

실 포설 환경에 노출된 송전용 고분자애자의 평가

이상진*, 연복희, 배경무, 전승익
LG전선(주) 전력연구소

Analysis of Polymeric Insulators Exposed to In-service Conditions

Sang-Jin Lee*, Bok-Hee Youn, Kyoung-Moo Bai, Seung-Ik Jeon
Electric Power Research Lab., LG Cable Ltd

Abstract

We have investigated the surface state of 154 kV polymeric insulators exposed to in-service conditions for about five years. In order to evaluate surface aging of silicone rubber exposed to real field environments, we used various analytic methods such as contact angle, ATR-FTIR, SEM-EDS. Although contaminants were accumulated on weathershed surface, polymeric insulator has retained its intrinsic surface hydrophobicity. In addition, ATR-FTIR confirmed the diffusion layer of a low molecular weight silicone fluid on surface layer and no surface cracking and chalking were indicated by SEM.

Polymeric insulators have still retained their improved pollution performance over porcelain insulators. That will lead to very low frequency of flashovers throughout their useful life, often under contaminated conditions.

1. 서 론

송전 선로에서의 절연용 애자는 무기재료인 세라믹을 사용하는 자기재 애자가 주로 사용되어 왔으나 최근 들어 유기재료의 합성 및 배합기술의 급격한 발달과 고분자 재료의 성형기술이 급진전하면서 고분자 애자의 개발 및 적용이 활발히 진행되고 있다. 고분자 애자는 자기재 애자에 비해 중량이 가벼워 설치가 용이하고 포설이 간편하며 송전선로의 건설 경비의 절감 효과도 가져올 수 있다. 또한 가공성이 좋고 기계적 강도가 우수할 뿐 아니라 갓 형상의 자유도가 크기 때문에 설계의 가변성이 용이하여 소형화가 가능하다. 또한, 자기재에 비해 발수성이 우수하므로 오손 및 습윤 시에도 누설전류가 작고, 표면특성인 발수성이 옥외에서 장기간 유지 및 회복되어 내오손성능을 향상시킬 수 있다.^{1),2),3)} 그러나 고분자 절연물은 태양광 중 자외선조사와 산성비 같은 옥외의 가혹한 사용 환경에 노출되면 표면이 열화된 후, 오손물질의 축적과 표면열화로 젖음성이 좋아져 표면 절연성이 나빠지므로 방전이 개시되어 국부적인 탄화와 열화가 일어나고 이것이 진전하여 절연성은 급격하게 저하하는 경향이 있다.^{4),5)} 따라서 많은 연구자들이 실험실 규모에서 여러 가지 가속열화장치를 이용하여 실제 열화과정을 모의한 여러 연구가 진행 중이다. 하지만, 이러한 실험들이 실제 사용환경과 차이점이 존재하여 옥외환경에서 나타나는 열화형태와 상이한 연구결과가 얻어질 우려가 있다. 따라서 실제 사용 조건에서 장기 노출된 고분자 애자를 분석하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 실선로에서 약 5년간 사용되어 온 송전용 고분자애자를 대상으로 하여 접촉각, ATR-FTIR 및 SEM-EDS 분석을 통하여 외피절연재료의 열화정도를 알아보았다. 이를 바탕으로 송전용 고분자 애자의 장기

신뢰성 평가를 목적으로 한 여러 가지 가속열화시험 수행에 도움이 되고자 하였으며, 송전용 고분자 애자의 장기 성능에 대한 안정성을 검증하고자 하였다.

2. 시료 및 측정

2.1 시료

본 연구대상인 시료는 2000년에 설치 사용된 154 kV급 송전용 고분자애자로 당사에서 실제 선로에 설치 통전 사용된 것으로 5개를 철거하여 사용하였다. 본 시료의 설치지역은 내륙지역이지만 공업지역으로서 각종 공업용 오손물의 영향을 받은 것으로 예측된다. 그림 1은 본 시험대상의 시료의 표면상태를 나타낸 것으로 고전압부에 약간의 오손물 축적이 관찰되었다. 이 시료는 국내 송전급 고분자애자의 시사용 실적과 비교하여 보면 사용실적이 국내에서 가장 오래된 상태라 할 수 있으므로 실제 옥외노출에 따른 송전급 고분자애자의 열화상태를 평가하는 측면에서 의미가 깊다고 볼 수 있다.

