



# 폴리머 애자의 신뢰성 확보 및 평가기법

박상호 | 한국전력공사 배전처 배전품질 팀장  
심은보 | 한국전력공사 배전처 배전품질 과장

본 논문은 2007년 5월 브라질 Rio De Janeiro에서 세계 전력용 애자 및 폴리머 제조업체, 전력회사, 연구 기관 등 전문가 약 500여명이 참석한 가운데 진행된 『2007 World Congress & Exhibition on Insulators, Arresters & Bushings』에서 한국전력 배전처 심은보 과장이 ‘폴리머애자의 신뢰성 확보 및 평가기법’이란 주제로 배전용 폴리머애자의 도입배경, 폴리머 애자의 신뢰성 제고관련 각종제도, 가속열화시험 및 옥외실증시험장 도입현황, 폴리머 애자의 장기신뢰성 확보방안 등에 대하여 발표한 내용 중에서 발췌한 것임을 알려드립니다.

## 1. 서 론

우리나라에 배전용 폴리머 애자가 처음 도입된 것은 약 15년 전으로 그 이전부터 폴리머 애자는 전 세계적으로 좋은 평가를 받고 있었지만, 국내환경에서의 신뢰성에 대한 검증이 되지 않아 널리 사용되지 못하고 있었다. 이에 따라 한전은 폴리머 애자의 신뢰성에 대한 검증을 위해 경년변화 및 수명평가에 관한 연구를 수행하였다.



폴리머 애자 시험에 대한 국제규격(IEC 61109<sup>1)</sup>)은 모든 계통운영 조건을 충분히 반영하지 못하고 있으며 시험 파라미터가 개선되어야 할 점이 있기 때문에 한전은 관련연구를 통하여 1999년에 독자적인 가속열화시험 방법을 개발하였고, 우리나라의 특수한 운영 환경을 시뮬레이션 할 수 있는 복합가속열화설비를 구축하였다.

실험실에서의 복합가속열화시험 결과와 실제 배전선로에 설치된 애자의 분석결과를 비교함으로써 폴리머 애자의 신뢰성을 평가하였으며, 폴리머 애자의 신뢰성과 경년변화 특성을 검증한 후 우리나라 배전계통에 폴리머 애자의 확대사용을 추진하였다.

## 2. 배전계통의 폴리머 애자 도입

가공 배전선로의 폴리머 애자는 자기제 애자의 오염과 품질저하로 인해 발생하는 고장을 감소하기 위해 도입되었다. 폴리머 애자는 성능이 우수하고 구매가격이 저렴하며 주로 오염지역에서의 섬락방지에 효과적이므로 사용량이 증가하게 되었으며 현재 한전에서 폴리머 애자 총 구입액은 전체 애자시장에서 90% 이상을 차지하고 있다.

폴리머 애자의 하우징 재료로는 주로 EPDM<sup>2)</sup>과 실리콘 고무를 사용하고 있다. 2000년대 초반까지는 실리콘 고무 소재의 높은 가격 때문에 EPDM 소재가 사용되었지만 현재는 실리콘 고무 애자가 주로 사용되고 있다.

한전은 그동안 약 1,000만개의 폴리머 애자를 배전선로에 설치하였으며, 피뢰기, 라인포스트애자, 부상, 차단기 등 폴리머 재료를 사용하는 각종 기자재들을 배전선로에 적용하고 있다.

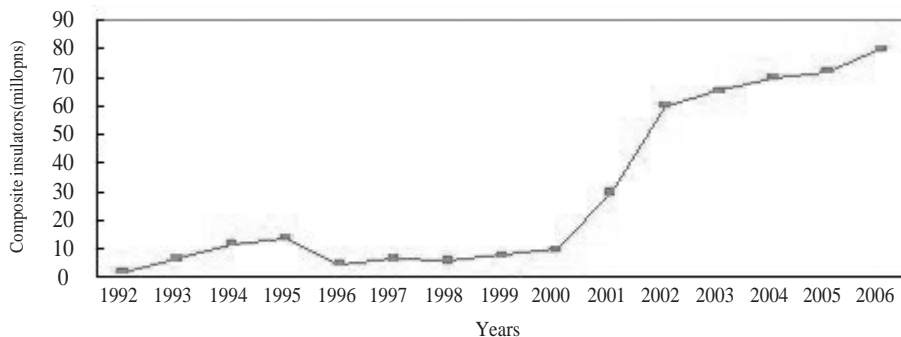


그림 1. 연간 폴리머 애자 사용 추이

1) IEC 61109(Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria)

