

송배전용 고분자 애자의 설계와 열화시험

이운용, 조한구, 임기조  
한국전기연구소 전략기술연구단, 충북대학교

The Design and Aging Test of Polymer Insulator for Power Transmission and Distribution

Un-Yong Lee, Han-Gu Cho, Kee-Joe Lim  
KERI, Chungbuk National University

**Abstract** - Recently polymer insulators are being used for outdoor high voltage applications. Polymer insulators for transmission line have significant advantages over porcelain and glass insulators, especially for ultra-high voltage(UHV) transmission lines. In this paper, the design trend and method polymer insulator are investigated and Aging test method is analysed to know life time of insulator.

기 위한 코로나 링이 금구쪽에 제조되거나, 반도전 물질이 계면에 접촉되기도 한다. 이러한 고분자 애자는 전기적 성능과 기계적 성능을 갖추어야 하는데 이들 특성에는 외피재료, FRP 특성 이외에 외피재료와 FRP 접촉계면, 단말금구와 FRP의 접촉계면도 큰 영향을 미친다.

1. 서론

애자는 가공전선을 지지물로부터 전기적으로 절연하는 장치로, 각종 조건에 관련된 외력과 전선을 지지하기 위한 중량 등에 대해서 기계적 강도 및 내구성이 있어야 한다. 송배전용 애자로서는 현재 주로 자기애자가 주를 이루고 있으며, 부분적으로 고분자 애자가 대체되고 있다. 기존의 자기 절연물은 기계적 강도, 가공성 및 표면 절연성의 측면에서 취약하여 절연성, 가공성 및 기계적 강도가 우수한 고분자 하우징이 점점 사용이 증가하고 있다.

고분자 애자의 경우 절연재료의 트래킹과 부식성능이 중요하며, 금구의 단말처리 및 전계집중 완화 또한 중요하며, 고분자 하우징의 설계 또한 중요하다. 하지만 아직까지 이러한 부분들이 정립되지 않아 많은 연구가 필요한 실정이다. 고분자 애자의 수명을 평가하기 위한 열화시험의 경우도 IEC 61109, CEA 트래킹 시험 등 여러 국제규격에 따른 연구를 많은 제조업체나 연구소에서 실시하고 있으나 아직 명확한 결론을 얻고있지 못하다<sup>1)</sup>.

본 논문에서는, 고분자 애자의 설계경향과 방법, 문제점에 대해서 분석하였으며 또한 가속열화시험의 경향, IEC 61109, CEA 트래킹 시험실시에 따른 결과와 문제점, 애자의 열화를 평가하는 방법 등에 대해서 기술하였다.

2. 고분자 애자의 설계

2.1 고분자 애자의 구조

그림 1과 같이, 가공선로용 고분자 애자는 기계하중을 견디는 FRP 코아와 FRP를 보호하고 표면누설거리를 확보하기 위한 고분자 하우징(외피고무), 지지물과 전선을 연결하는 단말금구로 구성된다. 또한 전계집중을 완화하

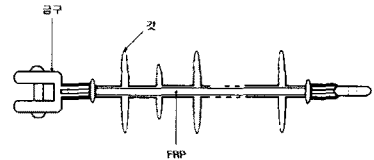


그림 1. 고분자 현수애자의 구조

2.2 고분자 애자의 설계

애자의 설계는 전기적 설계와 기계적 설계로 나뉘는데, 본 논문에서는 전기적 설계부분을 다룬다. 고분자 애자의 전기절연 설계의 경우 고분자 하우징(외피재)의 오손내전압 특성과 뇌임펄스 내전압 특성 등을 고려해야 한다. 오손 내전압 성능은 계통에서 발생하는 일선지락시의 건전 상대대지전압으로 나타내는 최고전압에 대해서 각 갯형상 고분자 절연재료가 가지는 오손시 내전압 특성을 나타낸다. 이 특성에 따라 소요누설거리가 결정되며, 이에 대한 갯형상과 절연간격이 결정된다. 오손도에 적합한 갯형상 설계방법은 IEC 60815 「Guide for the selection of insulators in respect fo polluted conditions」에 지정되어 있다<sup>2)</sup>. 그 다음에 소요 코아 길이를 결정하고 소요 뇌임펄스 내전압특성을 결정해야 한다.

