

# Composite Insulator의 적용 및 진단기술 현황

박 강 식\*, 이 병 성\*\*, 한 상 욱<sup>\$</sup>, 이 덕 출<sup>\$\$</sup>

(\*대덕대학 전기과 교수, \*\*한전 전력연구원 전력계통연구실 연구원,

<sup>\$</sup>충남대 전기공학과 교수, <sup>\$\$</sup>인하대 전기공학과 교수)

## 1. 서 론

기존의 옥외용 절연물은 내후성이 우수한 자기 및 유리를 소재로 하였고, 국내의 송전 및 배전계통에 있어서도 대부분의 옥외용 절연물은 porcelain이 적용되어 왔다.

그러나, 최근 고분자 재료기술의 발달과, 제조기술의 발달에 따라 내열성(thermal resistance), 내후성(weathering resistance) 등이 우수한 고분자 재료들이 개발 및 생산되어 다양한 전기절연분야에의 적용이 크게 증가하였다.

특히, 옥외절연의 경우 옥내에서와는 달리 다양한 기후 및 오손조건에 노출되게 된다. 따라서, 소수성(hydrophobicity)을 포함하는 표면의 재질 및 특성, 형상(profile), 그리고, 오손정도 및 오손물질 등이 절연성능에 막대한 영향을 줄 수 있고, 우수한 표면 소수성을 지니는 고분자 절연재료가 보다 우수한 절연특성을 보일 수 있다.

뿐만아니라, 복합 고분자 애자는 적용에 있어서도 기존의 porcelain에 비해 많은 장점을 지니고 있어, 신규의 배전 및 송전선로에서 사용량이 급격히 증가되고 있다. 실제로, 유럽, 북미, 호주 등에서는 이미 복합 고분자 애자의 적용이 일반화되었으며, 일본의 경우도 spacer, arrestor, insulation arm 등에 있어서는 제한적으로 적용되고 있다. 한편, 각종의 전기설비에 있어서도 기존의 자기재 부싱을 대신하여 고분자 재료의 부싱이 적용되는 추세에 있다.

최근에는, 수십년의 적용경험을 축적한 유럽 및 북미지역을 중심으로 고분자 애자의 오손성능이 자기재 애자보다 우수하다는 결과를 발표하고 있으며, 이러한 경향에 따라 국내의 해안선로에 있어서도 복합 고분자 애자의 적용이 점차 확대되고 있다.

그러나, 복합 고분자 애자의 재료는 기존의 자기 및 유리에 비하여 화학적 안정성이 크게 뒤진다. 실제로, 대부분의 유기계 고무는 약 300[°C]에서 열분해 현상이 일어나며, 비교적 높은 에너지를 갖는 자외선과 같은 광에 의한 분해도

발생된다.

또한, 옥외에 적용될 경우 다양한 기후 및 오손조건에 노출되게 되고, 전기누설과 표면의 오손 및 습윤 상태에 따라 방전, tracking, erosion등의 현상이 발생한다. 일반적으로, 이러한 복합적인 원인에 의해 표면 재질의 변화가 발생하고, 전체적인 절연성능의 감퇴로 이어진다. (그림 1. 참조)

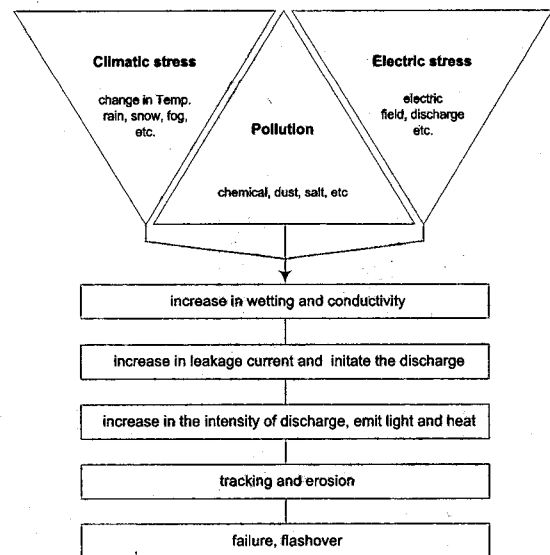


그림 1. 복합고분자 애자 외피의 열화메커니즘

즉, 다양한 재료기술 및 제조기술의 발달과 성능향상에도 불구하고, 아직 까지도 명확하게 해명되지 않은 문제들이 있고, 많은 전력회사들은 복합고분자 애자의 장기적인 성능에 대한 의문을 가지고 있다.

