

실리콘 절연체의 트래킹 열화특성

이준호, 김숙철*, 황보승**, 지원영^o, 한민구^{oo}
 호서대, *(주)한전, **호남대, ^o(주)해룡실리콘, ^{oo}서울대

Tracking Characteristics of Silicone Insulators

June-Ho Lee, Suk-Cheol Kim, Seung Hwangbo, Wonyeong Ji and Min-Koo Han
 Hoseo Univ., KEPCO, Honam Univ., Haeryong Silicone Co., SNU

Abstract - The tracking characteristics of silicon rubber degraded by accelerated outdoor exposure employing a weather-o-meter have been investigated. The tracking test was performed according to IEC Publ.587 but the concentration of conductive material was two times higher than the IEC standard in order to accelerate the tracking failure. The number of large effective scintillation and the current of high voltage circuit were measured by changing two signals as voltage signals. It was found that the increase of exposure time resulted in the reduction of tracking resistivity except the fact that the specimens slightly degraded within 200 hours has slightly increased the duration time.

1. 서 론

최근에 옥외용 절연체로서 기존의 자기애자를 대신하여 여러 가지 유기물 고분자를 절연체로서 사용한 고분자 애자가 사용되고 있다. 이러한 고분자 절연체로는 기존의 자기애자에 비하여 가벼운 중량, 저렴한 가격, 양호한 작업성, 높은 전기적 절연성능 등의 여러 가지 장점을 가지고 있어 그 점유비가 계속 증가하고 있다.

고분자 절연체 중에서 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 물질은 실리콘 고무와 EPDM이며 현재까지의 여러 연구결과 실리콘고무가 경년특성이 EPDM보다는 다소 양호한 것으로 보고되어 있다.

현재까지는 절연 물질 및 완제품에 대한 여러 가지 초기시험으로서 물질의 내구성 및 안정성을 확인하고 있으나, 고분자 물질의 특성상 초기시험으로 물질의 기대수명인 30-50년 후의 상태를 보증하기는 극히 어려운 일이다. 왜냐하면 고분자 재료를 옥외에 사용하는 경우 대기의 여러 가지 요인들, 온도변화, 자외선 조사, 산성비, 해안가의 염분 등에 의해 계속적으로 열화되며 그 열화의 진행속도는 일반적으로 자기애자보다 빠른 것으로 알려져 있기 때문이다. 따라서 고분자 애자의 초기 절연상태가 비록 자기애자보다 우수하다 하더라도 현장에 설치 후 애자의 수명이 다할 때까지 자기애자보다 항상 우수할 것이라는 결과는 아직은 없다.

특히 태양광 중의 자외선 또한 고분자 재료의 열화에 영향을 미치는 것은 명백한 사실이다. 하지만, 실리콘 고무는 자외선 조사만으로는 고분자 체인의 절단 등의 변형은 거의 발생되지 않는다고 보고되어 있으며 따라서 대부분의 연구에서 이 부분에 대한 검토는 생략하고 있다. 그러나 주입된 에너지에 의해 일부 체인 절단 등의 화학변화와 표면의 경화화 크랙 생성 등의 물리적 변화가 발생할 가능성은 존재한다. 고분자 체인이 절단되어 저분자로 되는 경우 물질의 특성이 변하므로 실리콘 고무의 발수특성이 저하될 가능성이 매우 크며, 표면이 경

화되어 미소 크랙이 발생하는 경우 크랙 주변에 오손물질이 퇴적되고 수분이 존재하면 이 부분에서 누설전류가 증가하여 방전이 발생하고 결과적으로 절연체에 손상이 발생할 가능성이 충분히 존재한다. 따라서 이에 대한 면밀한 검토가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 자외선을 장시간 조사한 실리콘 고무의 트래킹 특성변화를 관찰하여 실리콘 고무가 자외선에 어느 정도의 안정성을 가지고 있는지를 조사하고자 한다. 아울러 트래킹에 의해 재료의 열화가 진행되는 상태를 추적하여 재료가 최종 파괴에 도달하기 이전에 이의 징후를 파악할 수 있는 방법을 찾아냄으로써 절연파괴에 의한 고장 발생 이전에 이를 감지할 수 있는 방법을 모색해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 IEC Publ. 587 시험법

1973년 IEC Technical Committee (TC-15)에서 가혹한 주변 조건 하에서 사용되는 전기 절연체로의 내트래킹성 및 내침식성에 대한 평가를 위한 시험방법을 제안하였으며, 1977년 IEC Publ. 587 (제1판)에 발표되었다. 이후 1981년 개정안이 제출되었으며 1984년 제2판이 발표되었다. 이 시험방법은 일면 오손액 경사평판 시험방법이라고도 부르며 세부내용은 다음과 같다.