갯형상 설계면에서, 현재 국내외의 경우 자기애관과 같은 기준으로 설계하고 있지만, 실제 자기재보다 고분자 외피재의 경우가 내전압성능이 약 1.5배 정도 더 우수하다는 보고도 있다<sup>3)</sup>. 만약 외피재의 누설거리가 과다설계될 경우, 그만큼 재료비용이 더 들어가기 때문에 적절한 설계가 매우 중요하다. 현재 개발 사용되고 있는

배전용 고분자 현수애자의 경우, 각 제조회사 마다 누설거리, 갓두께, 갓 돌출거리 등이 다르다. 어떤 제품은 지나치게 규격을 벗어나는 것도 있으며, 어떤 제품은 갓 고무두께를 너무 두껍게 해 필요이상의 고무가 소비되는 것으로 나타났다.

갓의 보호 누설경로는 고분자 애자의 트래킹과 부식성능에 중요한 역할을 한다. 갓의 형상설계는 다양한 설계 개념이 있다. 바람과 비에 의해 오손이 자연적으로 세정되기 위한 공기역학적인 형상, 수분층에 대해 우수한 내성을 가지는 외피재료의 선택, 누설전류의 크기를 제한하기 위한 누설거리 증대 등 여러 가지가 있다.

갓의 형태는 일반적으로 규칙각과 교대갓으로 설계할 수 있다. 규칙갓의 경우에는 강우시 전교되는 현상을 억제하기 위하여 갓과 갓 사이의 거리가 30~40mm 이상이 되도록 해야한다. 교대갓의 경우에는 두 개의 연속적인 갓 돌출거리, 즉 큰 갓과 작은 갓이 교대로 돌출하므로 갓 돌출거리의 차이에 의해 전교현상을 억제할 수 있다. 큰 갓 돌출과 작은 갓 돌출거리의 차이는 >15mm로 한다.

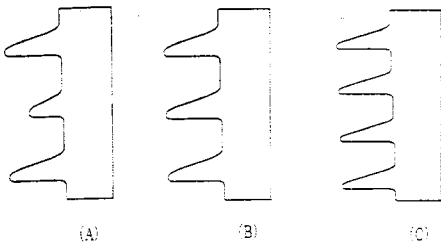


그림 2. 갓형상

그림 2는 건조섬락 거리가 동일한 3종류의 갓 형상을 나타내고 있다. 이들의 A, B, C 3종류의 하우징의 누설거리는 A<B<C의 순이며, 누설거리의 크기가 클수록 섬락전압이 낮은 경향이 있으며 이 때문에 적당한 갓 형상을 선정할 필요가 있다<sup>14)</sup>.

### 2.3 애자의 설계해석

설계애자에 대한 컴퓨터를 이용한 수치해석은 일반적으로 기계적 응력해석과 전계해석 등이 있다.

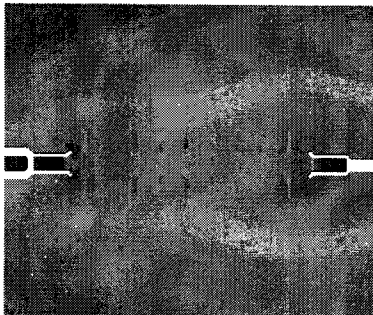


그림 3. 애자의 전계분포 해석  
애자의 경우, 전계해석을 통해 단말금구 형상에 대한 전

계분포, 전체적인 애자의 전계분포, 누설거리에 따른 전계분포, 오손물질에 따른 전계분포, 계면에서의 전계분포 등을 알아볼 수 있다. 그림 3은 배전용 고분자 애자에 대한 전계해석한 예를 나타낸다.

### 2.4 고분자 애자의 제조방법

고분자 애자의 외피고무 성형방법에는 일체성형, 갓 및 동부 단독성형, 외피단독성형 등이 있다. FRP와 단말금구의 접속방법에는 압착접속, 썸기접속, 수지충진 접속 등이 있다.

