

### 배전용 폴리머애자의 경년열화 실증연구

이재봉, 송일근, 이병성, 최선규, 권태호, 장상욱  
한전전력연구원

## A Verification Study on Annual Deterioration of Distribution Polymeric Insulators

J.B. Lee, I.K. Song, B.S. Lee, S.K. Choi, T.H. Kwon, S.O. Jang  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 폴리머애자는 기존 자기애자에 비하여 많은 장점을 가지고 있어 세계적으로 사용량이 증가하고 있다. 그러나 폴리머재질을 사용함으로써 열화과정을 거치게 되어 있다. 폴리머애자의 장기신뢰성 및 수명 예측을 위하여 본 연구에서는 복합가속열화시험장치에 의한 모의 열화시험, 현장 애자의 주기적인 발취 시험, 옥외 실증시험장에서 애자상태 감시 등을 통하여 폴리머애자의 장기신뢰성을 검증할 계획이다. 또한 새로운 장기 신뢰성 평가방법에 대한 연구도 진행될 것이다.

### 1. 서 론

국내 배전계통에 폴리머애자가 1995년부터 사용되기 시작한 후 여러 가지 장점에 따라 현재 신규 도입되는 물량의 90% 이상이 폴리머애자로 대체되고 있다. 그간의 연구개발 노력으로 폴리머애자의 성능은 그 품질이 안정되어 현재까지 폴리머애자의 불량으로 인한 사고는 보고되지 않고 있다. 그러나 폴리머재질의 특성상 자연환경 및 전기적 기계적 스트레스를 장기적으로 받기 때문에 열화과정을 필수적으로 거치게 된다.

폴리머애자가 장기적인 열화과정을 거치면서 수명이 다하게 되면 그 시점부터 폴리머애자의 고장이 빈발할 것으로 예상되므로 폴리머애자의 수명을 예측하여 적당한 시기에 폴리머애자를 교체하여야 할 것이다.

본 연구에서는 폴리머애자의 경년열화를 규명하고 적정 교체주기를 산정하기 위하여 자연환경의 가속 모의 실험을 위한 복합가속열화시험장치, 실제 자연환경에서의 열화감시를 위한 옥외실증시험설비를 구축하였으며, 또한 실제 배전계통에서 사용된 폴리머애자의 열화상태를 조사하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 폴리머애자 하우징의 열화기구

폴리머애자는 자연환경에서 가해지는 스트레스를 비롯하여 전기적 스트레스와 기계적 스트레스를 동시에 받게 된다. 폴리머애자 표면의 열화에 미치는 요소는 자외선, 염무(salt fog), 오손물질, 수분(강우 및 안개) 등이다.

태양광으로부터 조사되는 자외선은 표면의 화학결합을 분해하게 되는데 그 분해 정도에 따라 Chalking, Cracking, Cracking 등으로 분류한다. Chalking은 제조시 첨가된 충전제(filler powder)가 표면에 노출되어 하얗게 보이는 것을 말하며, Cracking은 표면에 미세한 크랙이 0.1mm 이하의 깊이로 생성된 상태를 말한다. 또 Cracking은 Cracking보다 더 심한 상태를 나타내며 깊이가 0.1mm 이상인 크랙 상태를 나타낸다.

해안가에 설치된 애자는 염무에 의하여 금구에 부식을 일으키고, 수분과 결합하여 누설전류를 증가시켜 열화를 촉진하게 된다.

표면에 누적된 오손물질도 역시 수분과 결합하여 누설

전류를 증가시켜 열화를 촉진하게 된다.

폴리머애자에 가해지는 전기적 스트레스는 오염된 표면에서 누설전류, 미소 방전, 트래킹, 섬락(flashover) 등을 일으켜 절연고장으로 이어지게 된다.

소량의 경우는 폴리머애자 표면의 오손물에 의하여 누설전류를 증가시키지만 충분한 경우는 오손물을 세정함으로써 표면의 상태를 개선시킨다.

#### 2.2 장기성능 평가방안

현재까지 국외의 연구 결과를 보면 폴리머애자의 주요 고장 원인은 제조당시의 결함에 의한 것으로 보고되고 있다. 따라서 불량제품을 제거하면 현장에 설치된 애자는 장기 신뢰성 확보가 가능하리라고 판단된다.

장기성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 4가지 방법을 적용하고자 한다.

- 현장 설치 전 불량제품 선별
- 주기적인 현장시료 발취 평가(매 3년)
- 옥외 폭로시험(실시간 상태 감시)
- 복합가속열화시험 적용

국산 제품은 사용기간이 5년 정도에 불과하여 아직까지 고장사태가 나타나지 않고 있다. 그러나 최근 초기 설치제품의 성능이 크게 저하되어 있어 조만간 고장이 발생한 제품이 출현할 것으로 예상된다.

