

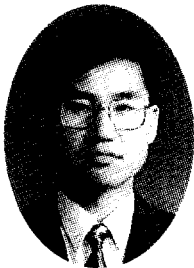
신소재 옥외 절연물의 장기성능과 표면발수성



강동필
한국전기연구소 절연피뢰기
기술연구팀 책임연구원



한동회
한국전기연구소
전기재료연구부 선임연구원



박효열
한국전기연구소
선임연구원

1. 서론

초고압 옥외절연물이 자기제 애자에서 composite insulator(CI, 고분자신소재 복합절연물)로 대체되고 있는 것은 세계적인 추세이며 저가·경량인 장점에 이어 장기신뢰성이 확인되면서 최근 현장 적용이 가속화되고 있다. CI의 성공적 출현은 FRP rod의 우수한 기계적 강도와 shed용 고무재료들의 장기절연성능에 기인하고 있는데 bushing을 포함한 거의 모든 옥외절연물이 고분자복합소재화되어 가고 있다.

pultrusion 공법으로 제작된 FRP rod는 인장강도가 우수하여 suspension CI의 내부 core재로 사용되어 왔지만, 최근 복합재료 제작설비기술의 발달로 압축이나 굴곡 강도가 우수한 rod의 제작이 가능하여 post type CI의 개발연구가 활발히 이루어지고 있다. 비록 CI의 우수한 장기성능이 명성을 얻어 가고는 있지만 사용자를 위한 제품별성능의 비교평가, 사용중인 절연물의 수명예측, 사고예지를 위한 진단 등의 필요성이 부각되고 있다. 다만 CI에 있어서 장기성능이 shed재료의 화학적열화와 관련된 문제이므로 명쾌한 결과를 얻기란 매우 어렵다.

본고에서는 장기성능과 직결되는 shed재료의 열화특성이 표면발수성과 어떻게 관련되는가를

조명함으로서 특성의 본질을 보다 정확히 이해하고 고분자절연물을 잘 선정하기만 하면 신뢰할 만한 제품이라는 인식전환의 계기가 되기를 기대한다.

2. 절연물에서의 표면방전과 재료열화

옥외 절연물은 요구수명이 길고 기계적·전기적 load가 항상 걸려 있어 열화에 의한 성능저하가 문제가 되고 있다. 절연물의 사용환경과 열화과정의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- ⊕ 성능저하는 장기간에 걸쳐 서서히 진행된다.
- ⊕ shed재료의 내후성은 장기성능에 중요한 인자인데 자외선에 의한 광분해내성은 소재종류에 크게 의존하므로 소재의 선정이 중요하다.
- ⊕ 강한 방전 환경(아크광과 방전열)에서는 어떤 유기재료도 완벽하지는 못하다.
- ⊕ 표면오염과 물(수분)에의 노출은 피할 수 없다.
- ⊕ 절연물 표면에서 물의 기여형태는 농무, 비, 결로(응결) 등으로 다양하다.
- ⊕ 표면 방전 발생유무는 오손 정도나 기후에 의존적이므로 시시각각 변한다.
- ⊕ 같은 환경조건에서 방전에너지의 크기와 열화진행 정도는 절연물 표면발수성에 기인한

물형상에 크게 의존적이다.

⊕ 표면재질의 미소한 변화에도 발수성은 크게 달라진다.

오손 물질이 표면에 축적된 상태에서 가랑비, 안개, 결노 등에 의해 습윤되면 오손물질 중에서 수용성인 것은 용해되므로 표면 누설 전류가 크게 증가하게 된다. 이런 상황이 되면 절연물 표면의 전계 분포가 일정치 않고 저항이 높은 부위의 열발생이 많으므로 그 부분의 수분이 빨리 증발하여 건조대가 형성된다. 건조대 양단에 전지기 어려운 큰 전압이 걸리게 되는 경우에는 아크방전과 더불어 많은 열과 단파장의 빛이 발생하게 된다. 더욱이 방전에너지인 열과 빛이 바로 재료의 표면에서 일어나기 때문에 표면 재질의 열화를 일으키기에 충분하다. 방전은 절연물의 표면에서 동시다발적으로 발생하는데 이러한 방전이 수없이 반복되어 재료의 열화로 인한 표면절연능력이 나빠져서 절연물 전체의 절연내력이 양극간의 전위차를 견디지 못하는 상황이 되면 섬락사고(flashover failure)로 이어진다.