가. 적용범위 및 대상

이 방법은 오손액과 경사 평판 시험편을 사용하여 내트래킹성과 내침식성을 측정하여 상용주파수(48~68Hz)로 가혹한 주위조건에서 이용하는 전기 절연체를 평가하는 시험방법이다.

나. 시험편

시험편은 표면을 미세한 실리콘카바이드 연마지로 균일하게 가볍게 연마하며, 크기는 최소한 50mm×120mm로 두께는 6mm의 것을 사용한다.

다. 시험장치

이 시험에 사용되는 시험장치의 회로도들 그림 1에 나타내었다. 전원 주파수는 48~62Hz, 출력전압의 변동은 ±5% 이내로서 약 6kV까지 변화시킬 수 있으면, 정격전류는 각 시험편에 대해 0.1A 이상이 확보될 수 있도록 한다.

라. 오손액

중류수 또는 이온교환수에 0.1±0.002wt%의 염화암모늄(NH₄CL)과 0.02±0.002wt%의 비이온계 계면활성제를 넣은 것으로서 저항율은 23±1°C에서 3.95±0.05(Ω·m)의 것을 사용한다. 오손액이 균일하게 상부 전극에서 하부전극으로 흐르도록 하기 위해 거름종이 8매를 겹쳐 상부전극과 시험편의 사이에 넣고 오손액이 종이에 스며 들어 흐르도록 한다.

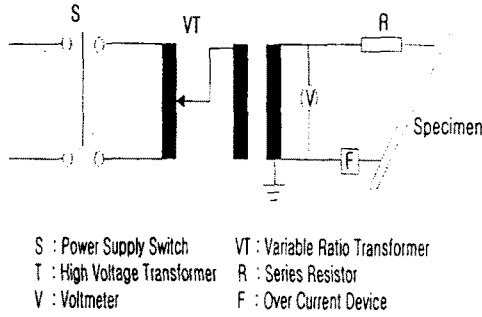


그림 1 트래킹 시험장치의 회로도

다. 시험 방법

5개 1조의 시험편에 대해 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 온도에서 시험한다. 시험편을 하측으로 상하부 전극간을 $50 \pm 0.5\text{mm}$ 떨어지게 설치하고 수평에서 45° 의 각도가 되도록 설치한다.

2.2. 실험

가. 시험 장치

시험에 사용된 IEC 587 기준의 시험회로의 개략도는 앞절의 그림 1과 같다. 여기서 회로의 직력저항은 $33(\text{k}\Omega)$, 2차회로인 고압회로의 시험전압은 $4.5(\text{kV})$ 를 인가하였다. 전극은 스테인레스로 제작하였으며 약 10회의 시험 후에는 새것으로 교환하여 사용하였다.

이 회로에는 과전류계전기와 타이머를 부착하였으며 과전류계전기는 기준치인 60mA 로 정정하여 정정치 이상의 전류가 2초간 계속되는 경우에 차단기가 동작하여 시험이 종료되도록 하였으며 타이머는 기준의 6시간과는 다르게 2시간으로 정정하여 사용하였다. 이는 많은 트래킹 시험의 결과로서 2시간 이상 트래킹 파괴가 발생하지 않은 시료는 대부분 6시간 이상 파괴가 발생하지 않았다는 실험에서 얻은 경험을 바탕으로 임의로 선택한 것이다. 이는 시험시간의 단축뿐만 아니라 전극 등의 시험장비의 손상 방지에도 효과적이다.