2) EPDM : Ethylene Propylene diene Monomer(에틸렌과 프로필렌을 혼성중합시켜 얻은 비결정성(非結晶性) 고분자물질)



폴리머 애자를 실제 배전계통에 적용하기 위해서는 성능에 대한 평가가 요구되며 신개발된 애자는 가혹한 환경 조건에서 일정기간의 시험사용이 필수적이다. 현장에서 시험사용이 완료되면, 성능평가를 위해 시험사용된 애자와 신품의 특성을 비교하는데, 이런 성능평가는 애자의 기계적, 화학적, 전기적 분석을 포함하며 현장설치 환경을 시뮬레이션하는 복합가속열화시험을 통해 애자의 성능변화를 측정한다. 시험결과가 구매규격의 요구사항을 충족하지 못하면 현장에 설치되어 사용될 수 없게 된다.

### 3. 폴리머 애자의 신뢰성 및 수명평가 기술

폴리머 애자의 수명을 예측하기 위해, 우리나라의 환경적 스트레스를 시뮬레이션 할 수 있는 복합가속열화시험 장비가 개발되었다. 복합가속열화시험은 IEC 61109 Annex C를 보완하여 개발된 시험방법에 따라 수행되며, 이 시험을 통해 전기적 특성, 열화, 부식, 발수성, 표면 열화특성을 나타내는 지표인 누설전류 등을 비교함으로써, 폴리머 애자의 수명을 평가한다.

#### 3.1 재료 분석

폴리머 애자의 내오손 특성이 좋은 이유는, 수분 및 오염물질이 많은 환경에서 애자표면(Housing & Shed)의 발수성이 좋기 때문이다. 그러나 폴리머 재료의 결합력이 약하면 사용기간 중에 전기적, 환경적 복합요인 때문에 애자표면의 발수성이 상실될 수 있다. 따라서 이러한 복합요인을 평가하기 위해 2001년부터 한전 전력연구원은 매년 현장에 설치된 폴리머 애자에 대한 조사 및 경년변화 시험을 수행하였으며 시험 후에 변화된 애자표면의 특성을 분석하고 일반 애자와 비교 분석하였다.

#### 3.2 복합가속열화시험(Combined Accelerated Ageing Test) 도입

##### 3.2.1 복합가속열화시험 방법 및 설비

복합가속열화시험 설비는 IEC 61109에서 정한 방법에 기본을 두고 만들었으며 시험 설비의 외형과 내부 구성은 그림 2에 나타나 있다. 애자가 설치되는 Chamber는 부피가 10m<sup>3</sup>이며 자외선, 인공 강우, 온·습도, Salt fog,

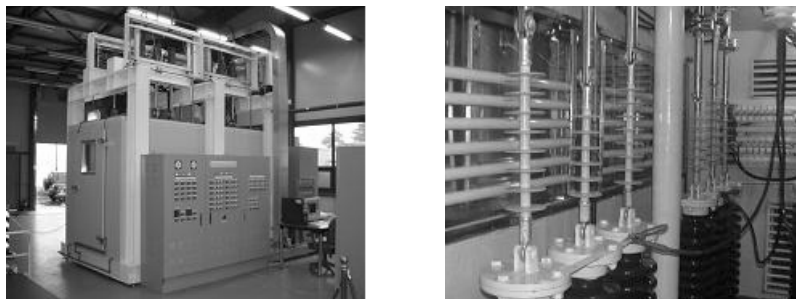


그림 2. 복합가속열화시험 설비



인장 스트레스 및 전기적 스트레스 등의 열화특성을 시뮬레이션 할 수 있다. 이 설비는 한번에 최대 35kV급 폴리머 현수애자를 16개까지 시험할 수 있으며, 12개의 시료는 수직으로 설치되고 4개는 수평으로 설치된다.

그림 3에 표시된 열화시험 사이클은 하계 및 동계 시뮬레이션 사이클 시퀀스를 포함하고 있다. 그러나 기후환경의 지역적 차이 때문에 스트레스 레벨과 열화시험 사이클의 조합이 IEC 61109와는 다소 다르다. 시험 사이클은 하계 사이클 10일과 동계 사이클 11일로 구성되며 우리나라 30년 기상 데이터와 기후 패턴 분석을 통해 만들어졌다. 각 요소에 대한 스트레스 레벨은 다음과 같다.

