

폴리머 옥외 절연물 소재의 전기적 특성 평가 기술

박효열, 강동필, 안명상, 명인혜  
한국전기연구원

Evaluation Technology of Electrical Characteristics for Outdoor Polymer Insulator Materials

Park Hoy Yul, Kang Dong Pil, Ahn Myeong Sang, Myung In Hae  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 송배전용 설비에 사용되는 옥외 절연물로는 자기질이나 유리질의 애자가 주로 사용되어 왔지만 최근 신소재의 발달로 가볍고 절연성능이 우수한 폴리머 애자가 보편화되기 시작하였다. 폴리머 애자가 자기질 및 유리질의 애자에 비하여 내열성과 내후성이 부족한 것은 사실이지만 절연물이 오염과 습윤된 환경에서 폴리머 애자의 절연성능이 훨씬 우수한 것으로 밝혀지고 있다. 폴리머 애자의 장기성능 예측을 위하여 많은 수단과 측정방법이 연구되어 왔다. 폴리머 애자의 하우징 재료는 내열성, 내후성, 산화안정성, 발수성 및 내오염성 등 절연소재로서 우수한 특성을 가지고 있지만 하우징 표면에서의 방전이 발생할 때 옥외절연물에서의 성능은 하우징 재료의 배합처방에 따라서 많은 차이가 나고 있다. 본 논문에서는 하우징용 소재의 특성을 평가하기 위한 평가방법과 평가결과를 해석하는 기술에 대하여 기술하였다.

1. 서 론

폴리머 애자는 기계적 강도유지를 위한 FRP core와 표면절연성능유지를 위한 고무 갖으로 구성되어 있다. 폴리머 애자는 초고압 절연성능과 구조물로서의 기계적 강도 특성이 우수하고 송배전설비의 혁신적 변화유도가 가능하여 옥외 절연물로서 많이 사용되고 있다. 산업의 대규모화와 도시의 과밀화로 매연과 분진에 의한 절연물의 오손이 증가하고 있으며 전력 부하가 밀집된 도시의 공단지역은 대부분이 염해가 있는 해안 지역에 위치하고 있기 때문에 표면방전에 의한 외피 소재의 열화내성이 중요한 인자로 부각되고 있다. 폴리머 애자용 갖 소재는 트래킹성(재료침식), 내광성, 산화안정성 등의 성능이 기본적으로 우수해야 하고 오염으로 인해 재료열화가 가속되는 환경에서도 장기간 잘 견디어야 한다. 따라서 애자성능은 오손조건에서의 갖 재료성능에 크게 의존하는데 실리콘 및 EPDM 등의 고무가 좋은 성능을 보이고 있다.

실리콘 및 EPDM 등의 하우징 재료가 내열성, 내후 내광성, 산화안정성, 발수성, 내오염성 등 절연소재로서의 우수한 특성을 가지고 있지만 갖 표면에서는 방전발생이 불가피한 옥외절연물에서 장기적인 성능은 하우징 재료의 배합처방에 따라 상당히 차이가 나는 것으로 밝혀지고 있다. 고무소재의 발달은 첨가재의 발달에 기인하고 있는데 폴리머 애자의 하우징용 재료가 장기절연성능을 유지하기 위해서 트래킹 방지제인 Aluminum Trihydroxide(ATH)와 발수성과 성형성에 영향을 주는 오일들의 최적처방을 통해 우수한 장기성능을 가진 고무소재의 개발이 필수적이다. 특히, 전기방전이 발생할 때 고온의 열과 단파장의 빛이 재료표면에서 발생하는 상황과 하우징 재료의 열화기구 등을 고려할 때 ATH가 가장 우수한 보강제인 것으로 많은 연구에서 밝혀져 있다.

폴리머 애자의 장기성능예측을 위하여 많은 수단과 측정방법이 연구되어 왔다. 그러나 폴리머 애자에 있어서

성능저하는 대부분 갖 재료의 열화에 기인되고 있어 예측 및 진단목적의 연구가 갖 재료의 가속열화에 초점이 맞추어져 있다.

본 논문에서는 하우징용 소재의 특성을 평가하기 위한 평가방법과 평가결과를 해석하는 기술에 대하여 기술하였다.

