

경년열화에 따른 송전용 폴리머 현수애자의 표면 및 트래킹 성능

조한구, 이운용, 한세원, 한동희, 허종철, 최인혁
한국전기연구원, '전력연구원'

Surface and Tracking Properties of Polymer Suspension Insulator
for Power Transmission with secular variation

Han-Goo Cho, Un-Yong Lee, Se-Won Han, Dong-Hee Han, Jong-Chul Huh, In-Hyuk Choi
Korea Electrotechnology Research Institute, 'KEPRI'

Abstract - Recently, the polymer insulators that are used for high voltage applications have some advantages such as light weight, small size, vandalism resistance, hydrophobicity and easy making process. During outdoor service of polymer insulators, the surface of the insulating material is frequently subjected to moisture and contamination that lead to dry band arcing. Their tracking resistance, erosion resistance, end sealing and shed design are very important because dry band arcing causes degradation of polymer surface. The shape design of porcelain insulator is formalized but design standard for polymer insulator is no standardized up to now, much research is necessary in real condition.

In this paper, the surface and tracking properties of polymer suspension insulator for power transmission is investigated with ICP-AES, SEM, EDX, tracking wheel test and flashover voltage test. The diagnosis of insulator sample in tracking test has been analyzed by leakage current, STRI Guide and thermal image.

1. 서 론

우리나라 송전계통의 초고압용 애자는 99.4% 정도를 자기애자만을 사용하여 왔으나, 최근에는 폴리머 애자도 154kV 송전선로에 시험 설치하여 운전 중에 있다[1]. 특히, 송전용 폴리머 애자의 경우는 자기애자에 비해 가볍고, 내오손능력이 우수하고 대량생산이 가능하여 신뢰성만 확보할 수 있다면 향후 사용이 확대될 전망이다. 폴리머 애자의 신뢰성 평가를 위해 IEC 61109 시험(1000hrs, 5000hrs), 트래킹 휠 시험, ENEL 5000hrs 시험, EPRI 시험 등 다양한 가속열화시험 등의 방법이 연구되고 있다[2].

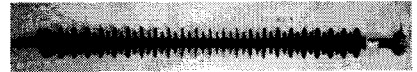
본 연구에서는 송전용 폴리머 현수애자 신제품과 이미 약 5년 정도 설치된 폴리머 현수애자 경년품에 대한 표면의 오손물질 및 열화 특성을 ICP, SEM, EDX 등의 기법을 통하여 분석 검토하였다. 또한 신제품, 경년품의 폴리머 애자를 시험, 시료로 제작하여 CEA 트래킹 휠 시험을 통해 트래킹 성능을 평가하였다. 시험 진행에 따른 열화진단 기법으로는 누설전류, 발수성, 온도 분포, 육안 검사 등을 통해 각각의 폴리머 애자의 열화특성을 검토하였다.

2. 실험방법

1999년에 154kV 선로에 시사용으로 설치된 송전용 폴리머 현수애자는 국외 A사 제품으로 일반형, 내오손형 두가지 형상이 적용되었다. 하우징 재료는 실리콘 고무이며, 송전선로 축 금구에 코로나링이 취부된 애자이다.



(a) 일반형 신제품



(b) 내오손형 경년품

그림 1. 송전용 폴리머 현수애자

송전용 폴리머 애자의 프로필을 표 1에 나타내었으며, 일반형 및 내오손형 애자의 형상을 그림 1에 나타내었다. 경년품 애자는 2003년에 철거된 시료이다(약 5년 설치, 철거장소: 순천, 포항 T/L).

표 1. 애자의 프로필

애자종류	갓 수	갓 간격	전장[mm]	누설거리 [mm]
일반형	큰 갓:22	30	1700	3480
	작은갓:21			
내오손형	큰 갓:23	30	1790	4090
	작은갓:23			

2.1 오손물 분석

2.1.1 ICP-AES

경년품 폴리머 애자 표면의 오손물질을 분석하기 위하여 MIBK 용액을 이용하여 표면 오손물질을 제거해 낸 뒤, 제거된 용액의 무기물 성분을 ICP-AES를 통해서 정량 분석하였다. 분석 대상의 위치는 애자 전체의 중간 부분에 있는 갓 표면이다.