건조대에 의한 방전과 아크 발생은 전계 강도, 절연물 형상, 오손 상태(오손 조건, 오손물질 종류) 등에 의존하지만 누설전류의 증가로부터 시작되고 수없이 반복되는 방전과정을 통한 열화정도는 절연물 shed재료의 고유특성에 더욱 많이 의존한다. CI shed소재의 열화는 그림 1과 같이 여러 단계를 거쳐서 복잡하게 진행된다.

절연물의 장기성능은 절연물 shed의 형상 및 arc distance, 제품의 제조상태, 표면의 오손도, 오손표면에서 물의 형상, 절연재료의 열화특성 등에 지배된다. 절연물의 크기는 조절가능하지만 경제적인 이유로 적절히 타협할

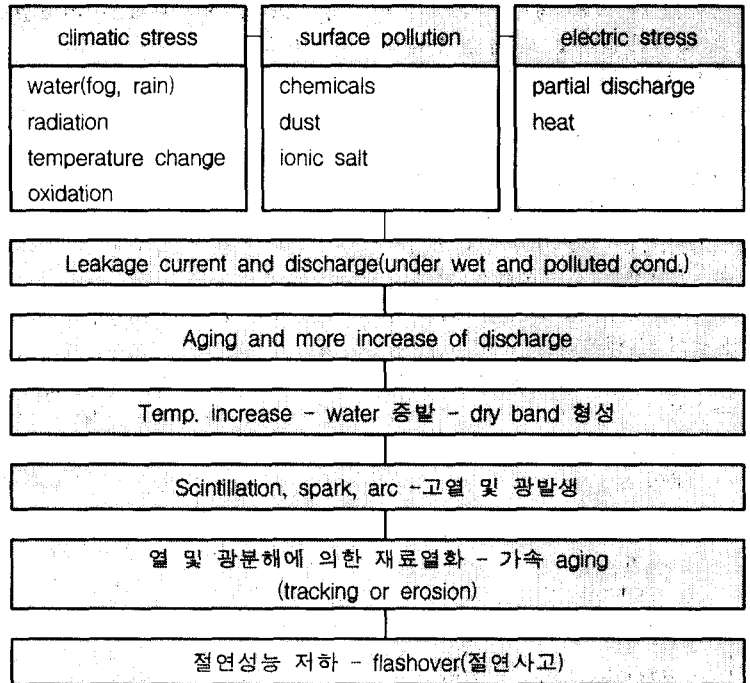


그림 1. 옥외절연물의 열화를 통한 절연사고 과정.

수밖에 없다. 표면의 오손도는 환경에 따라 다르지만 피할 수는 없다. 오손된 절연물표면에서 물의 형상이나 절연성능저하의 양상은 오로지 shed재료와 관련된 특성인데 실제통에서 절연물성능이나 사고예측을 위한 진단수단이 극히 제한적이고 구매시 시험을 통해서 장기성능을 예측할 수 있는 믿을 만한 방법도 확립되어 있지 않으므로 CI에 있어서 shed재료는 대단히 중요하다. shed용 고무재료는 dry band arc와 같은 강한 방전에너지에 노출되면 tracking이나 erosion형태로 열화가 수반되는 한계를 가지고 있는데 그 열화정도는 재료종류나 재료처방에 따라 크게 다르다.

3. 옥외 절연물의 표면발수성과 누설전류

산업의 대규모화와 도시의 과

밀화로 매연과 분진에 의한 오손이 증가하고 있으며 전력 부하가 밀집된 도시의 공단지역은 대부분이 염해가 있는 해안 지역에 위치하고 있기 때문에 절연물의 사용환경은 점점 열악해져 가고 있다.