본 논문에서는 복합고분자 애자의 국내외 적용 현황과 수명예측 및 열화 평가를 위해 사용되고 있는 다양한 진단 방법에 대해 소개하였다.

## 2. 복합고분자 애자의 적용

### 2.1 복합고분자 애자의 재료

옥외용 복합고분자 애자의 사용 역사는 대략 50년 정도이며, 애자의 재질이나 조성은 다양하다. 현재 애자의 갖 재료로 주로 사용되고 있는 고분자 재료는 SiR(silicone rubber), EPDM(ethylene propylene diene monomer), EPR(ethylene propylene rubber), EPM(copolymer of ethylene propylene), alloys of EPDM and silicone, EVA(ethylene vinyl acetate), cycloaliphatic 등이다.

이들 고분자 재료는 단독으로 옥외용 절연재료로 사용할 경우 원하는 성능을 얻기 어려울 뿐만 아니라, 원재료비의 상승을 가져오게 된다. 따라서 제조시 충전제와 수많은 첨가제를 사용하게 된다. 갖 재료의 조성에서 트래킹 및 침식에 대한 저항과 기계적 성능을 향상시키기 위해 충전제(filler)를 첨가하게 되는데, 충전제로 많이 사용되고 있는 재료는 ATH, silica 등이 사용된다. 이외에도 요구성능을 만족시키기 위해 산화방지제, 가소제, 난연제, UV 안정제, 안료, 가교제, 촉매 가동조제 등과 같은 수많은 첨가제를 사용하고 있다.

복합고분자 애자를 사용하고 있는 22개 전력회사에 대한 STRI (Swedish Transmission Research Institute)의 통계에 따르면 애자에 적용되는 재료의 비율로 보면 그림 2에서와 같이 49% 정도가 실리콘 고무재질의 애자를 사용하고 있었으며, EPDM이 35%를 차지하였다.

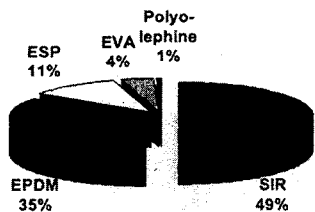


그림 2. 재질에 따른 분포

### 2.2 복합고분자 애자의 적용

많은 전력회사에서 복합고분자 애자를 사용하는 주요한 이유는 것은 다음과 같다.

- 설치가 용이
- 중량이 가볍다
- 오손성능이 좋다
- 유지 보수 비용이 적게 든다.

또한, 조사에 의하면 설치비용 면에서 기존의 자기제에 비해 80% 이하로 경제적인 적으로 나타났다.

복합고분자 애자가 적용되는 개소에 대한 STRI의 통계에 따르면 그림 3에서와 같이 복합고분자 애자는 내부에 큰 인장력에 견딜 수 있는 FRP 코어가 들어 있으므로 현수애자 형태로 많이 사용되고 있다.

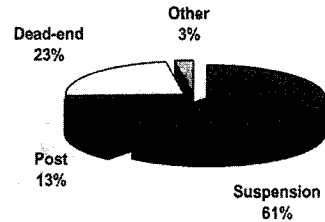


그림 3. 형태에 따른 적용도

표면의 누설거리별로 살펴보면 우수한 표면 오손 특성을 보이고 있는 실리콘 애자의 경우는 자기제 보다 짧은 누설거리로 설계되어 사용되고 있으며, EPDM 재질의 애자의 경우는 자기제 보다 다소 긴 누설거리를 갖도록 설계되었다. 그리고 다양한 현장에서 적용 경험 데이터로부터 해안이나 심한 공업 오염지역에서는 실리콘 재질의 애자의 사용이 많으며 EPDM을 적용할 경우 보다 긴 누설거리를 갖게 할 필요가 있는 것으로 나타났다.