2.1.2 SEM 및 EDX 분석

경년품 애자의 표면 열화 상태를 검토하기 위해 신제품 및 경년품 애자에 대해서 SEM 및 EDX를 분석하였다.

2.2 트래킹 휠 시험 및 섬락전압시험

154kV용 송전용 폴리머 현수애자의 신제품 및 경년품에 대한 트래킹 성능을 평가하기 위해 CEA 트래킹 휠 시험을 실시하였다[3]. 시험 시료는 일반형 신제품 2개와 일반형 경년품, 내오손형 경년품 각각 1개씩 총 4개의 시료(누설거리 814mm)를 준비하였다. 그림 2의 시료 1, 2는 일반형 신제품이며 시료 3은 일반형 경년품, 시료 4는 내오손형 경년품을 나타내었다. 또한, 신제품 및 경년품에 대해서 뇌충격 섬락전압, 상용주파전조섬락전압, 상용주파주수 섬락전압시험 등을 검토하였다.



(a)일반형 신제품(시료 1) (b)일반형 신제품(시료 2)



(c)일반형 경년품(시료 3) d)내오손형 경년품(시료 4)

그림 2. 트래킹 필 시험 시료

폴리머 현수애자의 고전압이 인가되는 쪽에 설치되는 코로나링의 효과도 검토할 계획이었지만, 코로나링을 설치해서 트래킹 필 시험을 할 경우 오손액의 일부가 코로나링과 애자 금구사이에 스며들어갔다가 전압 인가시 흘러나오면서 오히려 방전을 유도하는 경향이 발생하여 코로나링 설치에 따른 열화 특성은 검토하지 못하였다.

그림 3은 애자 시료들을 설치한 트래킹 필 시험 장치를 나타내었다. 애자의 열화평가방법으로는 누설전류, 발수성, 적외선 촬영에 의한 온도분포 등을 조사하였다.

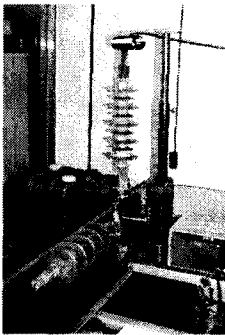


그림 3. 트래킹 필 시험장치

3. 실험결과 및 고찰

3.1 오손물 분석 결과

3.1.1 ICP-AES

경년품 폴리머 애자 표면을 ICP-AES로 분석한 결과 표 2와 같이 Si>Al>Na>Fe>Ca>Fe>Zn>K>Mg>Cu 순으로 오손물질의 성분이 분석되었다.

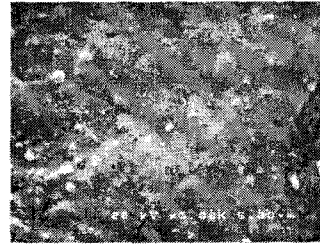
표 2. 분석된 오손물질

성분	Wt%
Si	76.0
Al	9.9
Na	4.8
Ca	2.3
Fe	4.5
Zn	1.1
K	0.5
Mg	0.4
Cu	0.4

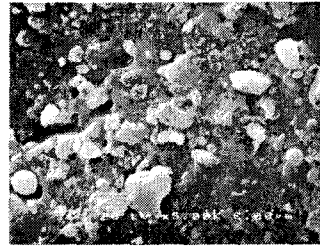
철거된 경년품 애자는 해안지역(순천, 포항)에 설치된 애자이며, 보고된 해안지역의 오손물질의 분포를 보면 Ca>Si>C>Al >Fe> others 순으로 나타났다[4]. 그러나 철거된 경년품 애자에서는 Si 성분이 76%로 가장 많이 나타났다.

3.1.2 SEM 및 EDX 분석

신제품과 경년품의 표면 상태를 SEM으로 분석한 결과 그림 4와 같이 신제품의 표면상태와는 달리 경년품의 표면상태는 무기물이 노출되어 거칠면서 다공성적인 형태를 보이고 있으며, 완전히 제거되지 않은 오손물질도 관찰된다.



