

# 배전용 폴리머 피뢰기 장기 신뢰성 평가

송일근 · 김주용 · 이재봉 <전력연구원 그룹장 · 선임연구원 · 선임연구원>

## 1 서론

배전선로 및 설비의 보호를 위해 사용되는 배전용 피뢰기는 과전압 제한 장치로서의 기능을 가질 때를 제외하고는 절연체 역할을 수행한다. 그러므로 절연특성은 피뢰기의 수명과 전력계통의 신뢰성 있는 운전을 위해 필수적이다. 현재 배전선로에는 사용되는 피뢰기는 ZnO소자를 사용하는 갱리스 피뢰기이며, 애관은 세라믹애관을 대신하여 폴리머 애관(EPDM)을 주로 사용하고 있다. 피뢰기는 운전중 항상 선로전압이 인가된 상태로 운전되고 있으며, ZnO소자의 특성에 의해 저항분 누설전류와 용량성 누설전류가 상시 흐르고 있다. 이러한 피뢰기는 현장운전중 상시과전, 서지, 흡습 등에 의해 열화되며, 일단 피뢰기가 열화되면 저항분 전류가 증가하고 이에 따라 소자의 발열량이 증가되어 다시 저항분전류가 증가하는 현상이 반복된다. 이로 인해 결국에는 소자가 열폭주하여 절연과괴에 이르게 된다.

본 고에서는 배전선로에서 사용되고 있는 폴리머 피뢰기의 장기신뢰성 평가를 위해 옥외 실증시험장, 가속열화시험설비를 구축하고 열화에 따른 특성변화를 분석한 내용을 소개하고자 한다.

## 2 옥외 실증시험 시료의 열화상태 관찰

### 2.1 발수성 변화 관찰

그림 1과 같은 옥외실증시험장에 그림 2와 같이 폴리머피뢰기를 설치하고 전압을 인가하여 현장에서 사용 중인 폴리머 피뢰기와 동일한 환경을 만들었고, 표 1과 같이 폴리머피뢰기를 설치하였다.

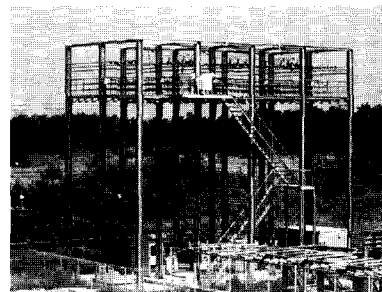


그림 1. 옥외 실증시험 설비



그림 2. 누설전류 측정 시료설치

표 1. 옥외 실증시료 설치내역(2003.07.02)

시 료	제조사	수량	비 고
폴리머피뢰기	S	4	전체누설전류 및 3고조파 측정, 저항분 누설전류 측정
	B	4	
	V	4	

이들 시료에 대한 열화상태 점검을 위하여 STRI에서 제안하여 IEC TS 62073으로 제정된 스프레이법

에 의하여 젖음성(Wettability Class)을 관찰하였다. 폴리머 피뢰기는 제조사에 따라 발수성의 차이가 뚜렷하게 나타났다. S사의 피뢰기는 완전 친수성으로 변했고 하우징 표면도 열화가 상당히 진행된 것으로 관찰되었다. 그 외 B사와 V사의 피뢰기는 S사 보다는 우수하지만 초기상태보다는 발수성이 저하된 것으로 나타났다.

관찰 결과 동일한 EPDM 재질이라도 제조회사에

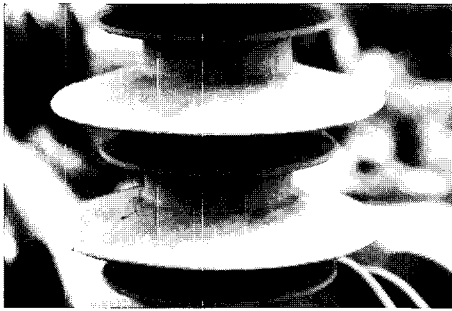


그림 3. 피뢰기(S사)