- 최대 테스트 전압 : 1.1 U<sub>0</sub> kV(상전압, U<sub>0</sub>)
- 온도/습도 : 15~50°C/60~95%(하계), -5~15°C/30~60%(동계)
- 자외선 : 1mW/cm<sup>2</sup>, UV-B 타입 형광 램프
- 인장 강도 : 2.4톤 (33% SML)
- 담수 강우 : 15~50 μs/cm, 4mm/min
- Salt fog : 4,000 μs/cm
- 열화시험 시간 : 3,000 시간

Salt fog									
강우									
온도/UV									
전압									
인장강도									

시간  
(A) 하계 사이클

Salt fog									
강우									
온도/UV									
전압									
인장강도									

시간  
(B) 동계 사이클

그림 3. 복합가속열화시험 사이클



### 3.2.2 복합가속열화시험 시행

복합가속열화시험에 사용된 폴리머 애자는 표 1에 나타나 있다. 16개의 시료가 실험 Chamber에 설치되었으며, 시료의 하우징 재료는 EPDM 고무와 실리콘 고무이다.

표 1. 복합가속열화시험에 사용된 시료

시료번호	누설거리(mm)	하우징 재료	샘플 수	제조사
No. 1	785	EPDM	4	외산
No. 2	822	EPDM	4	국산
No. 3	898	EPDM	4	국산
No. 4	834	실리콘	4	국산

3,000시간의 열화시험 동안 열화특성을 파악하기 위해 누설전류를 측정하였으며 복합가속열화시험 후에 시료에 대한 육안검사와 전기적 특성검사를 수행하였다. 모든 시험결과는 해안지역에서 4~12년 동안 설치되었던 같은 종류의 애자나 신품 애자와 비교하였다.

### 3.2.3 복합가속열화시험 후 폴리머 애자의 평가

복합가속열화시험으로부터 EPDM 애자의 발수성 상실은 실험 시작 후 50시간 후에 두드러지게 나타났음을 알게됐다. 매 500시간마다 육안검사를 통해 하우징의 변화를 체크하였는데 500시간 후의 이런 변화들은 4년 동안 현장에 노출된 폴리머 애자에서 관찰된 것과 비슷하게 나타났다. 3000시간 후에는 부식, 애자표면의 트래킹, 변색과 같은 경년열화 특성이 염해가 심각한 지역 배전선로에 13년 동안 설치된 애자와 비슷하게 나타났다.

#### a) 육안 검사

그림 4는 3,000시간동안 복합가속열화시험 설비에서 열화된 폴리머 애자의 사진이다. 시료의 애자 갓(Shed)에 약간의 손상이 발생했으며 EPDM 시료는 금형라인에 가벼운 부식과 하우징 변색, 하우징/금구 접촉부위의 천공(Puncture)이 발생했다. 하우징/금구 접촉부위의 천공은 제조결함 때문인 것으로, 하우징과 금구 접촉부위의 빈

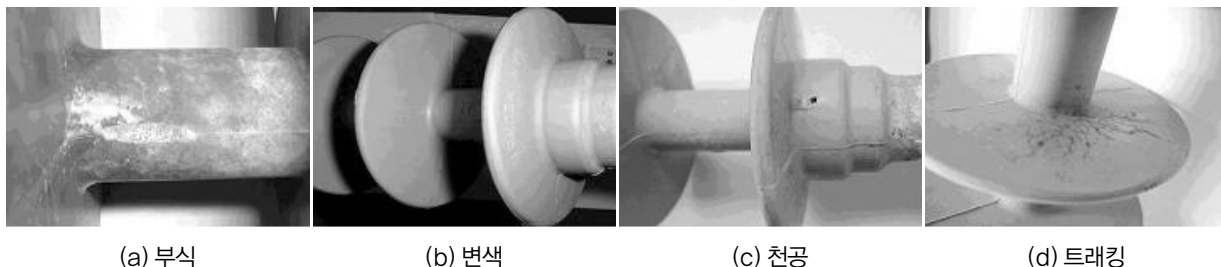


그림 4. 3000시간 복합가속열화시험 후 애자 손상



공간이 열화시험 사이클동안 온도변화에 의해 확장되었고 전기적 스트레스에 의해 구멍이 생긴 것으로 추측된다.

b) 섬락 전압 시험

3,000시간 열화시험 후에 IEEE 1024<sup>3)</sup>에 따라 섬락전압 시험을 하였으며 시험 결과는 표 2에 나타나 있다. 모든 시험 시료는 수직 설치된 상태에서 시험되었으며 건조 섬락전압과 뇌 임펄스 전압은 원래 애자와 3,000시간 열화된 것 사이에 거의 변화가 없었다. 주수 섬락전압에서는 뚜렷한 변화를 보였는데 이것은 3,000시간 열화된 시료의 표면 발수성 감소에 기인한 것이다.