전세계적으로 복합고분자 절연재료의 대부분은 송전급 및 배전급 현수애자가 차지하고 있으나, 라인포스트애자, 피뢰기나 스페이서 등에 일부 사용되고 있는 실정이다. 최근들어 일본에서는 복합고분자 절연재료를 피뢰기에 적용하여 사용하고 있으며 특성이 기존의 자기제에 비해 우수하다고 판단되어 그 수요가 증가하고 있는 추세이다.

## 3. 열화진단 기술

절연물의 열화정도를 정확히 판정하기 위해서는 재료 및 제품의 특성분석과 전기적 특성의 평가를 위한 실험이 동시에 이루어져야 한다. 즉, 재료의 특성변화를 전기적 특성의 변화와 관련지어 평가함으로써 절연성능을 개선하기 위한 방향으로 대부분의 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 설명의 편의를 위해 재료 및 제품의 특성을 평가하는 방법을 다음과 같이 구분하여 설명하기로 하였다.

- specimen test : tracking test와 같이 재료간의 비교평가를 주목적으로 하며 시료를 주 대 상으로 하는 시험법
- chamber test : salt fog test와 같이 옥외환경(열화요인) 모의를 통한 재료 및 제품의 특성평가를 주목적으로 하는 시험법
- outdoor test : 실제의 옥외 환경에 노출된 경우의 결과를 specimen test 및 chamber test의 결과와 비교 검토하기 위한 시험법

### 3.1 Specimen test

고분자 재료의 열화특성을 평가하기 위한 방법으로 CTI(comparative tracking index, IEC 60112), 경사판시험법(IEC 60587), RWDT(rotating wheel dip test, IEC 61302) 등이 대표적인 시험방법이다.

RWDT는 Merry-go-round라고도 불리우며 원형틀에 시료 및 제품을 방사상으로 수직 배치하고 원판의 하부가 염수에 잠기도록 한 구조로서 모터를 이용하여 원판을 일정 속도로 회전시켜 일정시간동안 물속에 잠기게 한 후 물밖으로 나와 정점 부근에서 짧은 시간동안 전압을 인가하는 방법이다. 이 방법은 염무 시험이나 다른 복합 시험법에 비해 비교적 간단히 시험할 수 있기 때문에 일반적으로 많이 이용되고 있는 시험법이다. 그림 4는 RWDT 장치의 개략도를 보이고 있다.

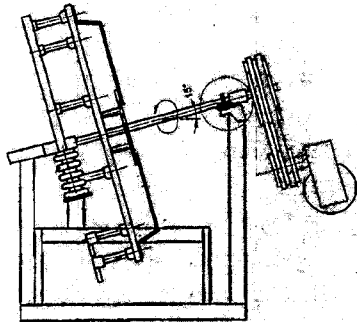


그림 4. RWDT 장치의 개략도

### 3.2 Chamber test

본 절에서는 앞서 밝힌바와 같이 dust cycle method, dry salt layer 등과 같은 STRI의 오손시험법을 설명하기로 하겠다.

#### 3.2.1 DCM (Dust Cycle Method)

DCM은 그림 5와 같이 2시간을 1주기로 하는 오손시험법으로 그림 6과 같은 시험장비가 사용된다.

Voltage	[Active]																							
Dust contamination	[Active]																							
Fog	[Active]																							
Rain	[Active]																							
Drying	[Active]																							

2 hours

그림 5. One cycle of Dust Cycle Method



그림 6. Overview of the STRI dust chamber

Dust Cycle Method에 있어서 측정항목은 다음과 같다.

- cycles until flashover

- ESDD/NSDD level
- leakage current
- hydrophobicity, STRI guide 92/1
- etc. (video, photo)

이와 유사한 형태의 시험방법으로는 IEC 61109의 주기시험법을 들 수 있으나, 단순한 온도, 주수, 분무의 반복이 아니라라는 측면에 있어 Dust Cycle Method가 진일보한 것이라 할 수 있다.