#### 2.2 장기신뢰성 평가 시험설비 구축

폴리머애자의 장기신뢰성을 평가하기 위한 시험설비로서 복합가속열화시험장치, 옥외실증시험설비를 구축하였으며, 이들 설비에서의 시험결과와 현장에서 발취한 제품과의 시험결과를 상호 비교하여 폴리머애자의 평균수명을 예측하고 적정 교체주기를 산정할 계획이다.

##### 2.2.1 복합가속열화 시험장치

복합가속열화시험장치는 우리나라 30년 동안의 기후 데이터 통계와 국외의 시험장치 제작 사례를 바탕으로 폴리머애자의 열화에 영향을 미치는 온습도, 자외선, 주수, 염무, 인장력 등의 요인을 모의하여 단기간에 폴리머애자의 성능을 평가할 수 있는 시험장치이다.

전력연구원에서 지난 1999년부터 2001년까지 수행한 "배전용 폴리머애자의 신뢰성 평가 및 운용기준 제정"과제를 통하여 개발하였으며, 현재 폴리머애자의 시험사용제도를 대신하여 복합가속열화시험으로 신규 개발된 폴리머애자의 공급 유자격을 부여하고 있다.

연구과제의 수행과 공급자격부여를 위한 시험을 동시에 진행하기 위하여 2대가 가동되고 있다.

각 열화인자는 국내의 기후데이터와 국외의 사례를 바탕으로 결정되었다. 여름주기의 온도는 8월의 평균기온에 애자 표면의 온도 상승값을 고려하였으며, 겨울주기에는 저온이 열화에 미치는 영향이 적기 때문에 설비의 최저온도를 고려하였다. 습도는 여름주기의 고온시에 동시에 가습을 하여 95%이상의 습도가 되도록 설정하였

다. 겨울주기에는 건조한 날씨가 유지되므로 최고 60%에서 최저30%까지 적용하였다. 인장하중은 국외의 사례에서는 적용되지 않았던 열화인자이지만 온도변화에 따라 애자의 신장과 수축에 의한 기계력이 금구의 장악력을 약화시킬 수 있으므로 설계하중의 33%인 2.4ton을 인가하도록 하였다. 태양광선중 폴리머재료의 열화에 가장 영향이 큰 자외선중 ASTM G53의 UV-B, 파장 280~315nm의 자외선을 조사하도록 하였다. 실제 기상을 고려하여 기온이 상승할 때 동시에 자외선이 조사되도록 열화주기를 설정하였다. 인공비의 주수는 실제 강우시의 전도도를 측정하여 30~70 $\mu$ S/cm의 중간값인 50 $\mu$ S/cm를 적용하였으며, 주수량은 주수섬락전압시험시의 주수량을 적용하였다. 염무는 CEA 트래킹시험을 참조하여 염도를 2.5kg/m<sup>2</sup>로 설정하고, 염무량은 IEEE Std. 4 - 1995를 참조하였다. 이를 종합하여 표 1에 나타내었으며, 표 2에 가속열화주기를 나타내었다. 그림1은 복합가속열화 시험장치의 사진을 나타내었다.

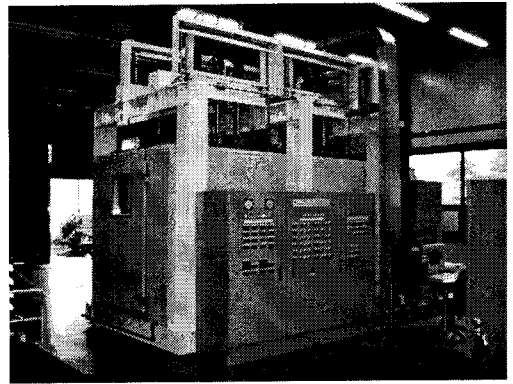


그림 1. 복합가속열화 시험 장치 외관

표1. 열화인자 및 시험조건

시험시간	3,000시간 연속시험
인가전압	14.9kV $\pm$ 10% 이내
온도/습도	여름주기 : 온도 50 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C, 습도 95% 이상 겨울주기 : 온도 5 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C, 습도 50% 이상
인장하중	2.4 ton(SML의 33%) $\pm$ 5%
자 외 선	ASTM G53 UV-B Lamp(파장 280 ~ 315nm)
주수(rain)	주수량 3mm/min, 주수각도 45 $^{\circ}$ , 전도도 50 $\mu$ S/cm 이하
염무 (salt fog)	공기압 80 psi $\pm$ 10%, 염도 2.5kg/m <sup>2</sup> 염수량 7 ~ 9 cc/min·m <sup>2</sup> 전도도 4000 $\mu$ S/cm $\pm$ 5% 이내