오손된 절연물의 표면이 건조 상태에서 젖음상태로 변하게 되면 표면을 통하여 흐르는 누설전류는 수십배에서 수천배로 크게 증가하게 되는데 비나 안개 또는 일교차로 인한 결노(이슬) 등으로 절연물 표면의 젖음상태는 시시각각으로 변하며 표면의 절연저항이 물의 기여형태에 따라 크게 변하므로 오손물질과 물이 절연성능에 복잡하게 영향을 주는 상황이 된다. 문제는 이와 같은 것이 환경적 요인이라 피할 수 없으면서 절연물의 장기성능에 매우 중요한 인자가 된다는 것이다. 이 경우 shed소재의 표면발수성

에 기인한 물의 형상이 표면저항을 결정하므로 물이 어떤 형태로 존재하느냐가 대단히 중요하다. 절연물표면의 나쁜 발수성으로 누설전류가 증가하면 방전량이 커져서 shed소재의 열화가 가속되므로 수명이 짧아지게 된다.

발수성은 젖음성의 반대의미이며 일반적으로 접촉각을 측정하여 나타낸다. 유기소재인 고분자물질의 표면에너지는 대부분 물보다 낮아 그 표면에 있는 물은 방울형태로 존재하는데 고분자물질의 종류에 따라서도 표면에너지값이 다르므로 접촉각도 다

표 1. 절연물과 관련된 고분자물질들의 surface energy

Materials	Surface Energy (dynes/cm)
H ₂ O	73
Epoxy	34~46
PE, EPR, EPDM	32~34
Teflon	23
Organic liquids	20~40
Silicone(PDMS)	20~23
Silicone fluid	17~19
gases	0~10

르다. 절연물과 관련된 고분자재료들의 표면에너지를 표 1에 정리하였다.

CI의 shed용 소재로 사용되고 있는 EPDM과 실리콘고무의 표면에너지는 각각 34, 22 dyne/cm로서 물과의 차이가 큰 실리콘고무의 접촉각이 더 크므로 발수성이 더욱 우수하다. energized CI에 있어서 강한 방전은 오염과 흡습상태에서만 일어나기 때문에 shed재료의 발수성은 절연열화 및 장기성능에 크게 영향을 주므로 대단히 중요하다.

4. Shed재질로서의 실리콘고무 특성

실리콘고무는 $-(Si(CH_3)_2O)_n-$ 구조로 되어 있는데 Si-O 결합은 결합에너지가 커서 광이나 산화반응에 의해 분해가 쉽게 일어나지 않는 무기결합이므로 내열성도 아주 좋다.

PDMS(polydimethylsiloxane)의 화학적 특징은 -O-Si-결합에서 p-d orbital이 상당히 overlap되어 있어 결합각이 크고, 결합에너지가 높아 화학적 안정성(내열성, 내후성, 산화안정성)이 우수하며, 원자간에 전자 분극이 적어 분자간 인력과 표면에너지가 낮다.

주쇄의 실리콘 원자에 붙어있는 메틸기는 실리콘고무가 소수성을 띄게 하는 역할을 하는데 주쇄가 매우 유연하고 자유공간이 많아 메틸기가 항상 고분자표면으로 향하도록 배향되는데 이것이 낮은 표면장력을 갖게 해준다.

실리콘 고분자가 shed재료로서

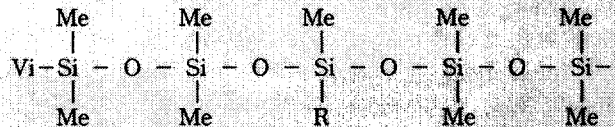


그림 2. Chemical structure of silicone rubber.

우수한 기본물성을 가지고 있는 것은 사실이지만 고무로서의 기계적 물성과 강한 방전에 의한 열화내성을 향상시킬 목적으로 최적의 처방이 필수적인데 compound의 개략적인 성분은 다음과 같다.