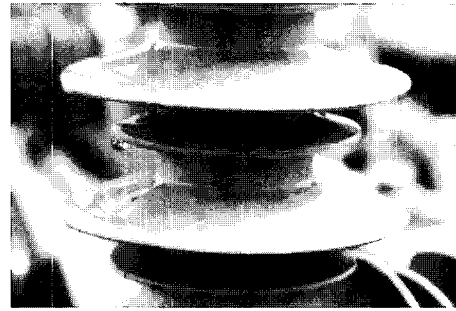


그림 4. 피뢰기 발수성(WC 6)

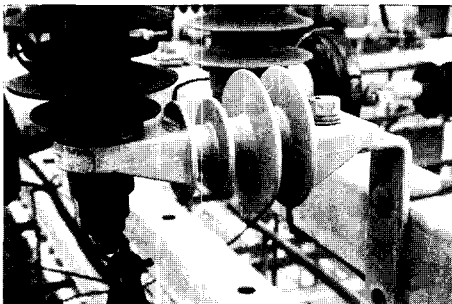


그림 5. 피뢰기(B사)

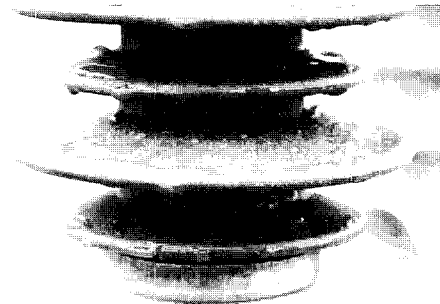


그림 6. 피뢰기 발수성(WC 4)

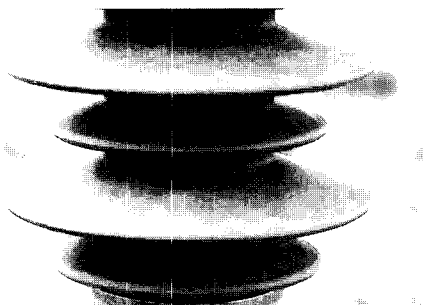


그림 7. 피뢰기(V사)

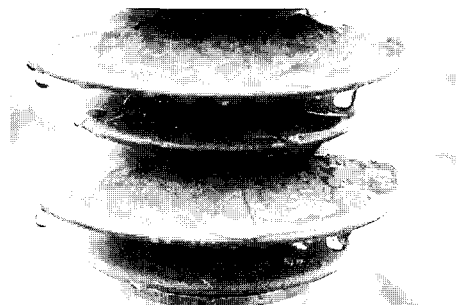


그림 8. 피뢰기 발수성(WC 5)

따라 발수성의 변화 정도가 차이가 많이 있었으며, 친수성으로 완전히 전환된 EPDM 재질의 경우 표면의 열화가 급속도로 진행된 것으로 관찰되었다.

### 2.2 누설전류 변화 분석

피뢰기는 전체 누설전류에 비해 저항분 누설전류의 변화는 미미한 수준이다. 그러나 제조사별로 누설전류의 차이가 발생하였는데 이것은 피뢰기 표면의 열화 및 발수성 상태를 관찰한 결과와 일치하였으며, S사의 누설전류가 다른 2개 제조사의 피뢰기에 비하여 1.5~2배 정도 더 크게 나타났다. 5년 이상 사용한 경년품의 경우 기상 상태 변화에 따른 누설전류의 변화가 좀 더 뚜렷하게 나타날 것으로 기대된다. 그림 9는 측정시스템의 누설전류 및 기상정보를 계측하는 화면을 나타낸 것이다. 그림 10과 그림 11은 폴리머의 누설전류와 기상 데이터와의 상관성을 보기 위한 비교 데이터이다.

그림에서와 같이 겨울철의 누설전류가 여름보다 많이 흐르는 것으로 나타났다. 이는 해안가의 염수가 표면에 결빙됨으로 인한 것으로 생각된다.