2. 본 론

2.1 코로나 방전에 의한 고무 표면의 열화

하우징용 고무의 발수성 회복특성(recovery of hydrophobicity)을 평가하기 위하여 그 표면 열화 수단으로서 코로나 discharge를 많이 사용한다. 그림 1에 코로나 표면처리기 및 표면처리장면을 나타내었다. 코로나 방전처리 장치는 주파수, 전압, 전극과 시료와의 간격, scan(왕복운동) 속도 및 횡수 등의 변수가 있다. 이러한 코로나 표면처리 효과를 확인하기 위하여 실리콘 고무에 물을 스프레이하여 코로나 처리된 부분과 미처리 부분에 있어서의 물의 거동을 그림 2에 나타내었다.

방전열화된 시편으로 SEM을 사용하여 표면열화 정도를 비교하거나 접촉각을 측정하여 평가할 수 있다.

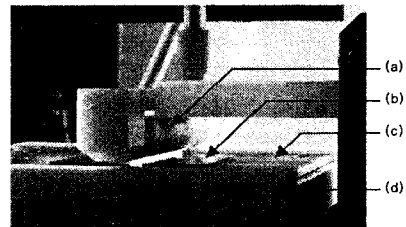


그림 1. 코로나를 이용한 시료의 표면처리  
(a) ceramic roll electrode  
(b) specimen  
(c) bottom electrode  
(d) PTFE insulator

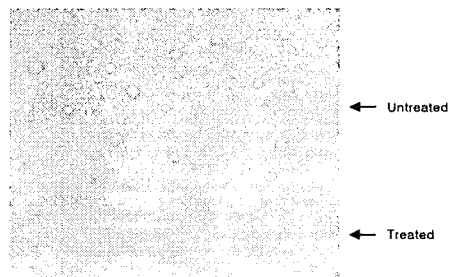


그림 2. 코로나 표면처리 효과

## 2.2 발수성 측정

옥의 절연물이 사용 중에 오손 및 습윤 상태가 되었을 경우 표면으로 흐르는 누설전류와 이로 인한 방전량은 오손액의 전도도와 재료표면의 발수성에 기인한다. 오손 및 습윤이 실제 사용 환경에서 불가피한 요인이라고 보면 표면에서 발생하는 방전량은 거의 재료의 발수성에 의존한다고 볼 수 있다.

실리콘 및 EPDM 고무 소재가 옥의 절연물 하우징용 소재로 각광을 받고 있지만 장기성능은 고무배합의 처방에 따라 상당히 차이가 나는 것으로 알려지고 있다.

여러 가지의 전기적 특성의 향상을 위하여 ATH를 첨가하게 되면 발수성은 떨어지는 효과를 나타내게 되므로 발수성과 ATH의 적절한 조합이 필요하다.

## 2.3 SEM 측정

트래킹, 아크, 코로나 등에 의하여 열화된 표면 등을 관찰하거나 표면의 발수성을 구분하기 위한 수단으로 SEM(주사전자현미경)을 사용할 수 있다. 재료의 배합 처방에 따라서 열화정도가 다르게 나타나므로 표면의 특성을 SEM을 이용하여 비교분석하기가 매우 용이하다.

## 2.4 내아크성 측정

절연체의 표면이 아크에 노출되면 그 열과 광에 의하여 열적 및 화학적으로 분해가 일어나거나 침식이 생겨 도전도가 형성되고 시료의 표면 및 내부로 전류가 흐르기 시작하여 곧 단락으로 이어지게 되어 절연성을 상실하게 된다. 내아크성은 이러한 아크에 대한 절연체의 내성을 말하며 표면절연성능 저하로 아크가 소멸할 때까지의 시간으로 나타낸다.

절연물은 전계강도를 충분히 고려하여 설계하지만 실제 계통에서 사용되면 절연물의 표면 오손과 습윤에 의해 불평등한 전계가 생기게 되고 짧은 거리에 고전계가 걸려 아크가 발생할 수 있으며 아크에 의해 열화될 때 전도성이 높은 탄화물이 생기기 때문에 내아크성을 향상시키는 것이 중요하다. 일반적으로 내아크성을 향상시키 고자 하는 경우에는 무기물을 첨가한다. 섬락으로 이어지는 아크방전은 오손 정도와 밀접한 관계가 있다. 초기에 Joule열에 의해 건조대(dry band)가 형성되면 양단에 고전계가 유도되어 아크 방전으로 이어지게 되며 전기적 스트레스와 열이 수반되어 탄화, 분해 등이 일어난다. 이때 남은 물질의 특성에 따라 절연성은 크게 달라지게 되는데 유기 물질이 탄화되면 전도성이 있는 그라파이트(graphite) 구조로 바뀌는 경우가 많으므로 절연 내력이 떨어져서 결국 절연회복이 되지 않을 수가 있지만 실리콘 고무는 탄화되어도 절연성이 우수한 실리콘으로 변하기 때문에 절연성의 저하는 나타나지 않으며, 또한 내열성이 우수하기 때문에 열화가 잘 일어나지 않는다.