표 2. 복합가속열화시험 후 섬락전압 시험 결과

시험항목		시료			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
건조	열화 시험전	151	158	161	162
섬락전압(kV)	3000시간	151	169	159	166
주수	열화 시험전	129	132	138	148
섬락전압(kV)	3000시간	110	115	118	129
뇌 충격	열화 시험전	223	245	242	253
섬락전압(kV)	3000시간	218	247	245	251

표 3은 현장 선로에서 12년 경과된 폴리머 애자의 섬락전압 시험 결과이다. 실제 선로에서 열화된 폴리머 애자의 경우 주수 섬락전압은 실험실에서 3,000시간 열화된 것보다 약간 높았다. 현장에서 철거한 애자는 양호한 기후 조건에 설치되어 있었기 때문에, 폴리머 하우징의 자체 방수특성이 회복된 것으로 보인다.

표 3. 현장철거 폴리머 애자의 섬락전압 시험 결과

시험항목		시료			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
건조 섬락전압(kV)		144	-	159	163
주수 섬락전압(kV)		115	-	129	133
뇌 충격 섬락전압(kV)		225	-	275	257

- : 시험 미실시

3) IEEE 1024(RECOMMENDED PRACTICE FOR SPECIFYING DISTRIBUTION COMPOSITE INSULATORS)



### c) 누설전류 측정

3,000시간 동안 누설전류는 분당 3회씩 측정하였다. 그림 5는 열화시험동안 수직설치된 시료의 대표 누설전류 값을 보여주며, 최대 피크치는 하계 사이클의 Salt fog 분무시 나타났고 휴지기간 동안의 발수성 회복 때문에 1,500시간 근처에서 누설전류는 감소되었다.

그림 5에서 1번 시료는 다른 시료들보다 높은 누설전류 분포를 보이고 있는데 이는 발수성이 낮기 때문이다. 심한 백화(Chalking) 현상을 보인 1번 시료는 HC5 또는 HC6 클래스 정도로 발수성을 거의 상실했다고 볼 수 있다. 그러나 표면특성이 좋은 실리콘 고무로 만들어진 4번 시료는 누설전류에서 우수한 특성을 보여줌을 알 수 있다.

수평 설치된 시료의 누설전류는 수직 설치된 시료에 비해 낮은 누설전류 분포를 보여주는데, 이것은 하우스 갓의 차폐효과 때문으로 추정된다. 수직 설치된 시료의 애자 갓은 오염물질을 씻어주는 인공강우를 차단하지만, 수평 설치된 시료는 강우 사이클 동안 오염물질이 쉽게 씻겨질 수 있기 때문이다.

실제 배전선로에 설치되었던 폴리머 애자의 누설전류는 그림 6에 나타나 있다. 현장 설치되었던 시료의 누설전류의 측정을 위해 Salt fog가 2시간동안 시료에 분무되었는데, 누설전류의 크기는 3,000시간동안 열화된 시료에 비해 매우 낮게 나타났다. 이런 결과로부터 3,000시간 복합가속열화시험은 실제 배전선로에서 12년 경과된 것과 비슷하다는 결론을 내릴 수 있었다.

이것은 폴리머 애자 복합가속열화시험이 갖는 중요한 의미라 할 수 있다. 이 시험을 통해 현재 사용중인 제품의 향후 성능을 예측할 수 있고, 또한 다른 형태의 디자인과 재료구성을 가진 애자의 비교성능 지표로 활용할 수도 있다.

