

옥외용 실리콘 고무의 표면 열화 특성 연구

서광석*, 김정호*, 송우창*, 문중섭*, 박용관*, 유영식**
 *성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부, **여주대학

The Study on Properties of Surface Degradation of Silicone Rubber for Outdoor Use

K.S.Seo, J.H.Kim, W.C.Song, J.S.Moon, Y.K.Park, Y.S.You
 *School of Electrical and Computer Eng. S.K.K.Univ., **Yeojoo. Univ.

Abstract - The application of polymeric insulators for outdoor use has been increasing as a new replacement of overhead line in abroad. In domestic case, it is actively going on the research of polymeric insulators. The Silicone rubber among polymeric insulators have a good electrical properties, due to surface hydrophobicity. This paper is concentrated on the recovery of surface hydrophobicity and the change of surface construction after electrical stress. The feature of silicone rubber, a good hydrophobicity, is demanded the improvement method as the estimation of the non-ceramic insulators like it.

1. 서 론

송전 및 배전의 전력전송 수단으로 가공전선은 경제적이다. 그 동안 모든 라인의 옥외 HV 절연 적용에 있어서 자기와 유리는 매우 광범위하게 사용되었다. 그러나, 지난 25년 동안 또 다른 재료, 즉, 고분자가 출현하였으며, 현재, 옥외 HV 적용이 점차 늘어가고 있다. 고분자의 주요한 이점은 가벼운 질량, 우수한 파괴저항, 그리고, 낮은 오손성능 등이며, 이에 따라 송전선로의 신뢰성과 건설경비의 저감효과 등 많은 이점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 표 1에 자기와 고분자 절연물의 비교 사항을 나타내었다.⁽²⁾

Property	Porcelain	Polymer
Compressive Strength	+	-
Size	--	+++
Weight	--	+++
Breakage	-	+++
Ageing Resistance	+++	++
Hydrophobicity	---	++
Creepage/Unit Length	-	++
Pollution Flashover	---	++

표 1. 자기와 고분자 절연물의 비교

실리콘 고무는 다른 고분자 재료와는 달리 우수한 내오손 성능을 가지고 있다. 이는 표면의 발수성에 기인한다. 다른 고분자 재료의 표면은 방전에 의해 거칠어 저서 표면을 친수성을 가지게 하는 반면, 실리콘 고무는 표면 상부층의 고분자쇄의 끊어짐으로 저분자의 오일형태로 되어 표면을 뒤덮게 된다. 이로 인하여, 표면이 손상되어도 할지라도, 이 발수성이 우수한 오일성분 때문에 전기적인 성능은 유지할 수가 있다.

본 논문에서는 이러한 실리콘 고무의 표면열화 특성을 연구하기 위하여, IEC 587의 경사평면법을 이용하였다. 표면성능을 관련짓기 위하여 EDX, SEM, FT-IR,

접촉각을 측정하였다.

2. 실험방법

실리콘 고무의 표면열화 특성과 누설전류 데이터를 얻기 위한 시험조건은 IEC 587 시험법으로 다음과 같다.

시험편	50mm×120mm×6mm
인가전압	4.0kV
전극	스테인레스 강재
오손액	중류수에 0.1±0.002%의 염화암모늄(NH ₄ Cl)과 0.02±0.002%의 비이온계면활성제(non-ionic surfactant)로 저항률은 23±1℃에서 3.95±0.05Ω·m
유량	0.6ml/min

표 2.IEC 587.의 시험조건

균일한 흐름이 상부전극에서 하부전극으로 생성하도록 여과지 6매를 겹쳐 상부전극과 시험편 사이에 끼우고 오손액을 주입한다. 시험편의 기울기는 45°이다. 시험의 회로도는 이전의 논문⁽³⁾에 잘 나타나 있다. 그 밖의 누설전류가 60mA이상 2초동안 흐르면 회로를 차단하도록 하였다. 시험편은 2개의 회사에서 얻은 것으로 SIR1과 SIR2이다. 시간과 관계되는 표면열화 특성을 이해하기 위하여, 시험편이 침식으로 인해 뒷부분이 드러날 때까지 전기스트레스를 지속적으로 주었다.

