1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

# 배전용 피뢰기의 유전특성에 관한 연구

김찬영, 김주용, 송일근, 이병성, 한용희
한국전력공사 전력연구원

# A Study on the Dielectric Properties of Lightening Arrester used for Distribution Line

Chan Young Kim, Ju Yong Kim, Il Keun Song, Lee Byoung Sung, Yong Heui Han
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

**Abstract** - This paper provides the results of dielectric properties for aged or controlled lightening arresters. The aged lightening arresters were used for five years in distribution line. The leakage current of lightening arresters and elements was measured to confirm whether the lightening arrester was deteriorated or not. The microstructure was also investigated to determine the size of grain and grain boundary. The dielectric properties of aged lightening arresters were compared to those of controlled lightening arresters. The dielectric constant and the tan$\delta$ of aged lightening arrester were larger than those of controlled one, resulting from accelerated aging due to the thin grain boundary.

## 1. 서 론

피뢰기는 과전압이 인가되면 전류를 대지로 방출시켜 전력설비를 보호하는 역할을 한다. 따라서 피뢰기는 동작횟수가 증가함에 따라 열화되며, 영구적인 손상을 받게되면 결국 피뢰기 고장으로 이어진다.

피뢰기에 흐르는 전 누설전류는 용량분과 저항분 전류의 합이고, 동작개시전압 아래에서는 용량분 전류가 대부분이고, 저항분 전류는 매우 적다. 그렇지만 전압이 증가함에 따라서 저항분 누설전류가 증가되고 주울열로 인한 열이 발생되어 소자를 열화시킨다.

현장에서는 피뢰기에 흐르는 전 누설전류를 측정하여 개발 채택시의 전 누설전류 값과 비교하여 큰 차이가 있을 경우 열화된 것으로 판단하여 교체하고 있다.

피뢰기 소자에 국부적으로 높은 전류밀도가 흐르면 소자는 열화가 일어난다. 전류밀도가 크면 입자 또는 입계가 영구적으로 손상을 입어 물리적 및 전기적 특성에 변화가 나타나며, 이러한 열화에 의하여 발생하는 피뢰기 소자의 고장유형은 아래와 같다.

(a) 피뢰기 소자의 전극이 모서리까지 도포되어 있을 경우에 소자의 표면으로 섬락이 일어난다. 이것은 두 가지 이유 때문에 일어난다. 첫째는 표면을 가로지르는 물리적인 거리가 작기 때문이고 둘째는 소자의 표면에 불순물이 부착되기 쉽고, 이러한 불순물에 의하여 섬락전압이 저하되어 일어난다.

(b) 전극이 모서리까지 도포되어 있지 않은 소자는 전극의 모서리에 전류가 집중되어 모서리에 균열이 발생된다.

(c) 과전압이 유기되면 소자에 열이 발생한다. 피뢰기 소자의 표면은 공기로의 대류나 피뢰기 애관쪽으로 전도하여 열을 분산시킨다. 하지만 소자의 중앙은 이웃의 입자에 열을 전도시킨다. 따라서 소자의 중앙에는 열이 집중되어 결과적으로 소자의 저항이 작아지고 전류가 증가하는 열 폭주(thermal runaway)가 발생한다.

(d) 피뢰기 애관에 갇혀있는 공기에 열이 집중되어 고장이 발생된다.

(e) 피뢰기 소자는 임펄스로 손상을 입는다. 이 손상은 전류밀도의 변화 때문이며, 소자재료에 국부적인 재소결을 일으킨다. 이 국부적인 재소결의 효과는 소자 내부를 약하게 만든다.

(f) 낙뢰와 같은 단극성의 펄스 때문에 소자가 손상을 입는다. 이 결과 정상동작전압의 교류전압파형이 소자에 가해질 때, 한 극성에서 더 많은 전류가 흐른다. 따라서 이 극성에서는 낮은 전압에도 전도가 된다. 그러므로 나머지 손상을 받지 않은 부분은 더 큰 전압응력, 증가된 국부적인 과열, 그리고 전력 손실증가를 갖게되어 연속 고장을 일으킨다.

본 논문에서는 현장에서 열화된 경년품 및 신품 피뢰기의 전기적 특성, 미세구조, 유전특성에 대하여 분석하고 논의하였다. 누설전류가 큰 피뢰기 소자는 미세구조 관찰 및 유전특성 분석을 통하여 열화원인을 추정하였다. 유전열 분석기(Dielectric Thermal Analyzer)로 피뢰기 소자의 유전상수, 유전정접(tan $\delta$), 고유저항을 온도의 변화에 따라 측정하였으며, 그 결과를 열화와 연관하여 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 시험방법

배전선로에서 5년 동안 사용되었던 경년품 피뢰기와 신품의 피뢰기에 자체 제작한 누설전류 측정장치를 이용하여 상용주파수로 13.2 [kV]까지 전압을 증가시키면서 전 누설전류 및 저항분 누설전류를 측정하였고, 피뢰기를 분해하여 소자별로 전 누설전류, tan $\delta$를 측정하였다.