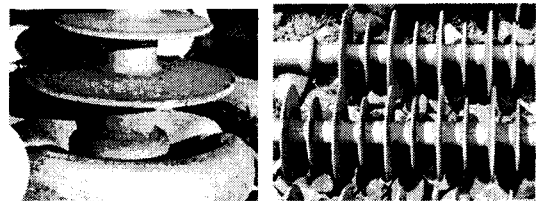


그림 1. 포설 후 수거한 고분자 애자

열화정도를 비교평가가기 위하여 당시 제작된 견전시료에서 기준시료를 준비하였으며, 실선로에서 철거된 시료는 고전압 전극 부근과 접지전극 부근 외피재에서 시료를 채취하여 코로나 방전 및 정전적 작용으로 인한 여러 가지 열화 가능성을 파악하기 위해 표면분석을 실시하였다.

그림 2는 본 시료의 외피재로 사용된 실리콘 고무의 기본 화학적 구조를 나타낸 것으로, 기본적인 발수성은 측쇄기인 메틸기가 표면으로 배향하여 높은 접촉각을 나타내게 된다. 또한, 실리콘 고무는 특유의 동적 회복능력을 가지고 있는데, 이는 벨크 내에 존재하는 저분자량의 실리콘 유제성분이 표면쪽으로 확산하여 표면발수성 및 표면 전기적 특성을 회복하는 것으로 많은 연구결과 확인되었다. 또한, 주쇄인 실록산 결합의 유연성으로 발수성을 가진 측쇄가 표면 쪽으로 배치되어 회복된다는 연구결과도 있지만, 이러한 회복 메커니즘은 표면에 축적된 오손층 위에서도 발수성을 띠는 여러 연구결과를 설명할 수가 없다.

표 1. 실리콘 고무의 주요 IR 특성피크

Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond
3700 ~ 3200	O-H (in ATH)
2960	C-H in methyl group
2930, 2930	C-H stretching
1680 ~ 1740	C=O
1640	O-H in water
1460	C-H bend
1240	Si-CH ₃ (side chain)
1020	Si-O-Si (backbone)

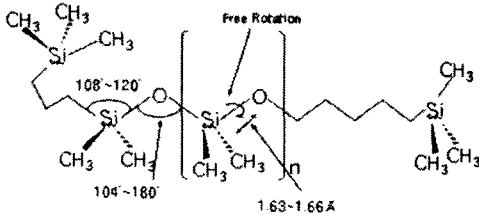


그림 2. 실리콘 고무의 기본 화학적 구조

2.2 접촉각 측정

에자가 옥외에 노출되면 자외선, 산성비 및 코로나 방전 등의 영향으로 인하여 최초의 발수성이 서서히 저하되며, 이러한 발수성의 저하는 에자의 표면에 수분의 흡착성을 높여 누설전류의 증가와 기타 전기적 절연성에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 발수성을 평가하기 위한 지표로서 일반적으로 접촉각 측정한다. 본 연구에서 접촉각 측정은 하적법(sessile drop)을 사용하였으며, 2 μl의 증류수를 마이크로 주사기를 통하여 시료표면에 적하하고 30초 내에 접촉각을 5 회 이상 측정하여 평균값을 나타내었다.

2.3 표면분석

건전시료, 고전압측 시료, 접지측 시료를 실제 고분자에서 채취하여 ATR-FTIR 및 SEM-EDS 표면 분석을 실시하였다. FTIR분석은 시료가 불투명하고 고무재질이므로 ATR 결정에 반복 반사하여 스펙트라를 얻는 ATR 방법을 사용하였으며, 표면에 축적된 오손물을 세척하지 않고 그대로 조사하였다. SEM-EDS를 사용하여 시료 표면상태 및 원소분석을 실시하여 고전압 전극부근에서 나타날 수 있는 코로나 방전에 의한 산화 및 크랙 정도, 오손물 등을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 발수성

3종류의 채취된 시료를 대상으로 접촉각 측정결과 송전용 고분자에서의 외피재에서 실 환경노출에 따른 변화는 관찰되지 않았다. 건전시료, 고압측 시료 및 접지측 시료의 결과, 각각 평균 116°, 131°, 118°로 나타났으며, 오히려 실제 사용된 시료에서 높은 발수성을 가지고 있었다. 접촉각은 측정재료의 표면에너지에 따라서 정해지는데, 발수 특성을 보유했을수록 접촉각은 높게 나타나며, 발수성을 보유했게 되면 오손 중에서도 누설전류 억제효과를 나타낸다. 이처럼 실사용 조건에 노출된 시료에서 접촉각이 높게 나타난 것은 시료표면에서 확인할 수 있었던 표면의 오손층을 관통하여 실리콘 고무 내부의 저분자량 실리콘 유제성분이 오손물질을 포괄하여 발수성을 회복시켰기 때문으로 생각된다. 따라서 표면에서 측정된 접촉각은 오손물에 의해 결정되는 것이 아니라 극표면에 노출된 저분자량 실리콘 유제에 의하여 결정되므로, 실리콘 고무 표면보다 표면에너지가 보다 낮은 실리콘 저분자량 유제에 의하여 표면접촉각이 보다 높게 나타난 것으로 보인다.