Humidity	[Active]																							
Heating 50[°C]	[Active]																							
Demineralized rain	[Active]																							
Salt fog 7 [kg/m³]	[Active]																							
Solar rad. simul.	[Active]																							
Voltage $U_m/\sqrt{3}$ [kV]	[Active]																							

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

그림 7. Accelerated weather aging cycle of IEC

#### 3.3.2 DSL (Dry salt layer method)

Dry salt layer method는 해안의 조건을 모의한 실험방법으로 염이 직접적으로 영향을 미칠 경우의 특성을 평가하기 위한 방법이다.

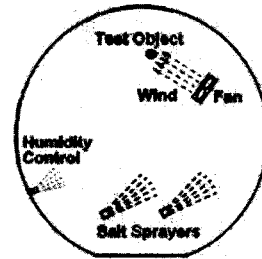


그림 8. Schematic diagram of DSL test

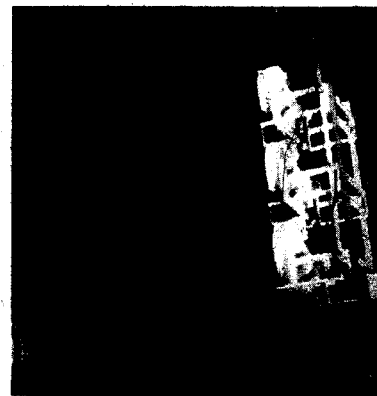


그림 9. DSL testing set-up

### 3.3 Outdoor test

경사판 시험법이나 RWDT(rotating wheel dip test)등과 같은 초기의 육내시험방법은 주로 재료나 제품의 간의 상대적인 특성을 평가하는데 사용되었다. 이후 salt fog chamber

를 비롯한 각종의 복합열화시험설비의 출현으로 비교적 실제의 경우와 근사한 평가결과를 얻을 수 있게 되었다. 그러나, 그러한 방법에 따른 평가방법의 경우 신뢰성의 한계를 지니게 된다. 따라서, 옥내시험과 옥외시험을 동시에 수행하거나, 옥외의 환경에 장기간 적용된 시료와 옥내에서의 가속열화과정을 거친 시료들 상호간의 연관성을 통해 평가 및 진단하는 것이 일반적이다. 다음의 그림 10은 STRI의 옥외시험설비를 보이고 있다.

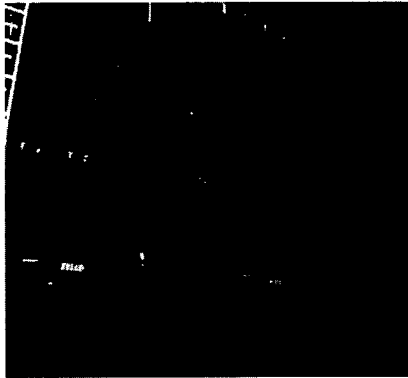


그림 10. Outdoor testing station of STRI

#### 4. 결함검출기술

복합 고분자 애자의 결함검출방법은 자기 및 유리아자의 경우와 매우 상이하다. 이러한 특성은 복합 고분자 애자의 경우 자기 및 유리아자와는 달리 접촉을 위한 금구가 다수 존재하지 않는다. 즉, 전계의 분포가 상대적으로 비선형적이고 갭간의 거리가 훨씬 짧다. 설치이전의 결함검출 기술은 다음과 같다.

- resistance measurement by a Megger
- partial discharge(PD) detection (IEEE Std. 4)
- radio influence voltage(RIV) measurement (NEMA 107)
- leakage current measurement
- elevated voltage application
- etc.

설치이전의 결함검출 기술은 일반적으로 현장에서의 적용이 곤란하여 효율적인 방법으로 제시되고 있지 못하다. 또한 대부분의 전력회사들은 현장에 설치되어 있는 복합 고분자 애자의 열화정도 및 결함검출을 원하고 있다.