미세구조를 관찰하기 위해 피뢰기 소자를 0.25[$\mu$m]의 다이아몬드 현탁액으로 30분 동안 연마하고, HCl 5 [%]와 HF 1 [%]의 수용액으로 3초간 에칭하였다.

유전특성을 측정하기 위해 피뢰기 소자를 다이아몬드 절단기로 1 ~ 2 [mm]의 두께로 균일하게 절단하고, 40 [℃]의 오븐에서 2시간 동안 건조시킨 후 직경 25 [mm]의 금전극을 양면에 증착하여 유전상수, 유전정접(tan $\delta$), 고유저항을 온도와 주파수의 함수로써 측정하였다.

### 2.2 전기적 특성시험

피뢰기에 흐르는 전 누설전류는 전압이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는데 비하여 저항분 누설전류는 기하급수적으로 증가하였다. 전 누설전류와 저항분 누설전류는 신품에 비하여 경년품에서 훨씬 큰 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에 사용된 경년품 피뢰기는 열화가 상당히 진전된 것으로 판단되었다.

경년품과 신품의 피뢰기 소자에 상용주파수로 전압을 증가시키면서 측정한 전 누설전류는 그림 1, 2와 같다. 경년품 피뢰기는 누설전류의 증가율이 소자마다 달랐고, 낮은 전압에서도 누설전류가 기하급수적으로 증가하였다. 또한 운전전압에서 흐르는 누설전류가 개발 채택시

의 누설전류보다 상승되었고, 이것은 피뢰기가 열화되었던 것을 의미한다. 또한 경년품 피뢰기는 소자마다 누설전류 특성이 달랐으며, 이것은 소자마다 열화의 진행속도가 달랐다는 것을 의미한다. 신품 피뢰기 소자는 전압이 3.8 [kV] 이하에서는 누설전류가 매우 작게 흐르다가 3.8 [kV] 이상에서는 누설전류가 급격히 증가하였고, 소자 5개 모두 유사한 특성을 나타냈다.

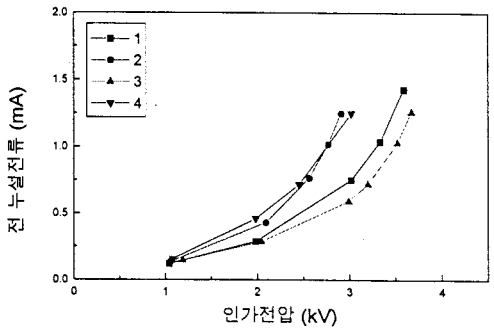


그림 1. 경년품의 전 누설전류

Fig. 1. Total leakage current of aged arrester

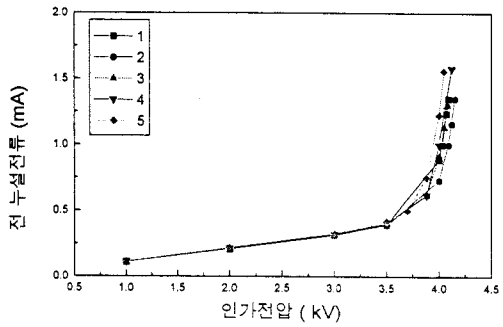


그림 2. 신품의 전 누설전류

Fig. 2. Total leakage current of controlled arrester

### 2.3 미세구조 및 성분 분석

경년품 피뢰기 소자중 열화의 정도가 심한 것으로 판단되는 소자(그림 1의 (2))와 신품 피뢰기 소자(그림 2의 (1))의 미세구조를 관찰하였다. 경년품(그림 5)은 신품(그림 6)에 비하여 기공의 크기가 크고 수가 많음을 알 수 있다. 경년품 피뢰기 기공의 크기는 약 10 [$\mu$m]로 제조당시에 형성된 것으로 판단된다. 소자에 기공이 많으면 누설전류가 기공의 표면을 타고 흐르고, 기공 내부가 가열되어 열폭주 현상이 일어날 가능성이 있다. 본 실험에 사용된 경년품 소자는 미세구조를 관찰한 결과 열폭주 현상은 발생하지 않았으며, 소자가 국부적으로 열화되었던 것으로 판단된다.