3. 결과 및 고찰

시험 초기부터 시험이 완전히 끝날 때까지 방전의 양상을 촬영한 것이 그림 1에 나타나 있다. (a)는 방전이 안정되기 전이며, 이 때의 방전은 글로우 방전으로 미소 발광방전이 커튼의 모양으로 상부에서 하부로 내리듯한 모양을 하고 있다. 이 때의 방전은 시험편에 아무런 영향을 주지 않았다. (b)는 전압인가후 약 1시간이

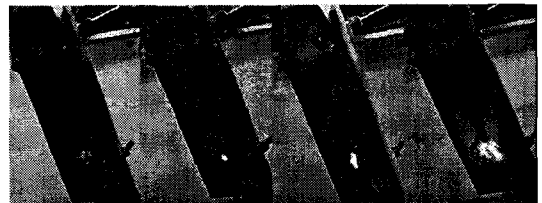


그림 1.시간에 따른 방전사진

경과된 모습을 촬영한 것으로, 방전이 하부전극근처에 안정된 모습이다. 이 때부터 시험편에 침식이 생기기 시작하였다. (c)는 전압인가후 약 20시간 이상 지나서 촬영한 것이다. (b)의 경우보다 방전은 밝게 빛나며 방전의 길이도 크다. 또한, 육안으로 트래킹이 있음을 확인할 수 있다. (d)는 시험을 마치는 시기로 방전이 매우

강렬한 아크방전이며 방전의 색깔도 파란색에서 주황색으로 변화했다. 시험편이 화염을 내면서 닳으며, 그 찌꺼기가 시험편에 달라 붙어 있다. 트래킹도 더 심하였다.

3.1. EDX

표 3은 EDX의 결과이다. 표 3에서 알 수 있듯이, 초기의 시험편은 SIR-1이 Al/Si의 비가 더 크므로 SIR-2보다 충전제가 더 많이 함유되어 있음을 알 수 있다. 시험편이 열화가 되었을 때, 트래킹이 나타난 부위는 초기와 비교하여 볼 때 Al/Si 비가 작으며, 침식이 심하게 된 부분은 Al/Si 비가 반대로 커졌다. 이러한 이유는 트래킹이 일어난 부위는 표면 위에 탄화생성물과 침식으로 인하여 표면에 달라붙은 부산물로 구성되어 있지만 이 부근에는 저분자 실리콘 오일이 공유되어 있는 상태를 나타내 주고 있다. 하부전극의 근처의 침식이 나타난 부위는 실리콘 고분자의 고갈로 인하여 충전제가 많이 나타나 있기 때문이다. 이러한 Al/Si 비는 트래킹 부위의 경우 시간에 따라 감소하였으며, 침식부근의 경우 시간에 따라 증가하였다.

Al/Si ratio	Surface		SIR-1	SIR-2
	virgin		0.8	0.5
	Aged	tracking	0.4	0.1
		erosion	1.3	0.8

표 3. 초기 시험편과 열화시험편의 EDX

3.2. 중량손실

그림 2은 시간 경과에 따른 실리콘 고무의 중량손실을 나타낸 것으로 충전제가 많이 함유된 시험편이 더 오랜 기간동안 이 시험에 견디었음을 암시한다. 중량손실의 경향은 어느 정도의 시간이 경과되면 갑자기 가속되기 시작되는데 이는 누설전류의 증가와 함께 방전의 영향에 지속적으로 영향을 받기 때문이다.

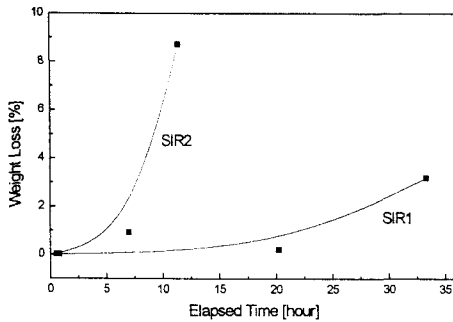
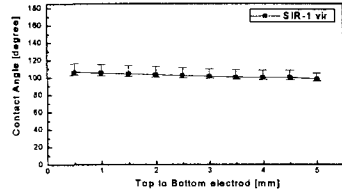


그림 2. SIR1과 SIR2의 시간에 따른 중량손실

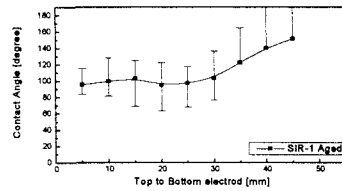
3.3. 접촉각

그림 3은 각각 SIR-1과 SIR-2의 초기의 시험편과 열화되었을 때 시험편의 접촉각을 나타낸다. SIR-1과 SIR-2의 초기의 시험편의 발수성은 별 차이가 없다. 열화되었을 때는 오히려 높은 값을 나타내었다. 방전에 의해 표면이 거칠어지면 발수성이 떨어진다는 사실은 일반적이지만, 발수성이 좋은 표면이 거칠어지면 오히려 발수성이 좋아질 수 있다는 사실이 보고되었다.⁽⁴⁾ 이러한 이유는 실리콘의 고분자가 방전열에 의해 여러 쇄가 끊어져 오일의 형태로 상부의 표면으로 올라오는 사실에 기인한다. 그림 (b)과 (d)를 살펴보면, 하부쪽의 접촉각은 측정되지 않는 부분이 있다. 이는 침식으로 인해 시