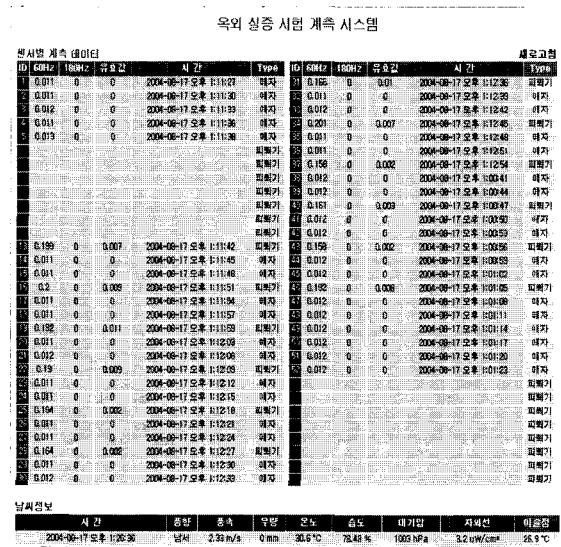


그림 9. 계측시스템 화면(누설전류 및 기상정보)

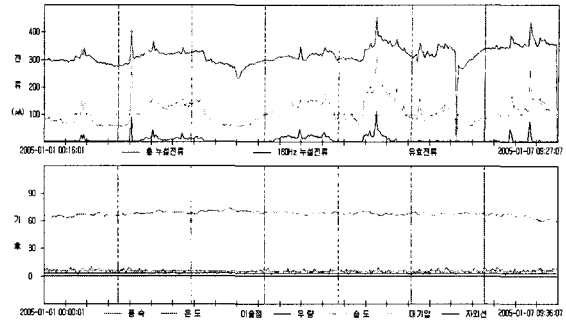


그림 10. S사 피뢰기 누설전류-기상 데이터(겨울)

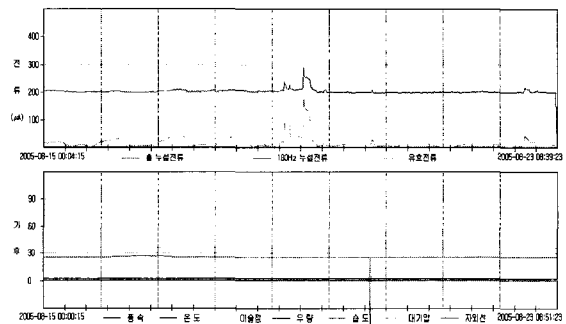


그림 11. S사 피뢰기 누설전류-기상 데이터(여름)

## 3. 폴리머피뢰기 가속열화 시험

폴리머피뢰기는 현장에서 사용되지 얼마되지 않아 현장으로부터 장기신뢰성 데이터를 확보할 수 없는 상황이며, 폴리머피뢰기의 확대 사용에 따라 이들의 장기신뢰성에 대한 관심은 증가하고 있다. 이에 따라 피뢰기의 현장 운전환경을 적절히 모의할 수 있는 가속열화 시험장치를 제작하였으며, 국내 자연환경 조건을 토대로 가속시험 인자를 결정하고자 하였다.

### 3.1 폴리머피뢰기 가속열화 시험인자 결정

본 고에서는 선로 운전환경 조건인 온도, 습도, 자외선, 염수, 주수, 전압을 가속열화 인자로 설정하고 가속효과 및 국내 자연환경 조건을 고려하여 스트레스 기준을 정하고자 하였다.

기술해설

□ 온도(Temperature)

- 여름주기 : 여름철 최고기온은 35~38[°C] 정도이나, 애관 표면온도 상승(+11[°C]) 및 온도가속효과를 고려하여 최고 시험온도를 80[°C] 결정
- 겨울주기 : 겨울철 최저온도는 -10~-15[°C] 정도임을 감안하여 최저온도를 -20[°C]로 결정
- 우리나라의 연평균 기온이 15[°C]임을 고려하여 최저 및 최고 온도 인가주기를 제외하고는 대부분 15[°C]를 인가하였음

