

송배전용 COMPOSITE INSULATOR의 SHED 재질로서 실리콘 고무

강 동 필

한국전기연구소 절연재료연구팀

Silicone Rubber as the Shed Material of Composite Insulator for Electric Power Distribution and Transmission

D.P. Kang

KERI, Insulation Materials Team

Abstract

Recently composite insulators have been in the spotlight because they have many good characteristics as a outdoor insulator for high voltage.

The long term properties in composite insulator depend on shed materials. Silicone rubber out of some candidates of shed material has been obtaining good credit from the long term test in field.

이 있으며 최종 제품의 취성도 크다.

porcelain 절연물 표면이 오손된 상태에서 물이 적절하게 기여하게 되면 누설전류가 증가하고 부분방전이 일어난다. 이것으로 인하여 열의 발생이 반복되면 굽구, 시멘트, 애자의 접합부 소재들간의 팽창계수 차이가 커서 계면탈리, 전계집중, 방전으로 열발생, 절연열화, 관통사고 등으로 진행이 되는데 특히 염해가 심한 지역에서 많은 문제가 발생되고 있다.

II. COMPOSITE INSULATOR의 장점

소재 및 가공 기술이 근본적으로 porcelain과 다른 composite insulator는 중심부에 고강도 FRP rod, 그것의 표면에 내충격성이 좋은 강판 고무 재질, 양쪽 끝에는 타구조물과의 부착을 위해 metal joint (end fitting)로 이루어져 있는데 아래와 같은 많은 장점을 가지고 있다.

I. 옥외절연물의 절연성능

옥외 절연물은 10년에서 50년 정도로 사용 기간이 길고 기계적, 전기적 stress를 항상 받고 있을 뿐만 아니라 사용 환경(도심, 공업지역, 해안 등)에 따라 오염 물질의 종류와 오염 정도에 차이는 있지만 오염 물질에 노출되는 것을 피할 수는 없다.

절연물의 절연 성능에 영향을 주는 인자로는 절연물의 형상, 오손 정도, 오손 물질의 종류, 절연물의 표면재질, 표면에서 오손액(물)의 유동성, 물의 형상 등이 있다. 사용중에 절연물의 절연내력이 규정치 이하로 떨어져 발생하는 사고를 방지하려면 기본적으로 충분한 누설거리가 필요하다. 그렇지만 오손 물질의 종류와 오손 정도 그리고 물의 기여 양상에 따라 사용중인 절연물의 절연내력이 크게 떨어지기 때문에 절연물의 설계와 전체적인 크기의 결정이 쉬운 일이 아니며 실제통에서 이와 관련된 절연물의 사고는 계속되어 오고 있다.

porcelain은 소재가 저렴하고 옥외 화학적 안정성이 좋으며 내열성과 내야크성이 우수하여 실제 절연물의 주종을 이루어 왔다. 그러나 porcelain의 경우 기계적 강도를 만족하면서 일체형의 큰 절연물 제작이 어려워 bell형의 porcelain unit를 금속봉과 시멘트 접착재로 연결하여 현수애자로 사용하고 있다. 소재 자체의 충격강도가 약하고 소결시 부피 감소가 커서 재질의 두께 변화 폭이 큰 절연물 제작에 어려움

1. 우수한 기계적 강도 : 인장강도는 자기체의 2배, 충격강도는 5배 정도

2. 경량 : 자기질의 15% 내외이므로 생산, 보관, 운반, 설치 등이 용이함. 선진국이 될 수록 경과지가 산악 및 해안 지역이 되며 인건비가 높으므로 철탑 하나에 수 ton의 절연물이 설치되는 것을 감안하면 매우 큰 장점이 되며 충격강도가 우수한 것은 운반 및 설치시 더욱 유리한 인자가 된다.

3. 우수한 내오손 특성 : 유기 물질은 무기 물질에 비해 surface energy가 낮은데 이 경우 표면에 물이 존재하면 퍼지지 않고 방울로 뭉쳐 쉽게 굴러 떨어지며 오손상태에서 표면 누설전류값을 낮게 유지시켜 준다. 태풍이 잦고 섬과 열대공단이 많은 우리나라에서 더욱 큰 효과를 기대할 수가 있다.

4. 대량 생산 및 긴급 제조 가능 : 고분자 가공용 기계가 크게 발전하여 생산성이 좋고 2일 정도이면 완제품이 제조 가능하며 생산시 에너지 소모가 적어 가격이 저렴하다.