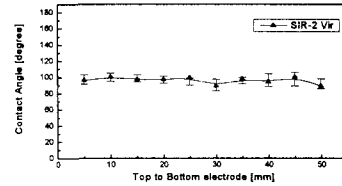
험편이 구멍이 났기 때문이다. SIR-2는 작은 시간임에도 불구하고 구멍이 큰 것은 그만큼 내아크성이 떨어지기 때문이며, 이는 충전제의 영향에 기인한다. 이러한 사실은 시간에 따른 중량손실의 결과와 잘 일치한다. 열화된 시험편의 접촉각의 에러바가 큰 것은 침식 뒤의 찌꺼기와 오손에 의한 영향으로 열화된 시험편이 매우 불균일한 표면임을 암시한다.



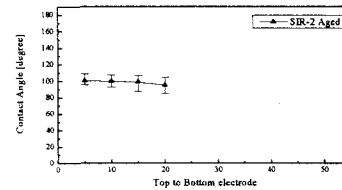
(a) SIR-1의 초기시험편의 접촉각



(b) SIR-1의 열화된 시험편의 접촉각



(c) SIR-2의 초기시험편의 접촉각



(d) SIR-2의 열화된 시험편의 접촉각

그림 3. 초기와 열화된 시험편의 접촉각

3.4. FT-IR

그림 4는 SIR1의 초기 시험편과 열화된 시험편의 IR 스펙트럼을 나타낸다. 가로축은 파수(cm^{-1})이며, 세로축은 투과도이다. 투과와 흡수는 반비례의 관계에 있으며, 특정한 파수에서 투과도가 적다는 것은 그 파수에 나타나는 결합 성분이 많다는 것을 의미한다. 표본은 시험을 마친 뒤 시험편에서 수 주일 뒤에 얻은 것이다.

넓은 범위의 $3700\text{-}3200\text{cm}^{-1}$ 밴드 1의 흡수스펙트럼은 ATH의 내에 있는 OH로 인한 것이다. 초기의 표본 보다는 열화된 표본이 OH에 대한 투과율이 크다. 이것은 충전제가 없어졌다는 것을 의미하는 것이 아니며, 고분자내의 분자간의 결합이 건조대 아크로 인하여, 충전

제 내의 결정수가 증기의 형태로 방출되었기 때문이며⁽⁵⁾, 표면의 상부층에 저분자 실리콘 오일이 뒤덮고 있는 것으로 생각한다. 침식된 부위가 트래킹된 부위(시험편의 중간부위)보다 투과도가 높은 것은 강한 아크의 영향으로 인하여, 표면 깊숙히까지 고분자가 해중합되어, 많은 양의 저분자 실리콘 오일이 표면으로 확산하여 표면을 뒤덮는 것으로 생각된다. 이러한 사실은 접촉각의 결과와 잘 일치하지만, EDX의 결과와는 맞지 않는다. 왜냐하면, EDX의 경우 표면에 분석이 가능한 최소 에너지의 X선을 조사할 때, 그 분석되는 침투깊이가 100Å 이상인 반면, ATR FTIR의 경우는 발수성의 영향을 미치는 깊이, 즉 저분자 오일층이 존재한다는 수~수십Å의 깊이를 분석하기 때문이다.⁽⁷⁾ 2964cm⁻¹의 밴드 2와 1259cm⁻¹의 밴드 4, 그리고 1007cm⁻¹에서 나타나는 밴드 5은 각각 CH₃내의 CH와 Si-CH₃, 그리고 Si-O-Si의 결합을 나타낸다. 열화된 시험편의 투과도는 모두 증가하였다. 이는 건조대 아크로 인하여 고분자 체인이 절단되는 것을 의미하여, 이는 곧 표면 구조의 변화를 암시한다. Si-O-Si의 절단은 SiO₂으로 변형되며, 이것은 오손액에 흘러나가 중량손실을 가져온다⁽⁶⁾. 2360cm⁻¹ 부근의 밴드 3은 대기중의 CO₂ 영향으로 인한 것이다. 이러한 IR스펙트럼의 경향은 SIR2의 경우도 같다.