## 3. 애자의 열화시험

### 3.1 인공가속 열화시험법

고분자 애자는 유기재료를 사용하고 있기 때문에 사용 환경하에서 자외선, 오손, 습윤등의 각종 환경인자나 누설전류, 국부방전, 코로나 방전등의 스트레스에 의해 경년열화가 생긴다.

고분자 애자의 장기성능 평가방법으로는 전기 절연·환경을 대상으로 한 가속열화시험이나 기계적성능시험이 제안되고 있다. 전기절연·환경에 대한 가속열화시험방법으로서는 표 1에서와 같은 IEC 규격을 비롯하여 세계 각 기관에서 각종 스트레스를 조합하여 가속배율로서 10~20배정도가 상정되는 시험방법이 제안되고 있다<sup>15)</sup>.

표 1. 고분자 애자의 인공가속열화 시험방법

시험법	인가전압	복합 스트레스	시험시간	휴지시간 (유, 무)
IEC 61109	14~20 kV (34.6 mm/kV)	염무	1000 h	무
IEC 61109 Annex C	50 kV/mm (20.8 mm/kV)	염무, 강우, 습도, 온도, 자외선	5000 h	무
CEA 트래킹 율 시험	35 kV/mm	염수	30000 cycle (192초/cycle)	무 - 유
ENEL 5000 h 시험	공칭대지 전압	염무, 강우, 습도, 온도, 자외선	5000 h	유
EPRI 열화시험	공칭대지 전압	염무, 강우, 무, 자외선, 기계하중	21일 (기후조건 모의)	유

인공가속열화 시험은 열화조건이 실사용 환경에서의 조건과 유사하여야 한다. 그러나, 시험효율의 향상을 목적으로 열화조건에 설정에 있어 과도하게 스트레스를 부여하게 되면 시험의 타당성을 잃게 된다. 또한 인공가속 열화시험의 타당성을 검증하기 위해서는 이들 시험과 병행하여 과전폭로시험을 시행하여야 한다. 즉, 열화상태에 대한 가속시험과 폭로시험의 비교가 필요하다. 인공 오손시험이 갖추어야 할 필요한 조건은 자연과의 등가성 (Representativity), 반복재현성 (Reproducibility), 간편성 (Simplicity) 등으로 재현성이나 필드와의 등가성의 평가가 중요하다.

### 3.2 열화상태 평가방법(진단방법)

고분자 애자의 인공가속열화 시험 후에는 열화 정도를 평가하여야 한다. 열화평가방법은 시료의 외관상태, 중량, 표면 오손물질의 조사, 표면분석, 오손내전압시험, 상용주파수주성락시험, 뇌임펄스성락시험, 인장파괴하중시험, 굴곡내하중시험등이 있다. 각각의 시험에 대한 내용

을 정리하면 다음과 같다.

- ① 외관상태 : 부식·트래킹의 유무, 초킹·크랙의 유무  
갓관통의 유무, 변색 등의 특이현상
- ② 중량 : 중량의 변화
- ③ 표면 오손물의 조사 : 부착물의 조성 및 부착량
- ④ 표면분석 : 탈수성 및 표면거칠기의 변화, 표면의 화학구조 변화, 원소분석에 따른 표면층의 열화상태(표면의 Si/Al비)
- ⑤ 오손내전압 : 오손내전압의 변화
- ⑥ 상용주파주수성락전압 : 성락전압의 변화
- ⑦ 뇌임펄스성락전압 : 성락전압의 변화
- ⑧ 인장파괴하중 : 파괴하중의 변화
- ⑨ 굴곡내하중 : 계면의 변형, 내하중의 저하

### 3.3 IEC 61109와 CEA 트래킹열 열화시험

본 연구에서는 IEC 61109 Annex C에 기초를 둔 복합환경 열화시험결과와 CEA 트래킹열 시험결과를 비교하였다<sup>16)</sup>. 먼저 IEC 61109 Annex C 시험에서 미열화 샘플과 열화샘플에 대한 누설전류를 분석한 결과 미열화 샘플의 경우 0.1mA 이하의 값이 측정되었으며, 열화샘플의 경우 수~수십 mA의 값이 측정되었다.