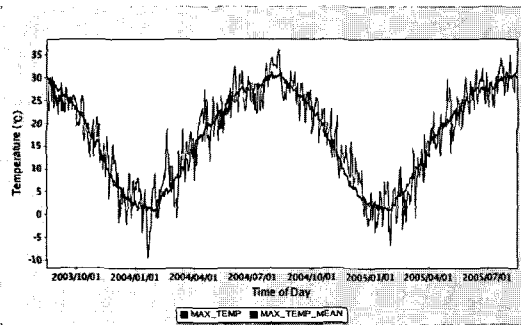


그림 12. 년도별 온도 변화

□ 습도(Humidity)

- 여름주기 : 고온 인가시에 95~98(%), 그 외는 약 40(%)

- 겨울주기 : 30~60(%)

□ 자외선(UV)

- 연간 일조시간 : 약 2,200시간
- ASTM G53에 따라 UV-B lamp(파장 280~315(nm))를 사용

□ 염무(Salt fog)

- 염도 : EPRI/FPL 시험방법에 따라 2.5[kg/m<sup>3</sup>] 정도 사용
- 전도도 : EPRI/FPL 시험방법에 따라 4,000 [μS/cm] 정도 사용

□ 주수(Rain)

- 전도도 : 실제 강우시 빗물을 측정된 결과로부터 약 30~70[μS/cm] 정도의 순수를 사용
- 주수량 : 1시간 최대 강우량(≒2(mm)/분), 연강수량(1,300~1,500(mm)) 애관 표면이 골고루 젖는 정도인 2~3(mm)/분으로 하였음

□ 인가전압(Voltage)

- 최대연속운전전압(MCOV) : 18[kV] × 0.85 = 15.3[kV] 인가

시간(hours)	1	2	3	4	5	6	7	8
Salt fog (≒2.5[kg/m <sup>3</sup> ])								
주수 (30~70[μS/cm])								
온습도 (15[°C] 40[%], 80[°C], 95[%])	15[°C] 40[%]	80[°C] 95[%]	15[°C] 40[%]	80[°C] 95[%]	15[°C] 40[%]	80[°C] 95[%]	15[°C] 40[%]	80[°C] 95[%]
자외선 (10[W/m <sup>2</sup> ])								
전압 (15.3 [kV])								
온도조절구간								

그림 13. 폴리머피뢰기 가속열화시험주기(여름주기)

시간(hours)	1	2	3	4	5	6	7	8
Salt fog (≈2.5(kg/m <sup>3</sup> ))								
주수 (30-70(μS/cm))								
온습도 (-20~15(°C) (30~60(%))	15(°C) 60(%)		4(°C) 30(%)	4(°C) 30(%)	4(°C) 30(%)		-20(°C) 30(%)	4(°C) 30(%)
자외선 (10(W/m <sup>2</sup> ))								
전압 (15.3(kV))								
온도조절구간								

그림 14. 폴리머피뢰기 가속열화시험주기(겨울주기)

이상 언급한 바와 같이 염무, 주수, UV 등의 스트레스는 국내에서 사용되고 있는 폴리머애자 가속열화 시험에서 사용되는 것과 동일한 양이나, 온도 및 인가 전압은 폴리머피뢰기에 적합하도록 변경됨에 따라 전체적으로 애관에 가해지는 스트레스는 폴리머 애자 가속열화 시험에서 보다 증가하였다. 그림 13과 그림 14은 이상의 스트레스 기준을 활용하여 작성한 폴리머피뢰기 가속열화 시험기준이다. 이 시험주기는 10일 동안에 여름주기(8시간)가 30주기 시험이 이루어지며, 11일 동안 겨울주기(8시간)가 33주기 수행된다.

### 3.2 가속열화시험 시료분석

그림 15와 같이 폴리머피뢰기 가속열화 시험장치를 제작하고 앞에서 제시한 주기에 따라 다양한 제작사의 신제품 및 현장 운전 경년품에 대해 2,000시간 가속열화시험을 실시하였다.

시험에 사용된 시료들은 2,000시간 시험 종료 후 전기적 특성 평가 및 애관 재질분석을 실시하였다. 전기적 특성평가는 정밀한 측정을 위해 Nihon Keisokuki Seizosho Co.의 CT와 누설전류 검출기

(Leakage Current Detector-4)를 사용하여 전체 누설전류 및 저항분 누설전류를 측정하였으며, 동작 개시전압은 직류전압을 인가하여 누설전류가 DC 1(mA) 흐를 때의 전압을 기록하였다.