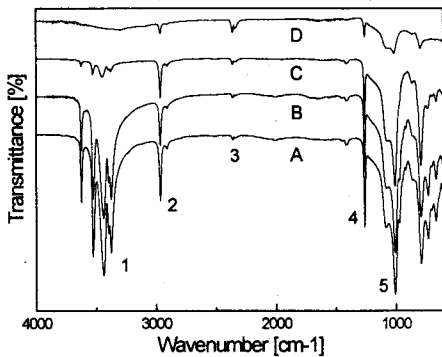


그림 4. SIR1의 IR 스펙트럼

- A. 초기 시험편
- B. 전압인가후 1시간 경과된 시험편의 중간부위
- C. 전압인가후 30시간 경과된 시험편의 중간부위
- D. 전압인가후 30시간 경과된 시험편의 침식된 부위

SEM

그림 5은 시험편에 1시간동안 전기스트레스를 준 후,

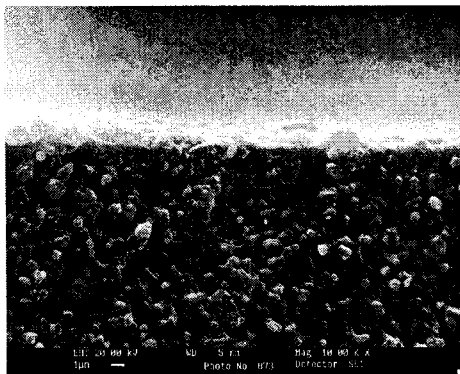


그림 5. 열화된 침식부위의 확대사진(10K)

제거하여, 1주일 뒤에 측정된 시험편의 침식된 부위를 잘라 10000배로 확대한 표면의 단면사진이다. 표면 상부의 얇은 층은 저분자 실리콘 오일을 나타낸다. 여기에 나타나 있지 않지만, 초기의 시험편과 유사하다. 이러한 실리콘 고무의 발수성의 회복은 상술한 바와 같이 표면의 내부로부터 저분자 실리콘 오일의 확산에 기인하는 것으로 생각된다.

3. 결 론

실리콘 고무에 가혹한 전기스트레스를 가하여 시간에 따라 표면열화를 고찰해 본 결과, 다음과 같은 사항을 알 수 있다.

1. 실리콘 고무의 경우, 한 곳의 지속적인 방전의 영향은 침식을 일으킨다.
2. 실리콘 고무는 전기스트레스에 영향을 받아 표면이 손상되더라도, 우수한 발수성을 유지하였다. 이는 고분자쇄의 끊어짐으로 저분자 오일성분이 표면으로 확산됨을 암시한다.

고분자절연물의 열화를 평가하는 데 있어, 실리콘 고무의 경우 이러한 발수성의 특징을 고려하는 것은 매우 중대한 문제이며, 서비스에서의 오손성능과 관련하여 열화시험방법에 반드시 고려해야할 사항이다. 또한, 고분자 절연물의 열화평가의 신뢰성을 위해, 가능한 많은 분석도구가 사용되어야 하는 것도 과제로 남아있다.

[참 고 문 헌]

- [1]R. S. Gorur, T. Orbeck , "Surface Dielectric Behavior of Polymeric Insulation under HV Outdoor Conditions", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 26 No. 5, October 1991.
- [2]Jeffrey Mackevich and Minesh Shah, "Polymer Outdoor Insulating Materials Part I : Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 1997 Vol. 13, No. 3.
- [3]"IEC Publ. 587 耐トラッキング性試験法に関する検討", 絶縁材料耐トラッキング性試験法専門委員会, 1989. 8. 25
- [4]강동필, "Silicone Rubber Composite Insulator 개발 및 신뢰성 평가", 「제1회 신기술 개발 워크샵」 배전용 애자류의 고품질 기술개발, pp101-118, 1998, 8. 20
- [5]D. J. Parr, R. M. Scarisbrick, "Performance of Synthetic Insulating Materials under Polluted Conditions", Pro. IEE, Vo.: 112, No. 8, pp. 1625-1632, 1965.
- [6]R. S. Gorur and J. W. Chang, O. G. Amburgey, "Surface Hydrophobicity of Polymers Used for Outdoor Insulation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [7]S. H. Kim, E. A. Cherney, R. Hackam, "Suppression Mechanism of Leakage Current on RTV Coated Porcelain and Silicone Rubber Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October 1991.