나. 데이터 취득

시험조건을 설정한 후 트래킹 파괴시험을 하였다. 실험이 진행되는 동안 시료의 표면에서 발생하는 유효불꽃의 단위 시간당 개수와 2차회로에 흐르는 전류, 즉 상부 전극에서 하부전극으로 흐르는 전류의 단위시간당 평균치를 측정하였다. 불꽃방전은 IR센서에서 검출되어 광파이버를 통하여 광다이오드에 입력되며 여기에 사용된 광다이오드는 불꽃신호를 전압신호로 변환시키는 역할을 한다. 이 광파이버의 광신호 전달범위는 $380 \sim 1300(\text{nm})$ 이며, 직경과 인식각은 각각 3.2mm , 68° 인 것을 사용하였다. 또한 시료의 표면에서 흐르는 전류는 하부전극과 접지선 사이에 저항을 삽입하여 이 저항을 통하여 전류가 흐르는 경우 저항 양단에 전압차가 발생하는 것을 이용하여 전류신호를 전압신호로 변환하였다. 이러한 변환과정을 거치는 이유는 데이터 처리 시스템이 전류신호보다는 전압신호로 처리하는 것이 더욱 편리하기 때문이다.

2.3 결과 및 검토

가. 유효불꽃 발생빈도

상기와 같이 각종 트래킹 실험조건을 설정한 후 각 시료에 대하여 트래킹 파괴시험을 진행하는 동안에 발생하는 유효불꽃의 시간에 따른 발생빈도를 그래프로 나타내면 그림 2과 같다.

그림에서 그래프 A는 700시간 열화된 시료이며, 그래프 B는 건전시료의 시간에 따른 유효불꽃의 발생빈도이다. 이 그림에서 구간 A로 표시한 것은 유효불꽃의 발생빈도가 그다지 많지 않은 구간이며, 구간 B는 유효불꽃의 발생빈도가 급증하는 구간을 나타낸다. 구간 A에서는 불꽃의 발생이 적을 뿐만 아니라 트래킹 시험시간이 경과하여도 발생빈도가 그다지 증가하지 않는 경향을 보여 주고 있다. 이는 불꽃의 발생숫자가 적은 것을 의미하는 것은 아니며 다만 큰 불꽃방전이 많이 발생하지 않는다는 것을 나타낸다. 즉 오손액이 시료의 표면의 좁은 구간에 집중적으로 흐르지 않고 하부전극 근처에서 발생하는 트래킹에 의해 시료의 표면에 분산되어 흐르기 때문에 한 곳에 집중적으로 큰 불꽃을 방상시키지 않고 시료의 표면의 넓은 범위에서 작은 불꽃을 많이 발생하는 경향을 보이는 것이다.

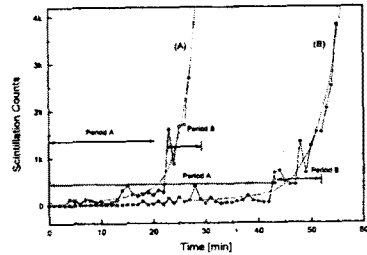


그림 2. 유효불꽃의 시간에 따른 발생빈도의 변화

그러나 두 그래프를 비교해보면 이 구간에서도 그래프 A보다는 B에서 더많은 유효불꽃이 발생한다는 사실을 알 수 있다. 즉 열화된 시료의 표면이 건전시료보다는 친수성(hydrophilic)이 크다는 사실을 알 수 있다. 그러나 그정도의 차이는 그렇게 현저하지는 않음을 알 수 있다.

다음으로 구간A의 길이를 비교해 보면 건전시료의 경우 약 43분, 700시간열화된 시료의 경우 약 21분 정도로서 두 그래프가 현저한 차이를 나타낼 수 있다. 즉 열화의 정도에 따라 구간A의 지속시간이 현저하게 차이가 나타난다. 이러한 실험의 결과에서 다음의 두 가지 결과를 도출할 수 있다.

첫째는 재료의 표면이 자외선의 조사시간이 증가함에 따라 실리콘 고무가 가지고 있는 본래의 소수성을 빠른 속도로 소실하여 궁극적으로는 재료의 특성이 친수성이 된다는 의미이다. 즉 장기간의 자외선 조사에 의해 실리콘 고무가 발수성을 점차로 상실하여 표면을 따라 오손액이 좁은 지역에 집중되어 흐르며 따라서 큰 불꽃방전이 발생하게 되고, 이와 같은 과정의 누적에 의해 궁극적으로는 실리콘 고무의 절연이 파괴되어 절연성능을 잃게 될 수 있음을 나타내고 있다.