5. 설계 가변성 우수 : 고강도 FRP rod와 내충격성이 좋은 고무를 사용하므로 얇고 가늘게 제작이 가능하며 또한 누

설거리 확대가 용이하여 특성이 우수한 절연물 제작이 가능하다.

III. COMPOSITE INSULATOR의 SHED 재질

옥외용 고분자 절연재료의 최대 단점은 내열성과 내후특성이 좋지 않은 것인데 일부 특정 고분자에 있어서 고분자의 합성 기술과 복합화 기술의 발달로 이들 단점이 거의 극복된 단계에 와 있다. 특히 shed용 고무 소재가 외부 환경에 직접 노출되므로 이 소재의 개발과 평가가 이 분야에 있어서 큰 이슈가 되어 왔다.¹¹⁾

shed용 고무 소재는 태양광, 각종 오손물질(사용 환경에 따라 물질 종류는 염분, 매연, 분진, 특수 화학물질 등으로 크게 다르며 이들 물질이 고분자 분해의 촉매 역할을 할 수가 있는가 하면 일정하게 오손이 되면 태양광을 차폐하는 역할도 한다), 물 등에 노출되어 있으며 전기적 스트레스가 증가해지고 있다. 전기적 스트레스는 사용전압, 형상설계 등에 영향을 받지만 광분해에 의한 표면 porosity 변화, 표면 오염물질의 종류와 누적상태, 물의 기여 형태 등에 따라 크게 변한다.

shed용 고무 소재의 경우 내후성과 내트래킹성이 가장 중요한 물성인데 EPDM(EPR)이나 silicone 고무가 대상 재료로 거론되고 평가되어 왔다. EPDM은 ethylene propylene diene monomer가 가교가 되면 EPDM 고무가 되는데 $-(CH_2-CH_2-CH_2-CHCH_3)-$ 가 사슬의 주요 구조이다. 이것은 포화 탄화수소로 된 구조이므로 광을 흡수하는 효율은 아주 낮지만 propylene의 $-CHCH_3-$ 부분은 내광성이 좋지 않다. 즉 주사슬의 탄소만을 볼때 $-CHCH_3-$ 의 탄소는 3차 탄소(탄소 주위에 3개의 탄소가 결합하고 있음)인데 3차 탄소는 ethylene 구조의 2차 탄소보다 radical로 분해가 아주 잘 일어난다. 보고에 의하면 실제로 polypropylene(PP)은 polyethylene(PE)보다 내광성이 좋지 않은 것으로 밝혀져 있다. PE는 케이블 피복재로 사용하고 있지만 PP는 옥외용으로 거의 사용되지 않고 있다. 그러므로 propylene unit를 포함하고 있는 EPDM이나 EPR이 옥외조건에서 완전하다고 할 수가 없으며 단지 자외선 차단제나, 자외선 흡수제, 산화안정제 등을 첨가하여 옥외절연물 용도로 사용하고 있다.

실리콘 고무는 주사슬이 $-(Si(CH_3)_2O)_n-$ 구조로 되어 있으며 Si-O 결합이나 Si-C 결합의 결합에너지가 커서 광이나 화학물질에 의한 분해가 쉽게 일어나지 않으며 무기결합이라 내열성도 아주 좋다. 옥외 절연물이 오손이 되면 표면에 부분 방전이 전혀 일어나지 않을 수는 없기 때문에 이 때 얼마나 소재의 열화가 수반되느냐에 따라 장기 수명은 달라질 수밖에 없다. 현재 밝혀진 어떤 고무 소재 보다 실리콘 고무는 표면에너지가 낮아 tracking이 잘 생기지도 않을 뿐만 아니라 tracking이 발생하여도 우수한 내열성으로 분해가 잘 일어나지 않는다. 만약 분해가 일어나도 유기 고무와는 달리 (EPDM은 절연성이 나쁜 형태로 탄화됨) 절연 무기분말인 SiO₂

가 남기 때문에 절연 특성 저하가 일어나지 않는 편이며 표면에너지가 낮기 때문에 장시간 사용하여 크게 오손되어도 절연이 잘 유지되는 독특한 특성이 있다. EPDM composite insulator가 5-10년 정도에서 점차 절연 성능 저하가 수반되는 반면 silicone은 그보다 훨씬 장시간 사용하여도 절연 성능저하가 일어나지 않고 있다.

