} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100$$

여기에서 l_1 : 시험후 표선간의 길이(mm)
 l_0 : 시험전 표선간의 길이(mm)

위의 식에서도 알 수 있듯이 영구 신장늘음율이라는 것은 고무재료가 신장상태에서 얼마나 응력이 완화되지 않고 견디느냐를 나타내게 된다. 이 원리를 이용하여 전력기기들이 통전 중에 놓이는 환경조건을 모의한 시험을 실시하였다. 실리콘 고무가 120°C에서 시간이 지남에 따라 응력이 완화되는 현상에 차이가 있는지에 대해 실험했다. 그 차이의 기준으로 삼기 위해 일반적인 유기고분자 이면서 전력기기 고무 부품에 흔히 사용되는 EPDM을 동시에 시험하였다. 이 시험에서 실리콘 고무가 EPDM에 비해 뛰어난 특성을 나타내었다. 그 결과를 그림 3-3에 나타내었다.

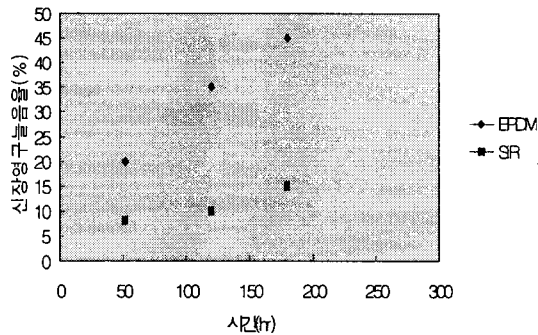


그림 3-3 실리콘 고무의 응력 완화 곡선

3.3 실리콘 고무의 열적 특성

일반적인 고분자 재료는 장기간 열을 받으면 열적 노화가 일어나는데 이는 전기적인 열화현상만큼이나 절연재료에서 중요한 인자이다. 이는 화학적인 분자구조에서 각 원소들이 결합하고 있는 결합에너지(bond energy)로 설명할 수 있다. 이는 역으로 말하면 그 단분자를 해리 시키기 위해서는 그 결합에너지 이상의 에너지가 가해져야 분자의 해리 즉 고분자에 있어서 사슬절단(Chain cession)이 일어나고, 이것이 진전하여 절연재료에 미세 크랙 현상이 나타나게 되는 것이다. 이와 같은 현상이 초고

압 절연재료에서 나타날 경우 전기적인 열화현상과 상승작용을 일으켜 치명적인 손상을 입히게 되는 것이다.

IEEE Std 101에서는 절연재료의 열적 가속 열화로부터 데이터를 분석하는 기법을 기술하고 있는데, 절연재료의 가속열화의 관계를 Arrhenious Model로 나타내고 있다. 이는 실제온도(전력케이블의 경우 90°C)에서 절연재료가 열적 노화에 의해 노화하는 경우를 추정하는 기법으로, 절연재료 시료를 실 사용 온도 보다도 훨씬 높은 온도, 예를 들어 120, 130, 150°C에서 노화시간을 측정하여, 이것으로부터 실 사용 온도에서의 노화수명을 예측하는 기법이다.

$$t_a = \text{EXP}\left(\frac{\Delta E}{R T_a} + C\right)$$

t_a : 노화수명 C : 상수
 ΔE : 활성화 에너지
R : 기체상수
 T_a : 실 사용 온도(90°C)
 T_1, T_2, T_3 : 시험온도

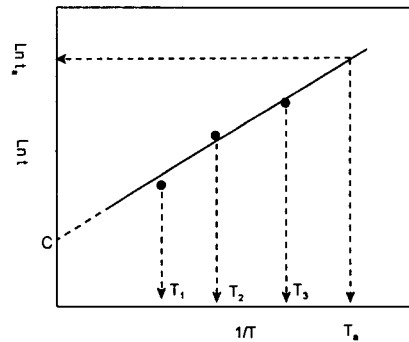


그림 3-4 Arrhenious Plot(열노화 수명예측)

이와 같이 열적인 가속열화로부터 절연재료의 열적 노화 특성을 예측할 수 있다. 실제로 실리콘 고무와 EPDM을 200°C 오븐에서 가속열화 하여 그 특성을 살펴보면 그림 3-5와 같다.

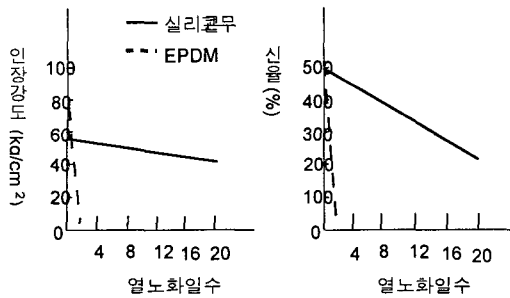


그림 3-5 실리콘 고무의 열노화 특성

3.4 실리콘 고무의 전기적 특성

실리콘 고무의 전기적 절연 특성은 특히 온도에 대한 의존성이 극히 적다는 장점이 있다. 이는 일반적인 유기 고분자들이 온도가 올라감에 따라 분자의 Mobility가 쉽게 증가하고, 이로 인한 극성(Polarity)의 반전이 일어나, 유전율, Tan δ 값 등이 증가하는 결과를 초래 하는데 비해, 실리콘 고무는 보다 안정적인 값을 가진다. 그림 3-6은 0.5mm의 박막에 전극을 매입한 구조로 AC 파괴시험을 한 결과를 나타낸 것이다.

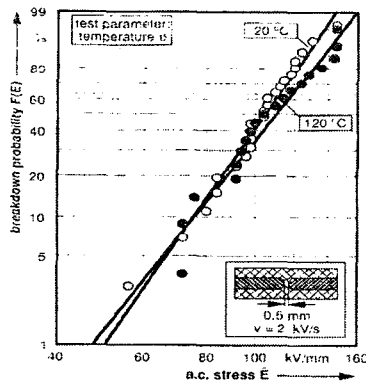


그림 3-6 실리콘 고무의 온도에 따른 Weibull 특성

4. 결과 및 고찰

초고압 전력기기에 있어서 실리콘 고무를 이용한 고무절연 부품은 다양한 형태로 존재하였다. 북미와 유럽을 중심으로 한 초고압 전력기기에 실리콘 고무의 절연응용은 시사하는 바가 크다고 할 수 있다. 실리콘 고무를 이용한 기본적인 평가시험에서 실리콘 고무는 다른 유기 고분자에 비해 뛰어난 열적,

기계적, 전기적 특성을 나타냄으로써 향후 초고압 전력기기의 절연부품으로 그 이용이 확대 되리라 전망된다. 이들의 이용 분야는 주로 초고압 지중 전력 케이블 Accessories, Termination, End-Seal, 가공선의 Polymer Insulator, GIS 와 Transformer의 Termination 등에 주로 사용되어 질 것으로 기대되어 지며, 그 용도가 확대 되리라 기대된다.

5. 참고 문헌

- [1] Schmit, B.-D., " Electrical strength of silicone elastomers to HV power supplies in aircraft system", 6th International Sympos. on High Volt. Engineering, USA, 1989, Paper13.26.
- [2] J. Oesterheld, R. Von Olshausen., " Optimized Design of Accessories for 245kV and 420KV XLPE Cables", Cigre Session Papers, 1992, WG 21-202.
- [3] Insulator News & Market Report, Volume 4, May/June 1996, p.30-31
- [4] Joseph C. Caprino., "Silicone Elastomers", Rubber Handbook. Edited by Robert F. Ohm, Thirteenth Edition, 1990, p. 195-210.