둘째로는 고분자 재료의 트래킹 실험시 발생하는 유효불꽃 숫자로서 해당재료의 내트래킹 특성을 판별할 수 있다는 사실이다. 위의 그래프에서 알 수 있듯이 시료가 같은 재료로 되어 있는 경우에는 구간 B의 시험을 생략하여도 재료의 내트래킹 특성을 파악하는데 아무런 지장이 없다. IEC 기준에 의한 시험방법으로서 재료의 트래킹 특성을 파악하기 위해서는 파괴가 일어날 때까지 시험을 계속하여야 하므로 시험시간이 많이 소요된다. 따라서 트래킹 시험과정에서 발생하는 유효불꽃의 숫자를 광센서를 이용하여 측정하면 IEC에서 규정한 방법보다 훨씬 빠르고 쉬운 방법으로 재료의 내트래킹 특성을 판별할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 또는 육의용 고분자 재료로 사용되는 여러 가지 재료의 상대적인 트래킹 특성 비교에도 이 유효불꽃 숫자가 효과적으로 사용될 수 있다.

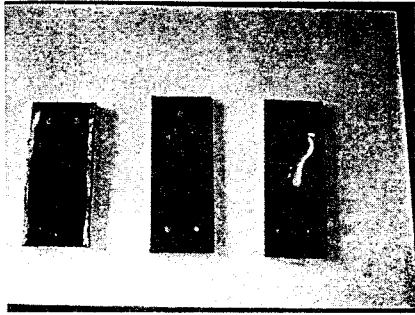


그림 3. 본 연구에서 실험된 실리콘 절연시편의 표면사진

실리콘 고무의 트래킹 특성은 구간 A의 지속시간과 유효불꽃의 발생빈도로서 충분히 파악이 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 시험방법으로 트래킹시험을 시행하는 경우 시험시간을 대폭 단축할 수 있으며 시료의 내 트래킹시험을 판별하는 것 또한 매우 용이하다는 것을 알 수 있었다. 그림 3은 본 연구에서 실험된 실리콘 절연시편의 실험 후 표면사진이다.

나. 트래킹 파괴시간

시료의 자외선에 의한 열화 정도에 따른 트래킹 실험의 지속시간, 즉 트래킹 파괴시간을 그래프로 나타내면 그림 4과 같다. 이는 5회의 실험을 통해 얻는 결과의 평균치이며 시험시간을 120분으로 설정하였으므로 트래킹 파괴시간의 최대치는 120분이다. 트래킹 파괴시간은 100시간 열화된 시료의 경우 건전시료보다 조금 증가하였고 200시간 열화된 시료의 경우는 건전시료와 거의 같았으나 500시간 및 700시간 열화된 시료의 경우 열화시간의 증가에 따라 트래킹 파괴시간은 급격히 감소하였다.

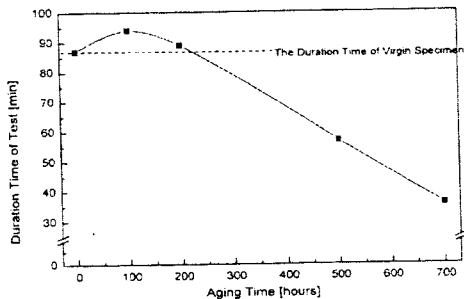


그림 4 열화시간에 따른 트래킹 파괴시간의 변화

이는 건전시료보다 가볍게 경화시킨 상태가 실리콘의 트래킹 특성이 향상된다는 것을 의미한다. 그러나 약 200시간 이상의 가속열화시에는 실리콘 표면의 조성이 변화하여 트래킹 억제력이 점차 약화되기 시작한다는 것을 나타내고 있다. 이 실험은 약 5,000시간 이상의 장시간의 가속열화에 대한 실리콘의 트래킹 특성을 검증할 필요성을 제기하고 있다. 왜냐하면 옥외용 애자는 설치 후 약 30~50년 정도의 옥외사용 환경에 견디어야 하기 때문이다. 이를 위해서는 트래킹 특성과 애자의 절연 파괴 특성과의 상관관계를 규명하는 것이 필요하나 아직까지는 이에 대한 세부적인 연구가 이루어지지 않았으며 따라서 향후 연구가 필요한 분야이다. 그러나 현재까지 알려진 바에 의하면 실리콘 고무를 포함한 고분자 애자의 트래킹 특성을 규명하는데 IEC기준에 의한 시험방법