(a) 신제품 (일반형)



(b) 경년품 (일반형)

그림 4. SEM 분석결과

표 3. EDX 분석결과

시 료	6 [keV]	12 [keV]
	Al/Si	Al/Si
신제품 갓바깥쪽	0.55/1	0.6/1
신제품 갓 안쪽	0.79/1	0.79/1
일반형 경년품 갓 바깥쪽	0.24/1	0.24/1
일반형 경년품 갓 안쪽	0.34/1	0.34/1
내오손형 경년 갓 바깥쪽	0.29/1	0.29/1
내오손형 경년 갓 안쪽	0.4/1	0.37/1

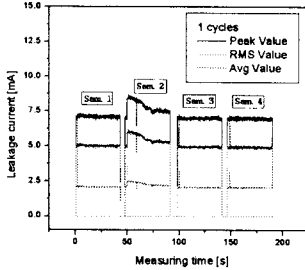
송전용 애자의 신제품과 경년품의 표면열화 가능성을 검토하기 위해 EDX를 통해 Al/Si비율 변화를 가속전압 6, 12[keV]에 따라 검토한 결과 표 3과 같이 나타났다. 신제품의 경우에 비해 일반형, 내오손형 경년품의 Al성분이 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 경년품 애자표면에서 Al무기물 성분이 바깥쪽으로 빠져나간 것으로 사료된다. 또한 갓 안쪽에 비해 갓 바깥쪽의 무기물 성분

이 다소 적은 편이며, 이러한 경향은 경년품의 경우도 마찬가지였다.

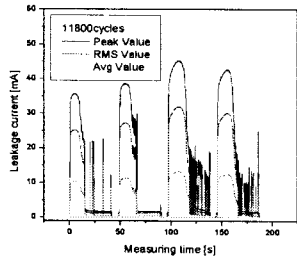
3.2 트래킹 휠 시험결과

3.2.1 누설전류

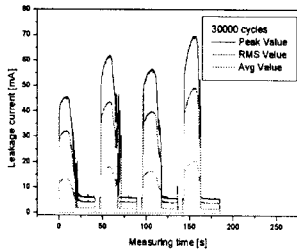
그림 5는 일반형 신제품인 시료 1, 2와 일반형 경년품 시료 3, 내오손형 경년품 시료 4에 대해서 시험 사이클 진행에 따른 누설전류를 분석한 결과를 나타내었다.



(a) 1 사이클



(b) 11800 사이클



(c) 30000사이클

그림 5. 누설전류 분석

초기 누설전류의 피크치를 보면 4개의 시료들이 7.5 mA 안팎으로 거의 비슷하게 나타났다. 하지만 사이클이 진행됨에 따라 11800사이클 일때는 시료 1, 2는 35~39mA 정도의 피크값을 나타내었으며, 시료 3, 4는 43~45mA로 다소 높게 나타났다. 30000 사이클 종료시점의 누설전류 피크값을 보면 시료 1은 45mA, 샘플 2는 63[mA], 시료 3는 57mA, 시료 4는 70mA 정도의 값을 보였다. 누설전류 경향을 보면 사이클 진행에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 신제품인 시료 1, 2에 비해 경년품 시료 3, 4가 보다 높은 값을 보였다. 물론 시료 2의 값을 보면 시료 4보단 작지만 시료 3보다 높게 나타났는데 시료 2의 최종 열화상태를 확인해본 결과, 폴리머 애자의 계면부분에 트래킹이 발생하여 보다 높은 누설전류가 나타난 것으로 사료된다. 전반적인 경향을 보면 경년품 애자의 표면에 축적된 오손물질에 의해 누설전류가 신제품보다 높게 나타났다.

3.2.2 발수성

트래킹 휠 시험 진행시 4일 과전 1일 휴지시간을 갖는다. 각 휴지시간 후에 애자의 표면 발수상태를 STRI Guide 방법을 이용하여 분석하였다[5]. 표 4, 5, 6에 일반형 신제품, 경년품, 내오손형 경년품에 대해서 초기, 11800사이클, 20000사이클, 30000사이클 일때의 발수등급을 갖 위치별로 나타내었다. 일반형 경년품, 내오손형 경년품의 경우는 20000사이클 일 때부터 발수성 최하등급인 HC 6등급이 갖 전체에서 나타났다. 하지만, 신제품의 경우에는 30000사이클 종료 시에도 1번 갖은 HC 2, HC 5 등급을 보였다. 그림 6은 30000사이클 일때의 일반형 신제품과 내오손형 경년품의 발수상태를 나타낸다.