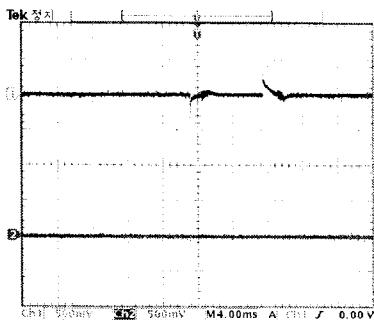


그림 4. 미소물꽃방전시 오실로스코프 측정파형 (상단: 열화샘플, 하단: 미열화 샘플)

그림 4는 미소물꽃방전이 나타났을 때 오실로스코프로 측정된 누설전류 파형이다. 또한 시험애자의 갓표면의 탈수성을 평가하기 위해 누설저항을 측정된 결과 그림 5와 같이, 갓의 바깥쪽 표면이 열화가 많이 된 것으로 판정되었다. 이는 미소물꽃방전이 갓바깥쪽 표면에서 주로 일어났기 때문인 것으로 사료된다.

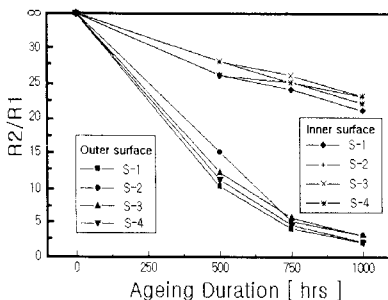


그림 5. 애자표면의 누설저항

CEA 트래킹열 시험결과에서는 그림 6과 같이, 주로 열화된 부위가 애자의 parting line에서 나타났으며, 구멍이 생긴 샘플도 있었다. 이는 애자제조시 parting line 부위에서 충전제의 불균일한 분포에 의한 것으로 사료되며, 따라서 parting line의 제거를 위한 애자제조 방법의 개선이 필요하다.

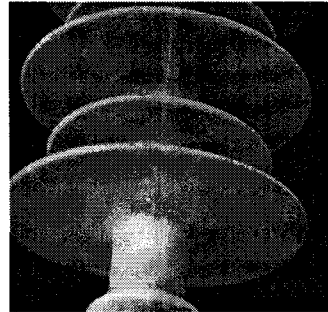


그림 6. 트래킹열 시험결과

## 4. 결 론

1. 고분자 애자의 전기적 설계는 외피재의 오손내전압과 뇌임펄스 내전압 특성을 고려하여 설계한다.
2. 고분자 애자의 누설거리 및 갓두께의 경우 규격보다 과다하게 설계되는 경우가 많다. 경제성을 고려하여 고무량을 최소로 설계하는 것이 바람직하다.
3. 애자의 전계해석을 통해 설계모델에 대한 전계분포 뿐만아니라, 금구 및 계면에서의 전계완화 해결책을 강구할 수 있다.
4. 애자의 인공가속열화시험으로 IEC 61109시험과 트래킹열 시험을 시행하여 그 결과를 비교한 결과, 전자의 경우는 애자의 갓 바깥쪽 표면에서의 열화와 누설전류의 증가 등이 나타났으며, 후자의 경우는 애자의 parting line에서의 열화가 주로 나타났다.
5. 가속열화시험에서의 시험결과와 과전폭로 시험에서의 시험결과와의 상관성을 비교함에 따라 시험의 타당성과 수명평가예측이 가능할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Jeffrey J. Kester et al., "Multi-stress Aging Tests of Polymer Housed Surge Arrester", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 13, No. 2, April 1998
- [2] IEC 815, "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions", 1986
- [3] J.L. He et al, "Protective Effects to Lighting Overvoltages of Polymeric Arresters for AC Railroad Vehicles", ICEE, Vol.1, pp.808, 1998
- [4] 한국전기연구소, "피뢰기의 오손 및 기계적 설계해석", 산업자원부, 1999
- [5] 日本電氣學會, "複合絶縁の界面現象とその評價", 電氣學會技術報告, No. 694, 1998
- [6] Han-Goo Cho et al, "Multi-aging Test Technology for Estimating Long Time Performance of Polymer Insulators", ICPADM, 2000