IV. 실리콘 고무 절연물의 섬락 억제 mechanism

사용중인 절연물의 섬락사고에는 오손물과 물이 결정적인 기여를 한다. 절연물의 표면을 통하여 흐르는 누설전류는 오손물질의 종류, 양, 오손 정도에 따라 다르지만 오손이 심할 수록 누설전류값이 건조상태에서 보다는 젖어 있는 상태에서 훨씬 크므로 표면의 젖음성(wettability)이 매우 중요하다.

표면에서의 물은 표면의 재질에 따라서 필름형태로 퍼지기도 하고 drop형태로 뭉치기도 한다. 물의 표면에너지는 73 dyne/cm인데 porcelain 이나 glass재질의 표면에너지는 물보다 크고 유기 고분자의 표면에너지는 물보다 작다. 따라서 porcelain표면에 있는 물은 필름 형태로 퍼지고 고분자 표면에서 물은 drop형태로 뭉친다.

젖음성의 정도는 일반적으로 접촉각을 측정하여 나타낸다. 고분자 물질의 표면에너지는 대부분 물보다 낮아 그 표면에 있는 물은 drop 형태로 되어 접촉각이 90°보다 크지만 고분자 물질의 종류에 따라라도 표면에너지값이 다르며 따라서 접촉각도 다르다. 절연물과 관련된 재료들의 표면에너지를 표 1에 정리하였다. EPDM과 실리콘 고무의 표면에너지는 각각 34, 22 dyne/cm인데 물과의 차이가 큰 실리콘 고무의 접촉각이 더 크다. 즉 실리콘 고무의 발수성이 더 좋다고 말할 수 있다.

표 1. 절연물과 관련된 재료들의 surface energy

Materials	Surface Energy(dynes/cm)
H ₂ O	73
General polymers	30~60
Epoxy	34~46
EPDM	34
EP rubber	33
PE, PP	32
Teflon	23
유기 액체류	20~40
Silicone(PDMS)	20~23
Silicone fluid	17~19
기체류	0~10

사용중에 재질의 화학적 변화가 수반되는 상황에서 발수성이 어떻게 변할 것인가 하는 것은 절연물의 장기적인 신뢰

성과 직결된다고 할 수 있다. 순수 실리카로부터 많은 화학 반응을 거쳐 만들어지는 실리콘 고분자는 주사슬이 siloxane (-SiRR'₂O-)구조로 되어있는데 분자길이가 짧으면 fluid(oil)가 되고 아주 길면 고무원료의 gum이 된다. 실리콘 고분자는 SiO₂와는 전혀 다른 무극성 물질이며 분자 사슬이 유연하여 분자가 큰 gum도 유리전이 온도가 -70℃로 아주 낮은 상온에서 고무상을 갖는다. 따라서 분자간 인력이 작고 표면 에너지값이 낮으며 기계적 강도도 작은 특징을 가지고 있다. 실리콘 gum에 여러가지 무기 보강제를 첨가하고 과산화물 촉매에 의해 가교시키면 실리콘 고무가 된다. 실리콘 고분자 사슬은 석영, 모래, 유리 등을 이루고 있는 강한 실리콘-산소 결합으로 되어 있어서 오존, 코로나, 고온, 옥외 환경 등에 아주 잘 견딘다.

실리콘 고무의 발수성 연구는 장시간 필드 열화 및 단시간 강제 열화 조건하에서 광범위하게 연구되어 왔다. 주로 전기적 방전에 의해 약간의 재질 변화와 발수성 저하가 관찰되었지만 다른 고분자와는 달리 실리콘 고무 표면의 발수성은 장시간 열화 및 오손된 상태에서도 잘 유지되었다. 이와 같은 현상은 분자량이 작은 실리콘 고분자(oil, fluid, lubricant)가 재질 내부로부터 표면으로 이동하여 나와서(이것을 diffusion 또는 migration 이라고 하며 보다 표면에너지가 낮은 fluid가 표면에너지가 더 낮은 공기와 접하는 계면으로 이동하는 자발적 현상) 표면의 모든 물질을 embedding(wetting 또는 encapsulation)하므로 물에 직접 노출되는 표면의 물질은 실리콘 fluid(실리콘 고무보다 표면에너지가 더 낮음: 18 dyne/cm)가 되어 겹보기로 오손되어 있어도 발수성은 잘 유지된다. 즉 실리콘 고무 표면은 발수성의 동적 회복능력(dynamic recovery ability)이 우수하다고 말할 수 있다.²⁻⁴⁾ 실제로 필드에 설치해 두었던 시편을 수거하여 24, 48, 144시간 코로나 방전을 시킨 뒤 경과시간에 따른 접촉각 변화를 측정한 실험 결과에 의하면 9년 동안 옥외 사용한 시편의 접촉각은 128°의 높은 값을 보였으며 강한 강제 코로나 방전을 한 결과 방전시간에 따라 상당한 접촉각 감소가 관찰되었으나 자연 방치한 시간과 더불어 접촉각이 증가하여 수십시간 이후에는 거의 초기의 접촉각까지 회복하는 특성을 보였다.