표 4. 일반형 신제품 발수등급

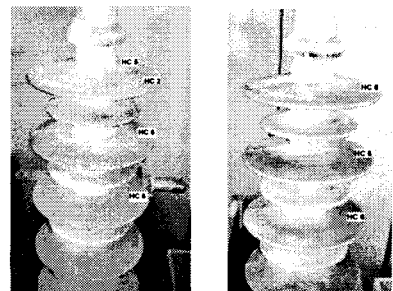
갖 위치	발수 등급 평가			
	0 사이클	11800사이클	20000사이클	30000사이클
1번 갖	HC 2	HC 2	HC 4	HC 2, HC 5
2번 갖	HC 2	HC 5	HC 5	HC 6
3번 갖	HC 2	HC 3	HC 6	HC 6
4번 갖	HC 2	HC 4	HC 6	HC 6
5번 갖	HC 2	HC 3	HC 2	HC 6

표 5. 일반형 경년품 발수등급

갖 위치	발수 등급 평가			
	0 사이클	11800사이클	20000사이클	30000사이클
1번 갖	HC 4	HC 3	HC 6	HC 6
2번 갖	HC 3	HC 4	HC 6	HC 6
3번 갖	HC 3	HC 5	HC 6	HC 6
4번 갖	HC 3	HC 4	HC 6	HC 6
5번 갖	HC 3	HC 5	HC 5	HC 6

표 6. 내오손형 경년품 발수등급

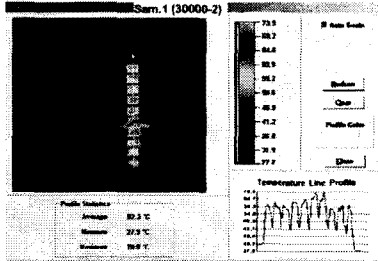
갖 위치	발수 등급 평가			
	0 사이클	11800사이클	20000사이클	30000사이클
1번 갖	HC 3	HC 6	HC 6	HC 6
2번 갖	HC 2	HC 6	HC 6	HC 6
3번 갖	HC 2	HC 4	HC 6	HC 6
4번 갖	HC 3	HC 5	HC 6	HC 6
5번 갖	HC 3	HC 6	HC 6	HC 6



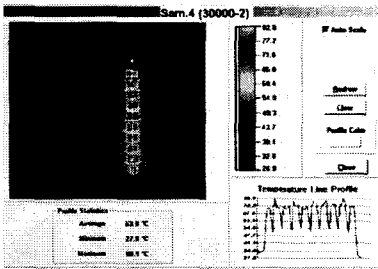
(a) 일반형 신제품 (b) 내오손형 경년품
그림 6. 발수성 변화 (30000사이클)

3.2.2 적외선 카메라 촬영

30000사이클 일때의 애자의 온도분포를 분석하기 위해 적외선 카메라(NEC 5104)로 촬영한 결과를 그림 7에 나타내었다. 송전용 애자의 경우 트래킹 휠 시험 시 전압인가 후 약 10초 후에 가장 온도가 높게 발생하며 이 때 방전이 발생하기 시작한다. 일반형 시료의 평균온도는 52.3 ℃, 최대온도는 70.0℃로 나타났다. 내오손형 경년품은 평균온도가 63.8℃로 일반형 신품보다 약 10℃ 정도가 더 높았으며, 최대온도는 80.9℃로 나타났다.



(a) 일반형 시료



(b) 내오손형 경년품 시료

그림 7. 주요 온도분포 (30000사이클)

3.3 섬락전압 시험결과

신품과 경년품에 대해서 뇌충격 섬락전압, 상용주파건조섬락전압, 상용주파주수섬락전압시험에서 표 7, 8과 같은 시험결과가 나타났다.