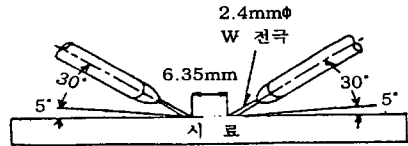
일반적으로 JEC-143, ASTM D 495에 의하면 2차 회로 개방시의 전극전압은 12.500 V를 표준으로 하고 있다. 표 1과 같이 한 단계를 1분으로 하며, 흐르는 전류의 on-off에 따라 7단계(420초 동안)로 이루어진다. 사용되는 전극은 직경이 2.4 mm, 전극 사이의 거리가 6.35 mm로서 두 전극 사이에 직선으로 아크방전을 유기기 위하여 30°를 유지한다. 전원 회로 및 시료와 전극은 그림 3의 (a), (b)와 같다. 전극의 재료는 두 가지로서 시험재료의 내아크성이 작을 경우(180초 이하)에는 stainless steel strip이 유용하지만 내아크성이 큰 시편의 경우(180초 이상)에는 stainless steel strip의 모서리가 아크에 의하여 마모가 되므로 텅스텐봉이 적절하다.

EPDM과 같은 고무는 전극 양단에 전압이 걸려서 아크가 발생할 경우 탄화가 발생하는데 그 때까지의 시간으로 내아크성을 평가한다. 그러나 실리콘 고무와 같이 전극의 양단에 전압이 걸려서 아크가 발생하여도 탄화잔존물이 잘 생기지 않고 용삭(erosion)만 생기므로 그때에는 용삭이 발생된 양을 서로 비교하여 내아크성을

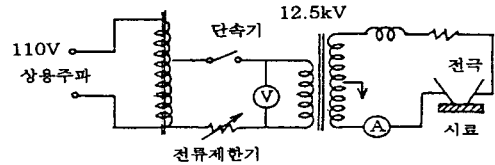
평가하기도 한다.

표 1. Sequence of 1 min current steps

Step	Current (mA)	Time Cycle	Total time (sec)
I	10	1s on, 1s off	60
II	10	1s on, 1s off	120
III	10	1s on, 1s off	180
IV	10	Continuous	240
V	20	Continuous	300
VI	30	Continuous	360
VII	40	Continuous	420



(a) 내아크성 실험용 전극



(b) 내아크성 실험회로

그림 3. 아크 저항 측정용 전극 및 전원회로

## 2.5 내트래킹성 측정

폴리머 애자에서 장기신뢰성은 하우징용 고무 소재의 성능에 의존하는데 옥의 환경에서 오염되고 물이 존재하는 조건이 되면 폴리머 애자 표면으로 누설전류가 증가하게 되고 더불어 방전이 일어나면서 소재열화가 진행된다. 이와 같은 전기방전의 발생과 이로 인한 열화의 진행은 불가피한데 이것이 흔적을 남기면서 진행된다고 하여 트래킹이 발생한다고 한다. 방전열화로 인하여 표면 전도도가 올라가면 그 부위는 절연성을 상실하게 되며 열화되지 않은 부위에 전계집중과 더불어 방전이 그 부위에서 주로 발생하므로 트래킹은 점점 진전되어 간다. 실리콘 고무소재는 열화시 탄화로 인한 도전성 잔존물이 거의 생성되지 않기 때문에 트래킹보다는 특정부위에 방전이 계속되어 파먹는 형태의 용삭(erosion)이 주로 발생되며 EPDM의 경우는 탄화에 의한 트래킹이 발생되어 진다. 고분자 절연물의 내트래킹성 측정은 IEC 587(IPM : inclined plane method)을 사용하며, 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 실정이다. IEC 587에서의 평균전계는 20~120 V/mm이며, 시험 주파수는 60Hz, 출력전압은 ±2 % 이내에서 7 kV까지, 전류는 600 mA로 설정하며 시험회로 및 전극과 시료의 구성도를 그림 4에 나타내었다. 상부전극과 하부전극의 거리는 50±0.5 mm이며, 수평으로부터 45°로 유지하였다. 트래킹과피는 고압회로에 60 mA 이상의 전류

가 2초간 연속적으로 흐를 때의 시간과 도전로 (conducting path)가 하부전극으로부터 25 mm의 표 시에 도달하는 시간으로 평가한다. 그림 5에 경사평면법 시험장면을 나타내었다.