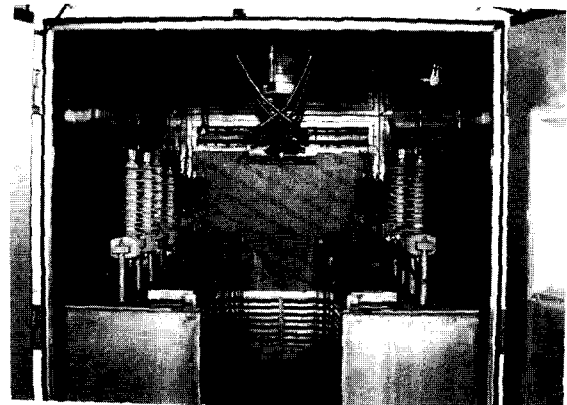


그림 15. 폴리머피뢰기 가속열화 시험장치

표 2는 시험시료 내역과 2,000시간 시험 종료 후의 누설전류와 동작개시전압을 나타낸다. 표에서 볼 수 있듯이 모든 시료에서 특별한 열화의 징후는 발견되지 않았으나 제작사별로 누설전류 차이가 있음을 발견할 수 있다.

표 2. 시험시료 및 시험후의 전기적 특성

시료 번호	제조사	구분	가속시험시간	누설전류(at 13.2[kV]ac)		동작개시전압([kV <sub>dc</sub> ] ([V <sub>1mA</sub> ])
				I <sub>x</sub> ([mA])	I <sub>r</sub> ([mA])	
1	S	신품	2,000	0.200	0.020	30.9
2	S	신품	2,000	0.190	0.020	30.9
3	V	신품	2,000	0.150	0.025	-
4	V	신품	2,000	0.150	0.026	30.5
5	B	신품	2,000	0.150	0.046	30.2
6	B	신품	2,000	0.150	0.024	-
7	S	경년품(2002)	2,000	0.200	0.040	31.4
8	S	경년품(2002)	2,000	0.200	0.038	-
9	V	경년품(2003)	2,000	0.150	0.040	31.0
10	P	경년품(2001)	2,000	0.140	0.022	29.5
11	B	경년품(2001)	2,000	0.150	0.022	29.4
12	B	경년품(2001)	2,000	0.150	0.032	31.0

2,000시간 시험 이후 일부시료에서는 그림 16과 같이 애관표면에 자외선 및 오손물 부착으로 인한 변색이 나타났으며, 일부 시료는 그림 17과 같이 단로기 부착을 위해 사용한 금속너트가 심하게 부식되었다.

현재까지의 가속시험시간이 짧아 장기신뢰성 측면에서의 분석은 불가능한 상태이지만 향후 3,000시간 이상 시험시료와 현장 설치품과의 비교평가를 통해 정확한 가속효과를 정의할 필요가 있을 것으로 생각된다.

### 3.3 폴리머 피뢰기의 고온침수 가속시험

폴리머피뢰기의 가속 기밀시험법으로 널리 응용되고 있는 것이 고온침수시험이고, 본 고에서도 이를 통한 국산 폴리머피뢰기의 기밀특성을 평가해 보았다.

시료는 모두 3종류(제조사별)의 신품, 배전급 폴리머피뢰기로써 각 종류별 2개씩을 사용하였으며, 정격 전압 및 전류는 18[kV], 5[kA]이고 내부에 gap이 존재하지 않는(gapless) 형태의 피뢰기를 이용하였다.