이 그다지 효과적이지 못한 것으로 파악되고 있다. 그 이유는 이 시험방법이 현장에서 일어날 수 있는 조건에서는 너무 가혹하다는 것이다. 즉 애자에 표면에 인가될 수 있는 단위 길이당 전압의 크기, 오션액의 농도 및 유량, 불꽃방전의 발생 빈도 등이 너무 크게 설정되어 있다. 따라서 최근에는 이 방법을 대체하기 위한 여러 가지 시험방법들이 연구되고 있으나 아직까지는 국제적인 표준으로 인정될만한 방법이 제시되지 못하고 있다.

3. 결 론

자외선 조사에 의해 가속 열화된 실리콘 고무의 트래킹 시험의 결과로부터 다음과 같은 사실을 할 수 있었다. 우선 열화의 시간이 증가하면 트래킹 파괴의 속도가 빨라졌으나, 200시간 이내의 가볍게 열화된 시료는 변화가 거의 없거나 오히려 조금 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 장기간 옥외에서 사용하는 경우에 자외선의 조사에 의해 실리콘 고무의 특성이 변화하여 트래킹 특성의 현저한 저하를 가져오게 된다는 사실을 할 수 있었다. 다음으로는 트래킹 파괴의 특성을 파악할 수 있는 방법으로서 현재까지 알려진 고압회로의 전류치가 그다지 효과적인 지표가 될 수 없다는 사실을 할 수 있었으며, 이보다는 오히려 유효불꽃 발생빈도의 시간에 따른 변화가 트래킹의 진전에 더욱 밀접하게 관련이 있다는 사실을 알 수 있었다. 즉, 하부전극에서 열점이 발생하여 여기서 트랙이 진전되어 가는 과정에서 전류의 증가는 거의 일어나지 않으나, 유효불꽃의 발생빈도는 트랙의 성장에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 유효불꽃의 발생빈도로서 재료의 트래킹 저항력을 쉽고 빠르게 파악할 수 있으므로 IEC 규격에 의한 시험 회로에 유효불꽃 숫자의 검출 카운터 회로를 추가하여 시험할 경우 매우 효과적인 트래킹 시험수단이 될 수 있음을 알 수 있었다.

특히 유효불꽃의 발생빈도의 시간에 따른 변화를 나타낸 곡선에서 살펴보면 트래킹 파괴 직전의 약 10분은 시료의 열화 정도와 그다지 관련이 없으며 이 구간 이전에서의 시험 지속시간과 이때 발생하는 유효불꽃의 숫자가 열화의 정도와 밀접하게 관련이 있는 것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Dong-Young Yi, June-Ho Lee and Min-Koo Han, "The effect of acid Rain on the Tracing Deterioration of Elastomer" IEEE Int'l Sym. Electrical Insulation, Baltimore, June, 1992
- [2] IEC Publication 587, Second Edition, "Test Methode for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials used under severe Ambient Comditions", 1984
- [3] M.Nishida, N.Yoshimura and F.noto, "Light Sensors as Detectors of Tracking Deterioration", IEEE Trans. Insulation Material, Vol. EI-22, pp.507-516, 1987
- [4] K.Stimper, W.H.Middendorf, "Mechanisms of Deterioration of Electrical Insulation Surfaces", IEEE Vol. EI-27, No.5, pp1050-1053, 1992
- [5] S.P.Nunes et. Al., "Tracking Degradation and Pyrolysis of EPDM Insulators", IEEE Vol. EI-24, No.1, pp99-105, 1989
- [9] Jefery Mackevich and Minesh Shah, "Polymer outdoor insulating materials I", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.13, No3, 1997
- [10] Jefery Mackevich and Stephanie Simmons, "Polymer outdoor insulating materials II", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.13, No4, 1997