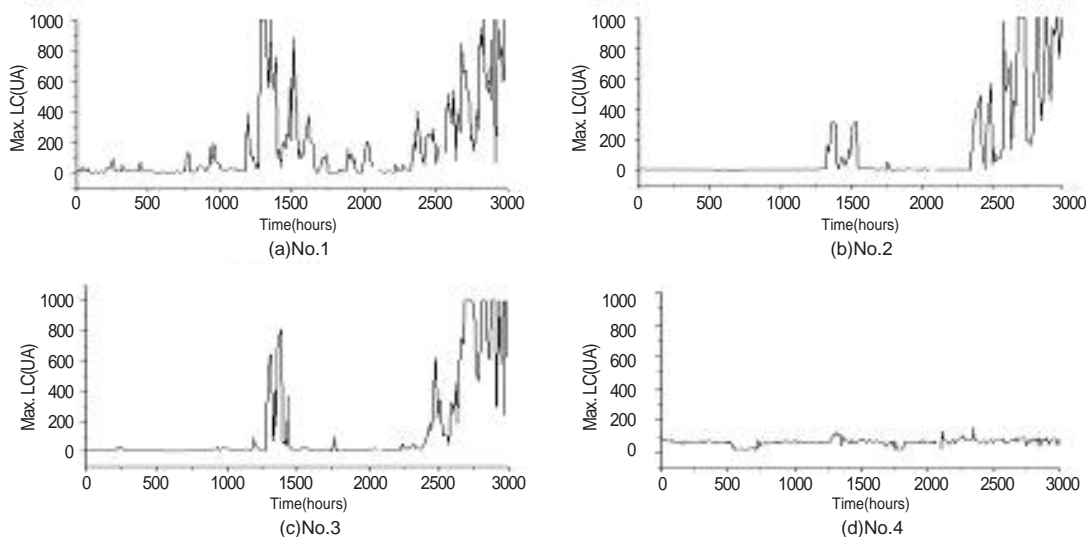


그림 5. 시험시간에 따른 누설전류 변화

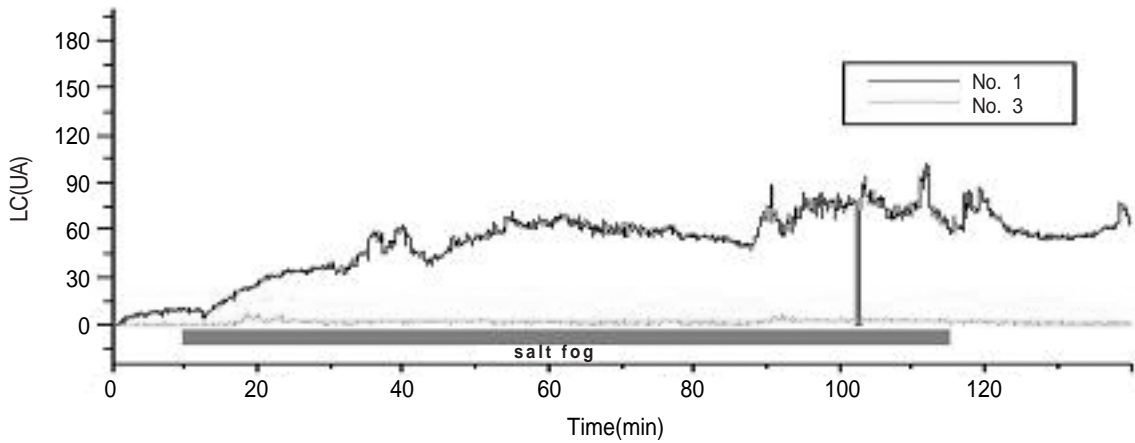


그림 6. 배전선로에서 경년변화된 폴리머 애자의 누설전류

### 3.3 폴리머 기자재의 옥외 실증시험장

실제 배전선로에서의 장기간 경년변화 특성을 평가하기 위해, 2002년에 오염이 심한 해안지역(고창)에 야외 실증시험장을 건설하였다. 이 시험장에서는 온도, 습도, 강우, 풍향 및 풍속과 같은 기후 데이터뿐만 아니라 폴리머 애자의 누설전류도 검출할 수 있다.

야외 시험설비에는 3종의 폴리머 애자, 2종의 폴리머 피뢰기, 1종의 라인포스트 애자가 설치되어 있으며, 전체 설치된 폴리머 애자는 다른 폴리머 제품을 포함하여 대략 120개 정도에 이른다.



그림 7. 폴리머 기자재 야외 실증시험설비

## 4. 실선로에서 경년변화된 폴리머 애자의 평가

### 4.1 폴리머 애자의 평가

한전은 정기적인 선로순시를 통하여 배전선로에 설치된 애자의 경년변화 진행여부를 모니터링 하고 있다. 배전선로의 폴리머 애자 경년변화 조사는 폴리머 애자의 채택, 적용, 유지보수를 위한 필수정보를 제공하고 있으며 폴





리머 애자의 수명을 연장하고 초기고장을 예방하기 위한 기본 자료로 활용될 수 있다.