표 7. 일반형 신품 시험결과

시험항목	시료번호	시험기준	섬락전압	섬락전계	
뇌충격 섬락 전압 시험	정극성	830kV이상	N-1	832.5kV	
			N-2	793.5kV	
			N-3	799.7kV	
			N-4	817.0kV	
	부극성	830kV이상	N-1	872.0kV	
			N-2	851.6kV	
			N-3	843.0kV	
상용주파 건조섬락 전압시험	450kV이상	N-1	511.6kV	0.133kV/mm	
		N-2	513.4kV	0.134kV/mm	
		N-3	511.0kV	0.133kV/mm	
		N-4	524.3kV	0.137kV/mm	
상용주파 주수섬락 전압시험	360kV이상	N-1	474.2kV	0.123kV/mm	
		N-2	486.2kV	0.127kV/mm	
		N-3	480.6kV	0.125kV/mm	

동일 전장, 누설거리를 갖는 일반형 시료와 일반형 경년품의 섬락전압값을 비교해보면, 뇌충격 섬락전압값은 오히려 경년품이 높게 나타났다. 상용주파건조 및 상용주파주수 섬락전압값의 경우는 신품이나 경년품 거의 비슷한 값을 보였다. 전장과 누설거리에서 차이를 보이는

일반형 경년품과 내오손형 경년품의 경우는 뇌충격 섬락전압값은 내오손형이 높게 나타났으며, 상용주파건조 및 상용주파주수 섬락전압값은 거의 비슷하게 나타났다.

표 8. 경년품 시험결과

시험항목	시료번호	시험기준	시험결과	섬락전계
뇌충격 섬락 전압 시험	정극성	830kV이상	O-1	875.3
			O-2	893.2
			O-3	844.2
	부극성	830kV이상	O-4	880.0
			O-1	933.5
			O-2	935.8
	O-3	888.7		
상용주파 건조섬락 전압시험	450kV이상	O-1	546.0	0.133kV/mm
		O-2	543.2	0.133kV/mm
		O-3	514.6	0.134kV/mm
		O-4	540.6	0.132kV/mm
상용주파 주수섬락 전압시험	360kV이상	O-1	519.2	0.127kV/mm
		O-2	516.2	0.126kV/mm
		O-3	478.2	0.125kV/mm

* O-1, O-2, O-4는 내오손형 경년품, O-3는 일반형 경년품

4. 결 론

송전용 폴리머 현수애자 신품과 이미 약 5년 정도 설치된 폴리머 현수애자 경년품에 대해 표면 및 오손물 분석, 트래킹 휠 시험, 섬락전압시험 등을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철거된 폴리머 현수애자 경년품에서 ICP-AES를 통해 분석된 오손물의 주요성분은 Si > Al > Na > Fe > Ca > Fe > Zn > K > Mg > Cu 순으로 나타났다.
- 2) 경년품의 표면상태는 시료과는 달리 무기물이 노출되어 다공성적인 형태를 보였으며, EDX 결과도 Al/Si비율에서 Al성분이 다소 줄어든 경향을 보였다.
- 3) 트래킹 휠 시험을 통해서 얻어진 결과를 보면, 시험 사이클 진행에 따라 신품 및 경년품 모두 누설전류값이 증가하였으며, 경년품 시료가 신품보다 높은 전류값을 보였다. 발수성 상태는 30000사이클 종료시 경년품 샘플들은 모두 가장 나쁜 발수성 등급을 보였지만, 신품의 경우는 최종시험 종료까지 1번 갖에서 HC 2, HC 5 등급이 나타났다. 과전시 주요 온도분포는 경년품 시료가 신품보다 평균온도 및 최대온도가 약 10℃ 정도 높게 나타났다.
- 4) 신품 및 경년품에 대해서 뇌충격 섬락전압, 상용주파건조, 상용주파주수 섬락전압을 검토한 결과, 뇌충격 섬락전압 값은 경년품이 다소 높게 나타났으며 상용주파건조 및 주수섬락 전압값은 거의 비슷하게 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] "폴리머 전력연구원 송전·전기 환경팀, "송전용 애자 기술", KEPRI Journal, pp.36-44, 겨울호, 2003.
- [2] 조한구, "폴리머 절연물의 장단기 신뢰성을 위한 표준화 평가기술, 글로벌 스탠다드, 한국표준협회, 2001
- [3] CEA(Canadian Electric Association) LWIWG-01, "Dead-end/Suspension Composite Insulator for Overhead Distribution Lines", 1996.
- [4] R. Matsuoka et al, "Investigation Results of Ageing Deterioration of Polymer Insulators Removed from 110kV Transmission Line in Shanghai Area", ICEE 2002.
- [5] STRI, "Hydrophobicity Classification Guide", STRI, Guide 92/1