☐ Ingredients in silicone rubber compound

- Base polymer(PDMS)
- Reinforcing filler(fumed silica)

- Crosslinking agent
- Fillers(ATH) for improving tracking and erosion resistances
- Coupling agents for improving the interface bond of polymer and fillers
- Coloring agents
- Oils and plasticizers for good processing and hydrophobicity
- Other fillers for improving UV and oxidation resistances

처방시 성분들의 종류, 배합비, 혼합공정 등도 중요하지만 복합성분계에서 각 계면의 특성은 장기열화성능과 직결되어 있어 정밀계면화학인 이 부분에 세심한 주의가 요구된다.

shed 재료로서의 신뢰성을 인정받기 위해서는 내후특성이 좋아야 하고 방전에너지에 견딜 수 있는 내열성과 내트래킹성을 가져야 한다. 옥외 절연물이 사용 중에 오손흡습이 되면 표면의 발

수성에 따라 정도차이는 있지만 방전이 전혀 일어나지 않을 수는 없기 때문에 이 때 얼마나 소재의 열화가 수반되느냐에 따라 장기성능은 달라질 수밖에 없다. 현재 밝혀진 어떤 소재보다 실리콘고무는 오염되고 물이 기여하는 조건이 되어도 누설전류치가 낮아(같은 조건에서 porcelain의 10%이하) 방전량이 적으며 방전이 발생하여도 우수한 내열성으로 분해가 잘 일어나지 않는다.

만약 분해가 일어나도 유기 고무와는 달리(EPDM은 절연성이 나쁜 형태로 탄화됨) 절연특성이 좋은 SiO₂가 남기 때문에 절연 특성 저하가 일어나지 않는다.

실리콘고무의 발수성 연구는 장단기 열화 조건하에서 광범위하게 연구되어 왔다. 강한 전기적 방전에 의해 약간의 재질변화와 발수성저하가 관찰되었지만 다른 고분자와는 달리 실리콘고무 표면의 발수성은 장시간 열화 및 오손된 상태에서도 잘 유지되었다. 이와 같은 현상은 분자량이 작은 실리콘 고분자(oil, fluid, lubricant)가 재질의 내부로부터 표면으로 이동하여 나와서(이것을 diffusion 또는 migration 이라고 하며 실리콘고무보다 표면에너지가 낮은 실리콘 fluid가 표면에너지가 더 낮은 공기와 접하는 계면으로 이동하는 자발적 현상) 표면의 모든 물질을 적시므로 물에 직접 노출되는 오염물질 표면이 실리콘 fluid(실리콘고무보다 표면에너지가 더 낮음 : 18 dyne/cm)로 코팅되어 있는 것과 유사한 조건이 되므로 결보기로 오손되어 있어도 접촉각은 더 큰 값을 보인다. 실리콘고무표면을 강제로 코로나 방전시키면 발수성저하가 크게 일어나는데 시간이 지남에 따라 표면의 상태에 거의 무관하게 빠른 속도로 발수성회복이 일어난다. 이것은 실리콘고무의 동적인 발수성회복능력(dynamic hydrophobicity recovery ability)에 있어서 우수하다는 것을 보여주는 것이다.

오손물질이 수용성 염(NaCl, CaCl₂ 등)이나 바닷물에 직접 노출되는 환경이면 방전이 전혀 일어나지 않을 수는 없는데 이러한 상황에서도 실리콘고무는 우수한 발수성을 보이고 저하된 발수성을 쉽게 회복하며 오손된 표면에

서도 수십년간 우수한 발수성을 유지하는 것은 실리콘 고분자의 사슬이 유연하여 저분자성 실리콘 fluid가 유동성을 가지면서(실리콘 fluid의 분자량은 수백에서 수천정도임) 상온은 물론 고온에서도 쉽게 휘발되지 않는 특성을 가지고 있기 때문이다. 즉 실리콘고무가 절연재료로서의 우수한 특성을 잘 유지한다는 것은 실리콘고무의 특이한 여러 가지 물성이 절연물의 열악한 사용 환경에 대한 내성으로 잘 조화를 이루고 있기 때문이다.

사용 중에 재질의 화학적 변화가 수반되는 상황에서 발수성이 어떻게 변할 것인가하는 것은 절연물의 장기적인 신뢰성과 밀접한 관계가 있다. 많은 고분자들 중에서 실리콘만이 심한 오손상태에서도 표면발수성을 잘 유지하며 방전으로 인한 열화가 일어난다 하더라도 쉽게 발수성을 회복하므로 현재까지 알려진 가장 우수한 shed용 소재로 인정되고 있다.