설치이후 복합 고분자 애자의 결함검출방법은 크게 다음과 같이 구분될 수 있다.

- visual
- corona discharge monitoring
- IR thermography
- acoustic emission
- electric field measurement

STRI의 경우, 가장 효과적인 결함검출을 위하여 거리, 고도 및 기후조건을 포함하는 최적의 조사조건 및 방법을 도

출하기 위해 다음과 같은 방법에 대한 비교검토를 수행하고 일부 결과를 보고하고 있다.

- heat or IR
- radio frequency interference (RFI)
- electric field measurement
- visual detection of electrical discharge

이들 방법에 대한 연구결과 수분의 침투가 없는 경우 복합 고분자 애자의 검출이 불가능한 것으로 밝혀졌으며, IR과 UV camera를 사용한 방법이 가장 효과적인 방법으로 밝혀졌다. 또한, tracking의 흔적이 가장 쉽게 검출되는 것으로 밝혀졌다.

#### 4.1 visual method

현재 대부분의 전력회사에서 간편하게 열화 및 교체 판정 방법으로 육안조사 방법은 제시하고 있다. 이 방법을 적용할 경우 어느 정도 복합고분자 애자에 대한 기본적인 지식을 가질 필요가 있다. 현장에 설치되어 있는 복합고분자 애자의 열화 진단을 위해 육안 관찰하는 방법은 다음과 같은 특징에 관심을 두고 판정하고 있다.

- loss of hydrophobicity
- tracking and/or erosion of shank, sheds or rod
- corona cutting of shank and/or sheds
- UV produced severe cracking/alligatoring
- deformation of housing due to hydrolysis
- exposed rod
- punctures
- damaged end seals

#### 4.2 vision corona discharge monitoring

image intensifier를 이용하면 애자 표면에서 발생하는 방전현상을 감지해 낼 수 있다. 연속적이고 안정화 된 방전현상은 갭재료의 상당한 침식을 일으킬 수 있다. 부분방전에 의해 방사되는 대부분의 에너지 파장은 300 ~ 380 [nm]로 UV-A 파장 범위에 해당한다. 따라서 육안관찰이나 일반 카메라를 이용해서는 감지해 낼 수 없다. 따라서 여기에 사용된 렌즈는 UV를 감지할 수 있는 것을 사용하여야 한다.

이 기법은 밤에만 사용될 수 있고 이 장비를 이용하여 진단할 때 방전 현상이 있어야만 쉽게 검출해 낼 수 있으므로 상당한 불편을 야기한다. 최근에는 낮 시간에도 검출 가능한 코로나 검출 카메라에 대한 연구가 활발하다.

#### 4.3 Infra-Red thermography

자연 상태에서 애자가 열화되면 표면의 전계집중이나 누설전류가 증가하게 된다. 이는 애자 표면에서 열이 발생되게 하는 원인이 된다. 이를 검출하기 위해 사용된 것이 적외선 열분석기(Infra-Red thermography)이다. 이를 이용한 경우 지상에서도 애자의 건전상태를 판단할 수 있으며, 애자의 열화된 부분이나 정도까지도 검출해 낼 수 있다.

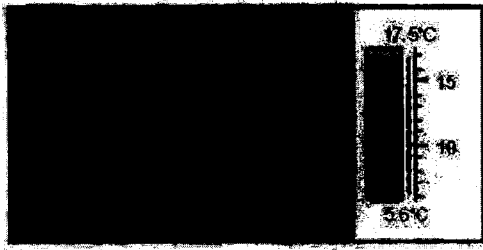


그림 11. Example of IR thermography.

#### 4.4 electric field measurement

애자의 길이 방향으로 전계 분포를 측정하여 결합 상태를 검출하는 방법이다. 대체로 전계 분포는 결합이 있는 위치에서 다소 급격한 변화를 갖게 된다. 프로브를 애자의 길이 방향으로 이동하면서 측정하고 이를 컴퓨터를 이용하여 분석하게 된다. 그러나 이 방법은 프로브를 설치하기 위해 애자 근처까지 접근하여야 하는 불편함이 있다.