3.2 ATR-FTIR

FTIR 측정은 ATR의 방법으로 분석한 후 실리콘 고무 고유의 특성피크와 기준에 알려진 열화 메커니즘에 나타날 수 있는 여러 가지 특성피크와 비교하여 분석하였다. (표 1) 이 방법은 시료표면과 결정사이를 IR이 반복 반사하며 표면에 존재하는 특성기에 따라 스펙트라가 나타나는데, 0.4 ~ 4 μm의 분석 깊이를 가지는 것으로 알려져 있다.

그림 3은 각 시료에서 측정된 IR 스펙트라를 나타낸 것이다. FTIR 분석결과로 볼 때, IR 피크의 크기는 다르지만 실록산 결합을 이루는 기본적인 특성기는 모두 관찰되었다. 지금까지 보고된 실리콘 고무의 열화과정에서는 Si-O-Si와 Si-CH₃ 결합해가 절단되거나 C-H결합이 산화되어 카르복실기나 하이드록실기가 나타나는 것으로 보고되고 있다. 하지만, 본 시험결과는 접지부와 고압부에서의 시료 IR 피크가 건전부 보다 전체적인 피크크기가 감소되었지만 폴리실록산 결합이 뚜렷하게 나타났다. 이로 산화로 인한 결합해들이 절단과정이 아니라는 것을 알 수 있다. 즉, 고전압부 근처에 축적된 오손물질이 FTIR 측정 시에 ATR결과와 시료와의 접촉을 방해하여 피크의 크기가 감소되었지만, 실리콘 특유의 저분자량 확산으로 오손층을 포괄하여 극표면에 존재하기 때문에 IR관찰에서 특유의 폴리실록산 결합해가 나타난 것으로 보인다.

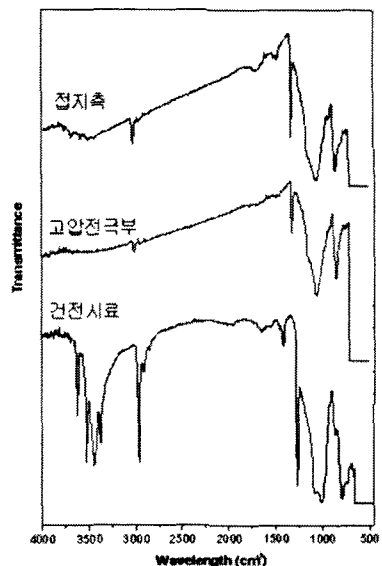


그림 3. 부위별 FT-IR 분석 결과

3.3 SEM-EDS

본 시료는 5년 정도 실제 포설되어진 애자이므로 4계절의 기후조건에 반복하여 노출된 것이다. 일반적인 오손 상황은 건기인 겨울철에는 표면오염이 심해지지만 우기인 여름철에는 강우로 애자표면이 세척된다고 보고되고 있다.

그림 4에서 그림 6은 각 시료에서 채취된 시료의 SEM 사진을 나타낸 것이며, 이의 EDS 분석 결과를 표 2에 나타내었다. 육안조사와 SEM 조사결과 표면에서는 어떠한 크랙이나 초킹현상도 관찰 할 수 없었으며, 오손물 축적에 의한 오손층만이 조사되었다. 성분분석에서도 오손환경에서 관찰되는 각종 오손물질이 관찰되었는데, 실리콘 고무의 구성성분인 기본적인 Si, Al이외에 K, Ca, Ti, Fe, Mg등의 성분이 확인되었고, 이는 기존의 각종 환경적인 요인과 공업지역에서 나타나는 일반적인 오손물 연구결과와 일치한다.⁷⁾ 또한, 오손물을 깨끗이 세정한 후에는 초기시료와 같은 표면상태를 나타내었다. 이로써 현재까지의 실 포설상태에서는 고분자애자 표면에 열화가 발생하지 않은 것을 알 수 있다.