시료인 폴리머피뢰기는 1[kg/m<sup>3</sup>]의 NaCl이 첨가

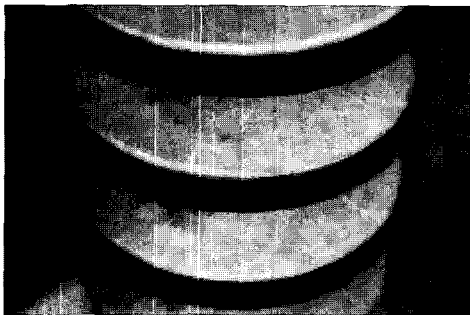


그림 16. 시료 표면

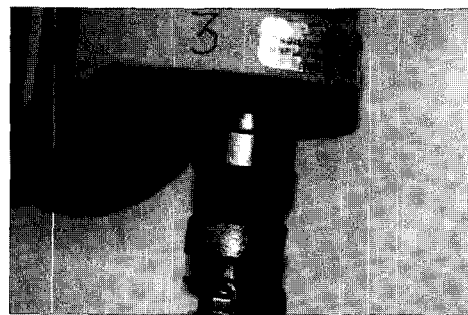


그림 17. 시료의 단로기

된 수돗물로 채워진 수조에 담가진다. 수분침투에 의한 특성의 변화는 정밀한 직류누설전류(DC leakage current)측정에 의해 분석되며 시험전압은 4, 8, 10, 14(kV)를 인가하였다. 수조는 스테인리스 스틸로 제작되었으며 각 피뢰기는 완전히 물에 잠긴 상태에서 열화된다. 수분침투의 가속을 위해 물의 온도는 95(°C)로 유지하였고 직류누설전류 침수가 진행되는 동안 수차례 측정하였다. 측정 전에는 시료를 수조에서 꺼내 상온으로 식히며 표면은 완전 건조되도록 하였다.

직류누설전류 시험시 피뢰기표면으로 흐르는 누설전류는 guard 전극을 통해 접지측으로 바이패스되게 하여 그 영향을 최소화하였다. 또한 각 시험전압을 인가한 후에는 5분의 안정화 시간을 가진 후 측정된 전류값을 기록하였으며, 이 5분간의 변화는 측정자동화 시스템을 통하여 계속적으로 변화추세를 기록하였다.

측정 자동화시스템을 위해서는 NI사의 Labview 프로그램을 이용하였고, 측정시스템의 구성은 디지털 멀티미터(Keithley 617), 고전압 DC 전원(FUG HCN350-35000) 및 PC로 이루어져 있다. 또한 멀티미터와 PC사이에는 IEEE488 케이블을 통하여 인터페이스 되고, 이는 Labview 프로그램을 이용해 계측기의 원격제어 및 데이터수집에 사용된다.

표 3. 시험조건 및 실험장치

항 목	조 건
직류누설시험전압((kV))	4, 8, 10, 14
침수의 NaCl 농도	1(kg/m <sup>3</sup> )
침수 온도	95(°C)
수조 재질	스테인리스 스틸
측정시 전압인가 안정화시간	5분
직류고전압 전원	FUG사 HCN350-35000
디지털 멀티미터	Keithley사 617
피뢰기 표면전류 처리	가드전극을 통해 접지측으로 바이패스
측정자동화 프로그램	NI사 LabView Ver. 4.1