옥외절연물로서 사용하기 위한 EPDM과 실리콘 고무 등은 제일 높은 등급에서도 트래킹 파괴가 발생되지 않으므로 용삭이 발생된 양을 서로 비교하여 내트래킹성을 평가하기도 한다.

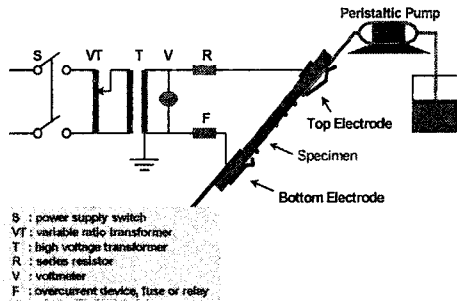


그림 4. 트래킹 실험 장치도(IPM)

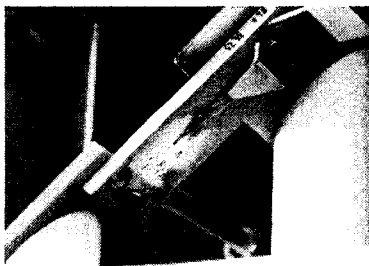


그림 5. 트래킹(경사평면법) 실험 장면

### 3. 결 론

하우징용 소재의 특성을 평가하기 위한 평가방법으로 서 코로나에 의한 열화 및 발수성, 내아크성, 내트래킹 성 등을 설명하고 평가결과를 해석하는 기술에 대하여 기술하였다. 여러 가지 평가기준에 의하여 평가를 하여 도 재료의 특성에 따라서 각각 적용하는 방법이 다르다. 또한 특성 향상을 위하여 배합처방을 하더라도 그것이 다른 특성에는 나쁜 영향을 미치므로 여러 가지의 특성 에 가장 적합한 배합처방이 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] D. H. Han, H. Y. Park, D. P. Kang, H. G. Cho, "Effects of Added Silicone Oils on the Surface Characteristics of SIR", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 2, p. 323, 2002
- [2] 한동희, 조한구, 강동필, 민경은, "코로나 방전에 따른 실 리콘 고무의 표면특성", 전기전자재료학회논문지, 15권, 2호, p. 133, 2002
- [3] Y. Hirano, T. Inohara, M. Toyoda, H. Murase, and M. Kosakada, "Accelerated Weatherability of Shed Materials for Composite Insulators", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 1, p. 97, 2001.
- [4] D. H. Han, H. Y. Park, D. P. Kang, and K. E. Min, "Tracking and Erosion Resistance and Hydrophobicity of HTV Silicone Rubber for Outdoor Insulators", Proceedings of 6th ICPADM, p. 354, 2000.
- [5] H. Deng and R. Hackam, "Low Molecular Weight Silicone Fluid in RTV Silicone Rubber Coatings", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 1, p. 84, 1998.
- [6] J. W. Chang and R. S. Gorur, "Surface Recovery of Silicone Rubber Used for HV Outdoor Insulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 6, p. 1039, 1994.
- [7] H. Homma, T. Kuroyagi, and K. Izumi, "Diffusion of Low Molecular Weight Siloxane from Bulk to Surface", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 3, p. 370, 1999
- [8] X. Wang and N. Yoshimura, "Fractal Phenomena Dependence of Hydrophobicity on Surface Appearance and Structural Features of SIR Insulators", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 6, p. 781, 1999.
- [9] R. S. Gorur, J. W. Chang, and O. G. Am-burgey, "Surface Hydrophobicity of Polymer used for Outdoor Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, p. 1923, 1990.
- [10] 허창수, 연복희, 조한구, "HTV 실리콘 고무에서 열화인 자에 따른 저분자량 성분과 표면 발수성의 변화", 전기전 자재료학회논문지, 12권, 1호, p. 1, 1999.
- [11] 박영국, 이윤석, 정수현, 장동욱, 임기조, "옥외 액자용 재료의 표면 전기전도 특성", 전기전자재료학회논문지, 11 권, 10호, p. 758, 1998.
- [12] H. Hillborg and U. W. Gedde, "Hydrophobicity Recovery of Polydimethylsiloxane after Exposure to Corona Discharges", Polymer, Vol. 39, No. 10, p. 1991, 1998.