5. 옥외절연물의 장기성능과 열화시험

CI의 많은 장점과 실사용 결과로 나타난 우수한 장기성능이 제품으로서의 신뢰성을 얻고는 있지만 소재 열화에 따른 절연성능저하와 관련된 문제점이 전혀 없는 것은 아니다. 20십년이상 제품으로 사용되고 있으면서도 제품선정을 위한 장기성능확인용 시험규격은 물론 상업적 가치가 있는 평가수단도 없다. 다만 이들 문제는 shed재료나 제품의 형상에 크게 의존하므로 장기적으로 성능저하에 영향을 주는 여러 가지 인자들을 철저히 이해할 필요가 있다.

CI를 구성하는 소재중 FRP

rod와 금구류는 장기성능과 거의 무관하며 CI의 성능저하 및 수명은 shed소재에 의존한다. shed소재의 열화로 CI가 운전전압을 유지하지 못해 전기적 사고를 유발시킨다. shed소재 열화는 그 원인과 양상이 복잡하지만 실리콘고무인 경우 전기적 방전에 크게 의존한다. 따라서 평가방법은 인위적으로 표면에서 방전이 일어나는 환경을 만들어 시험한다. 절연물 표면에 전도도가 높은 물을 안개형태(salt fog)로 분사시켜 방전을 유기시키는데 표면의 고체오염물질, 인가전압, 분사액 등이 방전량에 크게 영향을 준다.

대부분의 고분자 절연물은 옥외의 사용환경에 노출되면 자외선, 산성비(acidic rain), 오존 등에 의해 표면이 열화되고 오손물질과 수분의 영향으로 누설전류가 증가로 방전이 발생하면 열화가 가속되어 절연성능저하가 수반된다. 그러므로 옥외에서 사용하는 경우 절연 열화를 가져오는 트레이킹과 erosion에 대한 평가는 중요하며 CI용 shed소재의 이들에 대한 내성과 그것에 미치는 요인들에 대한 특성을 평가하지 않으면 안된다.

내트래킹성을 평가하기 위한 방법으로는 비교법(IEC Publ. 112), 경사평면법(IEC Publ. 587) 등이 있는데 이와 같이 규격화되어 있는 방법으로는 최근의 내트래킹성이 크게 개선된 소재에 대해서 효과적인 평가결과를 얻기가 쉽지 않다. shed소재를 평가하기 위해 현재 사용되는 시험방법으로는 salt fog조건인 clean fog test와 artificial pollution fog test가 있고 ionic water의 직접적인 인가방식인 inclined plane test와 rotating wheel dipping test가 있는데 후자의 두 방법으로는 방전을 다량 발생시키는 강제 열화

방식이고 salt fog는 현재의 표면 조건에 따른 절연상태를 진단하는 수단으로 이용된다.

6. 결 론

사용환경과 고전계가 걸려 있다는 것을 고려하면 정도가 크게 다르기는 하지만 다양한 종류의 방전이 옥외절연물의 표면에서 일어날 수밖에 없다. 따라서 옥외 절연물의 장기성능은 shed재료

화학적 안정성에 기인한다.

옥외절연물이 우수한 장기성능을 보이기 위해서 shed 소재는 다음과 같은 특성을 가져야 한다.

- ⊕ 내후성과 방전열화내성이 우수해야 함
- ⊕ 열화가 진행되어 화학결합의 분해가 수반된다하여도 표면의 절연성능이 가급적 저하되지 말아야 한다.
- ⊕ 오염된 절연물표면에 물이 존재하면 누설전류가 급격히 증

가하는데 발수성이 좋아 누설 전류값이 낮게 유지되면 방전 열화가 적게 일어나므로 오염된 표면에서도 우수한 발수성을 유지하면 유리하다. 방전에 의해 표면발수성이 나빠진다고 하여도 곧 발수성을 회복할 수 있고 이와 같은 회복특성이 수십년간 잘 유지된다면 금상첨화일 것이다.

< 강 동필 위원 >