결론적으로 정확한 결합 검출을 위해서는 위에서 언급한 방법 하나를 단독으로 이용하는 것보다 2, 3개를 병행해서 비교 검출해 내는 방법이 적당하다. 또한 이들 방법들은 애자 표면의 미소한 방전현상이나 온도 증가, 전계불균일 등을 검출해내기 때문에 애자의 결합과 관계없는 신호까지도 검출하는 경우가 많으므로 이를 이용하기 위해서는 수많은 측정 경험과 숙련이 필요하다.

### 5. 결 론

이상에서 밝힌바와 같이, 최근 복합 고분자 애자가 기존의 porcelain 및 glass 애자에 비해 우수한 특성을 지님을 보이는 결과들이 보고되고 있으며, 유럽 및 북미지역을 중심으로 하여 배전급에의 적용이 이미 일반화되었고, 송전급에의 적용을 위한 기술적 수준이 이미 확보된 것으로 보인다.

우리나라의 경우에도 실선로에의 적용이 최근 수년간의 기술력 확보를 통해 확대되고 있어 절연기소재 분야의 국산화에 크게 기여할 것으로 보인다.

그러나, 복합고분자 애자의 재료적 특성(유기질)을 이해하고, 우리나라의 기후 및 환경에 적합한 평가 및 진단방법을 구축하는 한편, 장기적 신뢰성 확보 및 적용의 확대를 위한 지속적으로 연구가 요구되어 진다.

#### 참고문헌

[1] T. kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao. "Survey on the Use of non-ceramic composite insulator". IEEE Trans. Vol. 6 No.5, 1999  
 [2] E.A. Cherney and D.J. Stonkus, "Non-ceramic Insulators for Contaminated Environments", IEEE Trans. PAS, Vol. 100, pp.131-142, Jan. 1981  
 [3] N. Yoshimura, S. Kumagai "Electrical and Environment Aging of Silicone Rubber Used on Outdoor Insulation"

IEEE Trans. Vol. 6 No. 5, Oct. 1999.

[4] Claude de Tourreil, Research project aims to qualify in-service techniques to detect impending failures of non-ceramic insulators, Insulator News & Market Report, July August, 1998  
 [5] Guide for visual identification of deterioration & damages on suspension composite insulators, STRI Guide 5, 98/1  
 [6] Outdoor Insulators, Ravi S. Gorur, Inc., 1999  
 [7] Nam Ho Choi, Kang Sik Park, Sang Ok Han, Degradation characteristics of the Outdoor Insulation Material by Salt Fog, ISEIM, August 1998  
 [8] Nam Ho Choi, Kang Sik Park, Sang Ok Han, Aging effects of EPDM due to UV and salt fog, ICEE, July 1998  
 [9] Nam Ho Choi, Kang Sik Park, Sang Ok Han, The influence of ingredients and topographical effect on the properties of contamination, ICEE, August 1999  
 [10] Nam Ho Choi, Kang Sik Park, Sang Ok Han, Degradation characteristics of composite insulator materials under artificial contamination condition, ICEE, August 1999

### 저 자 소 개



#### 박강식(朴康植)

1959년 8월 20일생. 1986년 대전산업대학 졸업. 1988년 인하대 전기공학과(석사). 1993년 인하대 전기공학과 졸업(공학). 1993년-현재 대덕대학 전기과 교수.



#### 이병성(李丙成)

1968년 8월 17일생. 1993년 충남대 졸업. 1995년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 1995년-현재 한전전력연구원 연구원.



#### 한상옥(韓相玉)

1946년 5월 12일생. 1974년 충남대 공학사. 1978년 단국대 공학석사. 1986년 인하대 공학박사(전기공학). 1978년-현재 충남대 전기공학과 교수.



#### 이덕출(李德出)

1939년 1월 22일생. 1963년 인하대 전기공학과 졸업. 1966년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년 일본 나고야 대학 전기공학과 졸업(공학). 현재 인하대 전기공학과 교수.