표2. 가속열화주기

열화인자	여름주기(10일 동안 반복)									
Salt Fog (4000 $\mu$ S/cm)										
Clean Water (30~70 $\mu$ S/cm)										
Temperature (t)	50	50	15	50	50	15	50	50	15	50
UV (B lamp)										
Humidity (%)	95	95	40	95	95	40	95	95	40	95
Voltage (14.9 kV)										
Tension (2400 kg)										
Time (h)		1		2		3		4		5

열화인자	겨울주기(11일 동안 반복)									
Salt Fog (4000 $\mu$ S/cm)										
Clean Water (30~70 $\mu$ S/cm)										
Temperature (t)	5	15	15	5	5	15	15	15	5	5
UV (B lamp)										
Humidity (%)	30	60	60	30	30	60	60	60	60	30
Voltage (14.9 kV)										
Tension (2400 kg)										
Time (h)		1		2		3		4		5

### 2.2.2 옥외실증시험설비

실제 배전계통에 설치된 폴리머애자의 상태감시는 현실적으로 많은 제약이 따르므로 별도의 시험장에 폴리머 애자를 현장과 유사하게 설치한 후 기상상태와 애자에 흐르는 누설전류를 상호 비교하는 방법이 국외에서도 많이 수행되고 있다.

본 연구에서는 전력연구원 고창 배전실증시험장에 옥외실증시험설비를 구축하여 배전급 폴리머애자를 설치하여 환경변화에 따른 애자의 상태를 감시할 계획이다.

본 설비는 서해안에서 약 150m 거리에 시설되어 있으며, 실제 전주의 높이인 13m 정도에 시료가 설치되도록 하였다. 본 설비에는 기상상태를 관측할 수 있는 설비와 폴리머애자의 누설전류를 측정할 수 있는 장비가 설치되어 실시간으로 폴리머애자의 열화상태를 감시하게 된다.

기상데이터는 기온, 습도, 자외선량, 강수량, 풍향, 풍속, 대기압, 이슬점온도 등을 측정하며, 폴리머애자에서는 누설전류를 실시간으로 측정하여 데이터를 저장한다.

옥외실증시험설비로부터 측정된 기상데이터와 누설전류 데이터를 함께 비교함으로써 폴리머애자의 열화에 미치는 환경 영향의 가중치를 세밀하게 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

현재 폴리머 현수애자 및 LP애자, 그리고 피뢰기를 각각 20여개 설치하고 13.2kV의 전압을 인가하였다. 그림 2에 옥외실증시험설비의 사진을 나타내었다.

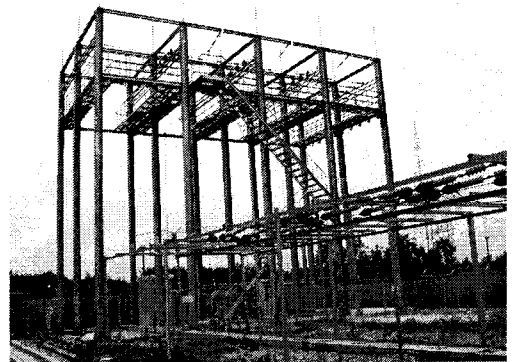


그림 2. 옥외실증시험설비

### 2.3 현장발취시료의 시험

본 연구에서는 위 두 가지 시험설비에서 열화감시를 수행함과 동시에 현장에서 사용중인 폴리머애자를 2~3년 주기로 발취하여 성능을 점검하게 된다.

폴리머애자가 설치된 여러 지역에서 사용 연도별로 시료를 발취하여 표면 발수성과 열화상태, 전기적 성능, 그리고 재료의 열화특성을 평가한다. 육안조사에서는

STRI의 CIS Guide에 의한 7단계의 발수성 평가와 Chalking, Cracking, 손상 등을 관찰한다. 전기적 시험은 ES 131의 6.1, 6.2 및 6.6에 의거하여 상용주파건조섬락전압시험, 상용주파주수섬락전압시험, 뇌충격섬락전압시험 등을 실시한다. 이를 통하여 전기적성능의 저하 정도를 평가한다. 또한 재료의 열화특성을 평가하기 위하여 SEM에 의한 표면상태 분석, FTIR에 의한 화학구조 분석, TGA에 의한 열분해 특성, DSC/OIT에 의한 산화특성 분석, DTA에 의한 유전특성 분석을 실시할 계획이다.