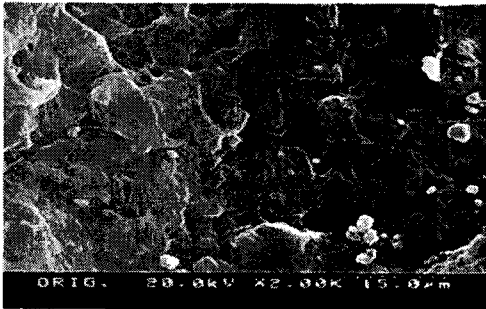


그림 4. SEM 사진 <건전 시료>

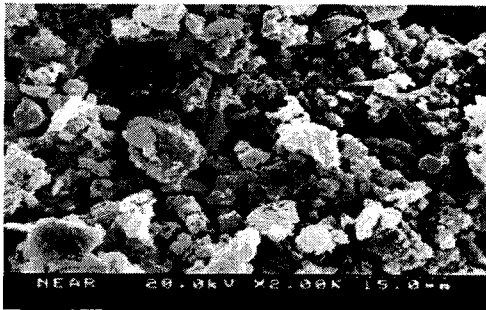


그림 5. SEM 사진 <고전압 측>

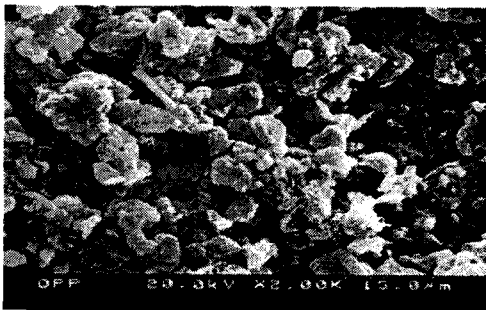


그림 6. SEM 사진 <접지 측>

표 2. EDS 구성 성분 분석 결과

	(atomic %)								
	O	Si	Al	K	Ca	Ti	Fe	Mg	Na
건전부	41.8	40.1	18.1	0	0	0	0	0	0
고압부	53.0	33.2	8.7	1.2	0.5	0.7	2.6	0	0
접지부	50.4	31.2	9.1	1.5	0.5	0.5	3.4	1.7	1.5

4. 결 론

154 kV급 송전용 고분자 애자의 실 통전 선로 운전 후 외피재에 대해 평가하여 실제 나타나는 표면 절연재료의 열화상황을 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 약 5년간 실선로에서 사용된 고분자애자의 표면발수성과 FTIR 측정된 결과, 초기 건전시료에 비하여 발수성이 높게 나타났으며, 실리콘 결합쇄가 뚜렷이 관찰되었다. 이는 표면에너지가 보다 낮은 저분자량 실리콘 유제성분이 표면의 오손물을 포괄하여 발수성을 띠는 것으로 보이며, 이로써 실리콘고무 특유의 장기 표면발수성 보유특성을 확인하였다.
2. 표면에서의 SEM-EDS분석을 통하여 각종오손물의 축적을 확인하였지만, 표면의 크랙 및 초킹현상은 관찰되지 않았다. 따라서, 기존의 알려진 열화과정에 비취보면 외피재 표면열화는 없음을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 5년간 실선로에 사용된 고분자애자는 오손 환경에서도 안정적인 특성을 지니고 있음을 확인하였으며, 추후 지속적인 장기적인 특성평가를 실시하여 가속열화시험 평가 및 수명평가에 도움이 되고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Brian Porarier(1996) "Experience and Applications with Non Ceramic Insulators at Power-line Queensland," Symposium on Non-Ceramic Insulator Technology
- [2] L.Xidong, Z.Renyu(1993), "On the surface hydrophobicity of Insulation Material", 8th Internations Symposium on High voltage Engineering, 47.03
- [3] Jeff Burnham(1996)," Application of Polymer Insulators to reduce costs and Increase Reliability", Symposium on Non Ceramic Insulator Technology, #17
- [4] A.E. Vizstos and M.Sjobeg(1993), "Leakage Current Data Aquisition System for Field Tests of Polymeric Insulators", 8th ISH, 47.09, pp. 205-208
- [5] R. Bartnikas, "Engineering Dielectric" Special Technical Publication, 1987.
- [6] V.K Agarwal al,," The mysteries of Multifactor Aging" IEEE Electrical Insulation Vol. 11, No.3, 1995.
- [7] 염진해 오손정도 및 기준정리에 관한 연구, 전력연구원, 2002