그림 18. 가속침수 중인 시료

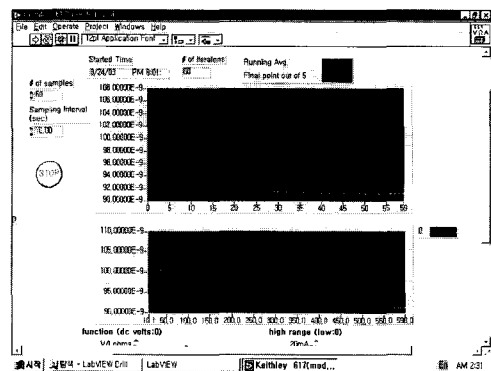


그림 19. virtual instrument 화면

그림 18은 가속침수 중인 시료이며, 그림 19는 virtual instrument 화면을 나타내고 있다. 가속침수 중인 시료중 특정 회사제품을 가지고 시험한 그림 19는 가속침수 열화시간에 따른 직류누설전류의 변화상태를 나타내는 그림이다. 침수시간이 160시간을 지나면서부터 누설전류가 증가하기 시작하고 있으며, 침수시간의 증가에 따른 V-I 특성곡선의 변화는 전류의 절대치가 증가하고 있으나 비선형곡선의 형태는 유지하고 있다. 이는 피뢰기의 재료로 사용되고 있는 ZnO 소자의 특성변화보다는 수분침투에 의한 누설전류의 증가효과가 침수 160시간 이후부터 본격적으로 나타나고 있음을 시사하고 있다. 이상의 결과로부터 폴리머피뢰기의 침수시험 및 직류 누설전류 측정 시험은 피뢰기의 기밀특성을 상대평가하기에 적합한 방법으로 판단된다.

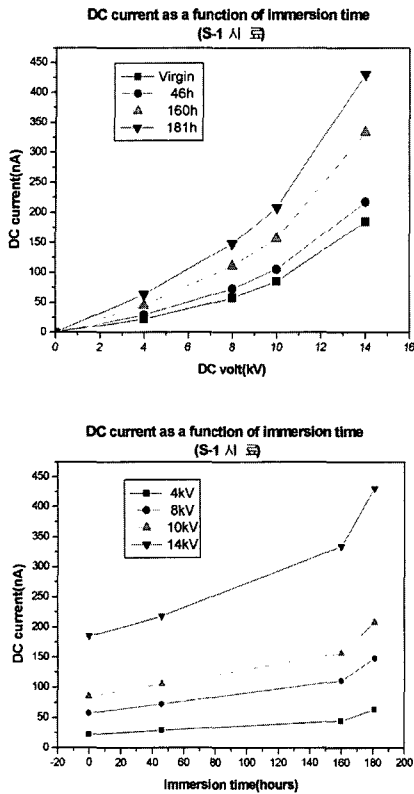


그림 20. 가속열화에 의한 S-1 시료의 직류누설전류 변화

#### 4. 결론

이상과 같이 단기간의 옥외노출 및 가속열화 시험에 피뢰기 애관의 발수성이 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 이는 폴리머피뢰기의 장기신뢰성에 악영향을 줄 것으로 판단되며, 향후 지속적인 분석이 필요할 것으로 생각된다. 본 고에서는 국내에서 사용되고 있는 폴리머피뢰기의 장기신뢰성 평가를 위해 옥외 실증시험설비 및 가속열화 시험장치를 제안하고 이를 활용한 시험에서 피뢰기의 특성변화를 분석하여 폴리머피뢰기의 장기신뢰성 평가방법을 제시하였다. 또 폴리머피뢰기의 가장 중요한 특성인 기밀특성 평가방법으로 침수시험을 통한 직류누설전류 측정방법이 사

용될 수 있음을 확인하였다. 이상의 결과를 바탕으로 향후 장기간의 가속열화 시험결과와 현장 발취 시료 및 옥외 실증시료간의 특성 비교를 통해 국내 폴리머 피뢰기의 장기신뢰성 평가 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

#### ◇ 저자 소개 ◇



**송일근 (宋一根)**

1961년 3월 3일생. 1984년 송실대 전기공학과 졸업. 1986년 송실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 송실대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 배전연구소 배전설비그룹장.

관심분야 : 배전설비 수명진단 및 열화진단기술

Tel : 042-865-5910

E-mail : iksong@kepri.re.kr



**김주용 (金周勇)**

1969년 9월 27일생. 1992년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 경북대학교 전기공학과 졸업(석사). 2002년 경북대학교 전기공학과(박사수료). 현재 전력연구원 배전연구소 배전설비그룹 선임연구원.

관심분야 : 배전용케이블 열화진단 및 피뢰기 특성해석기술

Tel : 042-865-5913

E-mail : kimjy@kepri.re.kr



**이재봉 (李載奉)**

1971년 1월 17일생. 1993년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1995년 전남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2001년 전남대학교 재료공학과(박사수료). 현재 전력연구원 배전연구소 배전설비그룹 선임연구원.

관심분야 : 배전용케이블 서지특성 해석 및 폴리머애자 열화분석기술.

Tel : 042-865-5912

E-mail : jblee@kepri.re.kr