폴리머 애자 도입초기에는 주로 북미지역의 제조업체에서 생산한 현수애자를 염해가 심한 해안지역의 배전선로에 설치되었는데, 설치년도 경과에 따른 신뢰성 검증을 위하여 1999년부터 매년 이 애자들을 발취하여 화학적, 전기적, 기계적 시험을 수행하여 경년변화 정보를 수집하였다.

### 4.1.1 육안검사

그림 8은 폴리머 현수애자의 경년열화 사진으로 폴리머 애자의 발취시험결과, 발수성 감소와 금구에서 약한 부식현상을 관찰할 수 있었다. 오염된 환경에서는 하우스징에서의 코로나 활동이나 누설전류의 증가가 하우스징의 부식과 천공을 가져오는데, 폴리머 애자의 발수성은 처음에 매우 낮은 등급(HC 6)이었지만, 실험실에서 2~3일 경과된 후에는 HC 5 등급까지 다소 회복되었다.

폴리머 애자의 금구접합에서 수분을 완벽히 제거하기 위해서는 기밀유지가 필요하다. 폴리머 애자 금구에서 부식진행은 기밀 손상을 가져오며, 설치후 얼마 되지 않아 코어를 통한 절연파괴를 일으킬 수 있다.

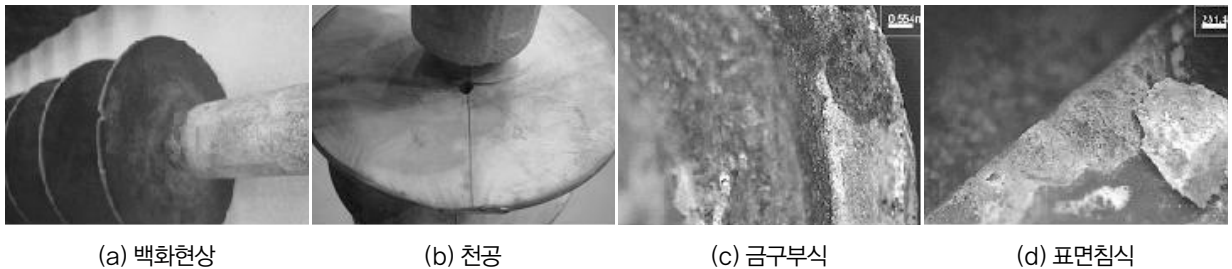


그림 8. 배전선로에 설치된 폴리머 애자의 경년열화 사진

### 4.1.2 하우스징 표면의 오염 레벨

그림 9는 해안지역에 설치되었던 EPDM 폴리머 애자와 자기제 애자의 ESDD<sup>4)</sup>를 측정 결과로 폴리머 애자의 경우 시간이 경과해도 오염레벨이 증가하지 않는데 반해 자기제 애자의 오염레벨은 폴리머 애자에 비해 훨씬 높게 나타나고 있다. 이와 같은 오염 레벨 측정결과로부터, 폴리머 애자의 내오염 특성이 자기제 애자에 비해 우수함을 알 수 있다.

4) ESDD : Equivalent Salt Deposit Density(등가염분부착밀도)