옥외 고전압 절연물은 전기적 에너지가 가해진 상태에서 열화와 오손이 계속 진행중에 있으며 물이 비나 안개 등의 형태로 부정기적으로 표면을 적시는 환경에 놓여 있다. 오손물질이 수용성 염(NaCl, CaCl₂ 등)이나 바닷물에 직접 노출되는 환경이면 트래킹이 전혀 일어나지 않을 수는 없다. 이러한 상황에서 우수한 발수성을 보이고 저하된 발수성을 쉽게 회복하며 오손된 표면에서 수십년간 우수한 발수성을 유지한다는 것은 고분자 사슬이 유연하여(만약 EPDM에 fluid를 첨가해도 장시간에 걸친 표면으로의 이동은 생기지 않을 것임) 고분자이면서도 유동성을 가지며(실리콘 fluid의 분자량은 수백에서 수천정도) 상온은 물론 고온에서도 쉽게 휘발되지 않는 특성을 가지고 있기 때문이다. 즉 실리콘 고무가

절연재료로서의 우수한 특성을 잘 유지한다는 것은 실리콘 고무의 특이한 여러가지 물성이 절연물의 열악한 사용 환경에 대한 내성으로 잘 조화를 이루고 있기 때문이다.

V. 결론

1. Composite insulator는 많은 장점을 가지고 있으며 장기 신뢰성도 어느 정도 인정받고 있으므로 앞으로 실사용이 크게 증가할 것으로 예측된다.
2. Shed 소재의 경우 내후성과 내트래킹성이 가장 중요한 물성인데 실리콘 고무가 이들 특성에 있어서 믿을 만하다.
3. 오염 표면에 물이 존재하면 누설전류가 급격히 증가하는데 이 때 방전으로 발생된 열에 의해 표면의 화학결합이 열화된다. 실리콘 고무는 낮은 표면에너지 때문에 발수성이 좋아 같은 오손과 물의 조건에서도 누설전류값이 낮으므로 트래킹이 적게 일어난다.
4. 설령 트래킹이 수반되어 열이 발생되어도 실리콘 고무는 주사슬이 무기 결합으로 내열성이 우수하므로 유기계의 고무보다는 화학결합의 열화가 적게 일어난다.
5. 열화가 진행되어 화학결합의 분해가 수반된다하여도 생성된 부산물의 절연성이 우수한 SiO₂이므로 절연성능 저하에 크게 영향을 받지 않는다.
6. 사용중의 절연물 표면이 오염이 되든지 열화되어 SiO₂가 노출이 되어도 표면이 실리콘 lubricant에 의해 encapsulation된 상태로 존재하기 때문에 항상 우수한 발수성 표면(낮은 접촉각 표면)을 유지시켜 준다.
7. 만약에 부분방전이나 flashover로 표면이 hydrophilic하게 된다 하여도 곧 발수성 회복이 일어난다.
8. 이와 같은 발수성 회복의 동적 특성은 수십년간 유지되므로 실리콘 고무는 가장 우수한 shed재료로 인정되고 있다.

참고문헌

1. R. S. Gorur, "Surface Dielectric Behavior of Polymeric Insulation under HV Outdoor Conditions", IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. 26, 1064(1991)
2. A. E. Valstos and E. Sherif, "Experience from Insulators with RTV Silicon Rubber Sheds and Shed Coatings", IEEE, 89 WM 120-7 PWRD
3. R. S. Gorur, J. W. Chang and O. G. Amburgey "Surface Hydrophobicity of Polymers Used for Outdoor Insulation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, 1923(1990)
4. A. E. Valstos and S. M. Gubanski, "Surface Structural Changes of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, 888(1991)