국외제품은 5 ~ 7년간 운전한 시료를, 국내제품은 3 ~ 4년간 운전한 시료를 발취하여 위와 같은 시험을 한 결과 국내의 제품 모두 EPDM 재질로서 발수성이 HC 47로 나타나 발수성을 거의 상실하였다. 국외제품의 경우 대부분 육안관찰에서 Chalking 현상이 관찰되었으며, 금구와 인접한 곳에서는 Cracking이 거의 모든 애자에서 관찰되었다. 한편 국산제품에서는 Chalking이나 침식과 같은 열화현상은 관찰되지 않았다. 이는 국외제품에 비하여 상대적으로 운전기간이 짧았기 때문으로 추정된다.

전기적 시험에서, 건조섬락전압시험에서는 신제품과 경년품 사이에 성능의 변화가 거의 없었으며, 주수섬락전압시험에서는 경년품에서 성능의 저하를 볼 수 있다. 이는 열화에 의하여 표면 발수성이 다소 저하되었음을 의미한다.

표3. 상용주파 건조섬락전압시험 결과 (단위: kV)

시료명 시료번호	국외 A	국내 A
신품 #1	144.2	157.3
신품 #2	147.3	151.2
신품 #3	146.9	154.5
경년품 #1	145.8	154.2
경년품 #2	142.6	153.6
경년품 #3	143.5	156.8
경년품 #4	148.8	157.2
경년품 #5	143.6	151.2
경년품 #6	141.5	153.5

표4. 상용주파 주수섬락전압시험 결과 (단위: kV)

시료명 시료번호	국외 A	국내 A
신품 #1	121.0	132.4
신품 #2	125.0	135.0
신품 #3	128.0	136.6
경년품 #1	108.8	128.0
경년품 #2	115.6	129.2
경년품 #3	110.5	119.2
경년품 #4	121.7	130.1
경년품 #5	115.3	128.4
경년품 #6	112.8	121.0

표5. 뇌충격섬락전압시험 결과 (단위: kV)

시료명 시료번호	국외 A		국내 A	
	정	부	정	부
신품 #1	251.0	316.3	289.8	346.9
신품 #2	257.1	314.3	281.6	336.7
신품 #3	263.3	328.6	281.6	336.7
경년품 #1	261.2	324.5	275.5	338.8
경년품 #2	255.1	320.4	279.6	336.7
경년품 #3	255.1	320.4	277.6	346.9
경년품 #4	251.2	323.5	278.5	336.8
경년품 #5	257.5	325.5	279.1	335.2
경년품 #6	251.0	321.0	276.6	347.0

주수섬락전압치의 차이는 애자 표면에 부착된 오손물의 영향과 표면 발수성의 영향을 동시에 받기 때문에 시료별로 편차가 큰 것이 특징이다.

뇌충격섬락전압시험 결과에서는 모두 양호한 결과를 보였으며, 성능의 저하도 감지되지 않았다. 이는 뇌충격섬락전압이 표면의 열화에 영향을 받지 않고, 애자의 형상과 관련이 있기 때문이다.

이와 같이 복합가속열화시험, 옥외실증시험, 현장시료 시험에 의한 데이터를 상호비교 및 분석함으로써 복합가속열화시험의 가속계수를 결정하고, 이를 통하여 폴리머애자의 장기성능을 단시간에 평가할 수 있게 될 것이다.

### 3. 결 론

본 연구에서 폴리머애자의 경년열화에 의한 장기성능을 평가하기 위하여 폴리머애자의 열화요인을 분석하고, 장기성능을 단시간에 평가할 수 있도록 폴리머애자 복합가속열화 시험장치를 구축하였으며, 옥외실증시험설비를 구축하여 폴리머애자의 열화상태를 실시간으로 감시할 수 있도록 하였다. 또한 현장에서 사용중인 폴리머애자의 성능을 주기적으로 평가함으로써 위 두 가지 시험설비에 의한 장기신뢰성 평가의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

폴리머애자의 현장 사용 기간이 짧기 때문에 아직 유효한 데이터가 수집되지 않고 있으나, 지속적인 연구에 의하여 복합가속열화 시험장치의 가속계수가 결정되면, 폴리머애자의 평균 수명을 예측할 수 있고, 그 추정된 수명에 따라 현장에 설치된 폴리머애자의 교체시기를 결정할 수 있게 될 것이다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] "폴리머애자 경년열화 실증연구" 1차년도 중간보고서, 산업자원부, 2003.8
- [2] Hydrophobicity Classification Guide, STRI, 1992
- [3] Raji Sundararajan, "Multistress Aging of Polymeric Insulators", 2000 Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 369-371, 2000