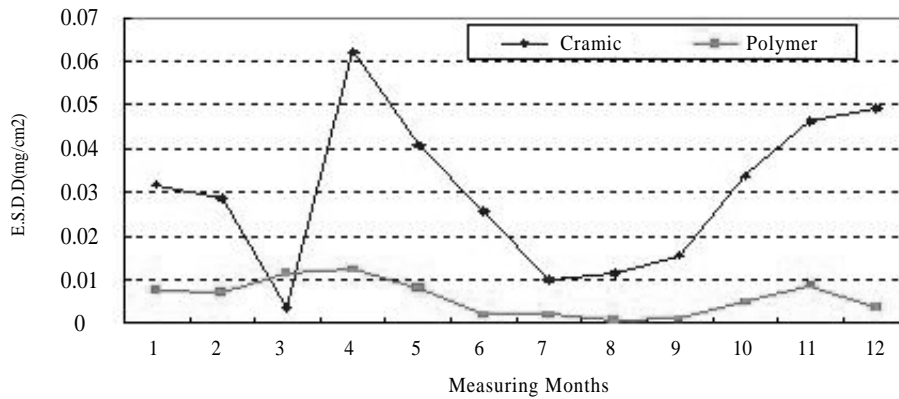


그림 9 폴리머/자기제 애자의 ESDD 측정결과

### 4.1.3 기계적 시험

기계적 강도시험은 애자 사용기간 동안 특정 기계적 부하로부터 얼마만큼의 강도감소가 있는지 체크하기 위해 수행된다. 폴리머 애자 금구의 접합부분을 통한 수분침투는 금구부식을 일으키는데 금구에 부식이 발생하면, 수분이 FRP 로드와 금구접촉면 사이로 쉽게 침투하게 된다. 또한 FRP 코어에 미세 크랙이 있으면, 기계적 진동에 의해 크랙은 처음 크기보다 더 커지게 되고 결과적으로 폴리머 애자의 기계적 강도 감소를 가져오게 된다.

### 4.1.4 화학적 시험

화학시험은 하우징 재료로 사용되는 EPDM 이나 실리콘 고무의 경년변화 정도를 진단하기 위해 수행된다. FTIR(Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy) 시험은 경년열화의 결과로 ATH(Alumina Tri-Hydrate)의 분해가 얼마만큼 일어났는지 확인하기 위해 시행하며, ESCA(Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) 기법은 애자표면의 바깥층 성분을 분석하는데 사용된다. 한편 SEM(Scanning Electron Microscopy) 기술은 표면구조와 Roughness를 연구하는데 사용된다.

### 4.1.5 전기적 특성 시험

Fractal dimension 분석은 폴리머 애자의 열화진행에 따라 표면 방전레벨이 증가하게 되는 현상을 응용하는 기법으로 복합적인 현상을 양자화 하는 개념이다. 폴리머 애자는 IEC 60587<sup>5)</sup>에 따라 오염된 물에 침전된 후 표면 방전을 위해 AC 45kV 전압이 인가되고 표면방전의 Fractal dimension 계산을 위해 표면방전 사진을 찍고 이미지 프로세싱 작업을 한다.

5) IEC 60587 : Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion



한번에 10회씩 총 3세트의 애자 방전시험이 진행되는 동안, 10회 방전시험 후에 24시간의 휴지기간이 주어진다. EPDM 하우징 애자의 Fractal dimension은 휴지기간 이후에도 증가하였지만, 실리콘 하우징 애자의 Fractal dimension은 휴지기간 후에 초기 수준으로 회복되었다. 이런 결과는 하우징 재료의 발수성 회복특성과 관련이 있으며 한전은 Fractal dimension과 애자 예상수명 사이의 상관관계에 대한 연구를 계속하고 있다.

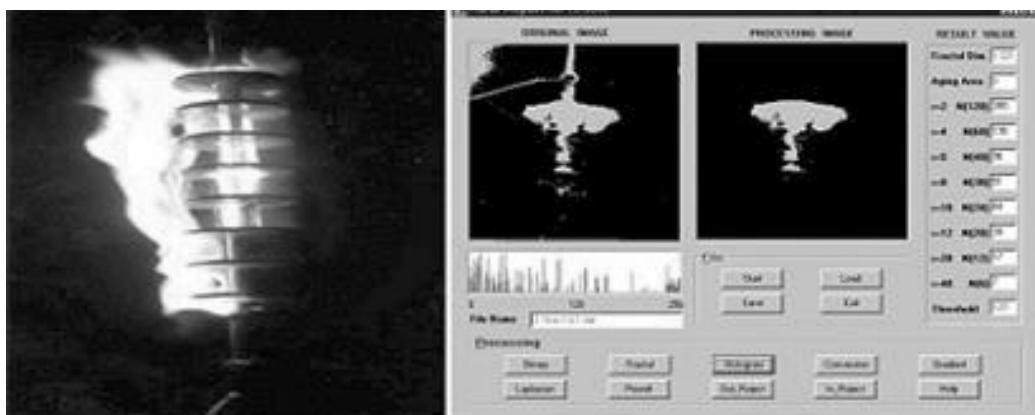


그림 10. Fractal dimension 분석을 통한 열화 평가

## 4.2 폴리머 애자의 고장사례

폴리머 애자는 지난 15년 동안 배전선로에 설치되어 사용되었지만, 2005년까지는 어떤 고장도 발생하지 않았고 이것은 폴리머 애자의 우수한 성능 및 가속열화시험, 옥외실증시험 등 신뢰성 검증 시스템을 갖고 있기 때문으로 이해될 수 있다. 그러나 최근에 일부 수입된 FRP코어의 결함 때문에 고장이 발생한 사례가 발생하였다.

그림 11은 FRP 코어에 함유된 수분에 의해 내부절연이 파괴되어 섬락이 일어난 사례이다. FRP 코어로의 수분 침투는 제조공정이나 코어의 부품 조립과정에서 FRP 코어의 미세 크랙에 의하여 발생할 수 있으며 미세 크랙은 수분침투를 용이하게 한다.

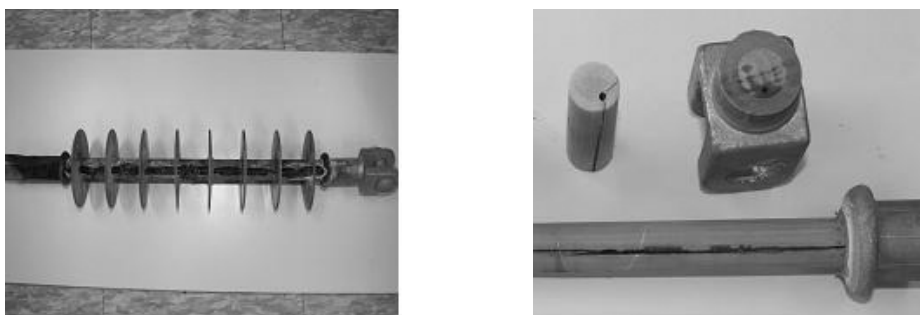


그림 11. FRP 코어의 절연파괴 사례



또한, 실리콘 재료로 만들어진 하우징 갓은 부드럽기 때문에 조류에 의해 공격받기 쉽다. 따라서 산간지역 배전선로에서 조류가 폴리머 애자의 갓을 공격하는 사례가 종종 발생하였다.

## 5. 향후계획

앞으로도 점점 더 많은 수의 폴리머 애자가 배전계통에 사용될 전망이므로 폴리머 애자의 신뢰성 확보는 매우 중요하다. 한전은 이를 위해 폴리머 하우징 재료의 경년변화 특성, 제조공정에서의 품질관리 시스템, 사용 중인 결합 제품을 찾아내는 유지보수 방법 등에 대한 문제점 분석 및 개선대책을 지속적으로 수립하고 있다.

한전은 배전선로의 모든 설비정보가 표시되어 있는 NDIS(New Distribution Information System) 구축으로 폴리머 애자의 설치정보를 파악하여 유지보수 및 교체를 손쉽게 수행할 수 있으며 앞으로도 폴리머 애자의 고장 데이터, 제조정보 및 이력정보까지 수집할 계획을 갖고 있다.

가공선로에 설치 운영중인 폴리머 애자의 대부분의 문제는 육안검사로 발견할 수 있다. 한전은 불량애자 검출을 위해 육안검사를 통한 일상점검을 수행하고 있는데 지상에서의 망원경을 통한 육안검사는 애자의 모든 방향을 관찰할 수 없기 때문에 불량 애자 검출에 한계가 있어 필요에 따라서는 직접 전주에 올라가서 검사를 수행하여야 한다. 폴리머 애자의 결합은 보통 유리섬유 로드(Rod)와 하우징 재료의 사이에서 발생하므로 코로나 카메라로 결합 애자를 찾아내는 것도 가능하므로 이에 대한 연구도 진행 중에 있다.

앞으로도 한전은 폴리머 애자의 신뢰성 향상 및 안정적인 전력계통 운영을 위하여 폴리머 애자류의 보관, 취급, 설치, 재사용 등 유지보수 기준 및 폴리머 애자의 시험, 검사, 진단 등 국내 환경에서 적합한 진단기준을 제정할 예정이다.



**박 상 호**

- 연세대학교 석사(전기공학)
- 한국전력 포항지점 배전운영부장
- 한국전력 수요관리실 수요기술팀장
- 한국전력 배전처 배전품질팀장(현)



**심 은 보**

- 연세대학교 학사(전기공학)
- 한국전력 부산지사 배전자동화과장
- 한국전력 배전처 배전계획팀 과장
- 한국전력 배전처 배전품질팀 과장(현)