신품 및 경년품 입자의 크기는 약 15 [$\mu$m]이고 신품에 비하여 경년품은 spinel 결정이 많음을 알 수 있다. 유전상수와 입자의 크기로 계산한 입계의 두께는 경년품에서는 약 0.10 [$\mu$m]이고 신품에서는 약 0.13 [$\mu$m]로 나타났다. 따라서 경년품은 입계의 두께가 작기 때문에 같은 전압에서도 누설전류가 많았을 것으로 판단된다. 결국 동작개시전압보다 낮은 전압에서 누설전류가 많이 흘러, 열화가 쉽게 진전되었으며, 그림 1과 같이 다양하게 열화가 일어난 것으로 판단된다.

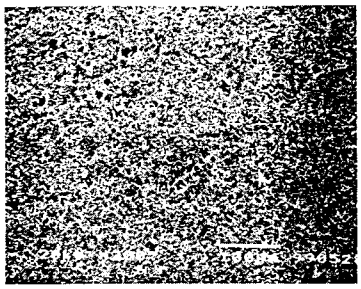

그림 3. 경년품의 미세구조(200배)

Fig. 3. Microstructure of aged arrester(200 times)

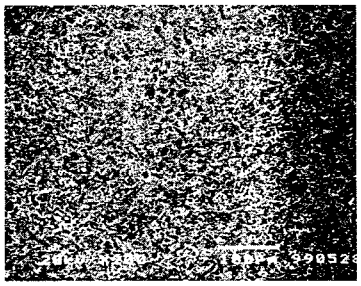

그림 4. 신품의 미세구조(200배)

Fig. 4. Microstructure of controlled arrester(200 times)

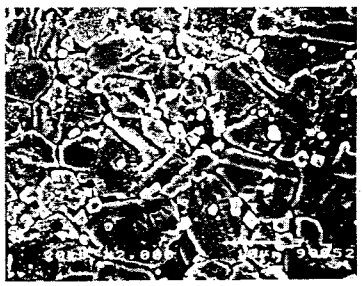

그림 5. 경년품의 미세구조(2,000배)

Fig 5. Microstructure of aged arrester(2,000 times)

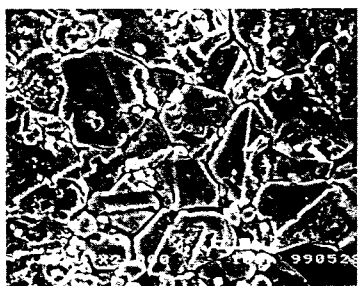

그림 6. 신품의 미세구조(2,000배)

Fig. 6. Microstructure of controlled arrester(2,000 times)

### 2.4 유전특성

표 1에 상온(20℃)에서 측정한 경년품과 신품의 유전상수, 고유저항, tan $\delta$, 정전용량을 나타냈다. 앞 절에서 설명한 것과 같이 미세구조 사진의 입자 크기는 비슷하지만 경년품이 신품에 비하여 유전상수 및 tan $\delta$가 크다. 유전상수와 tan $\delta$는 유전손실을 나타내는 파라미터이므로 경년품이 신품에 비하여 유전손실이 크다.

표 1. 경년품과 신품의 유전특성

Table 1. Dielectric characteristics of aged or controlled arrester

| | 경년품 | 신품 |
|---|---|---|
| Permittivity('k) | 1439 | 1137 |
| Specific resistance($\Omega$cm) | $8.6 \times 10^{7}$ | $3.3 \times 10^{8}$ |
| tan $\delta$ | 0.24 | 0.078 |
| Capacity(F) | $4.56 \times 10^{-9}$ | $4.29 \times 10^{-9}$ |

그림 7과 8에는 전압을 증가시키면서 측정한 각 소자의 tan $\delta$의 변화를 나타냈다. 그림과 같이 경년품 소자의 tan $\delta$는 신품에 비하여 매우 급격히 증가하였다. 또한 낮은 전압에서도 tan $\delta$의 증가율이 큰 것은 소자의 열화가 진전되었다는 것을 나타내며 이것은 이전에 설명한 인가전압에 따른 누설전류의 변화와 일치한다. 신품의 피뢰기 소자의 tan $\delta$도 누설전류와 마찬가지로 증가하는 경향이 매우 유사하다. 따라서 피뢰기 소자의 열화를 판단하는 한 방법으로 사용할 수 있다.

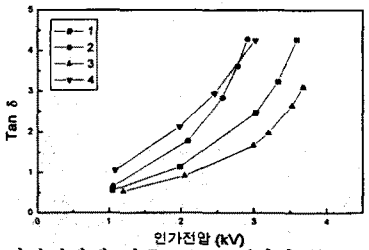


그림 7. 인가전압에 따른 tan $\delta$ (경년품)

Fig. 7. Tan $\delta$ as a function of applied voltage(aged)

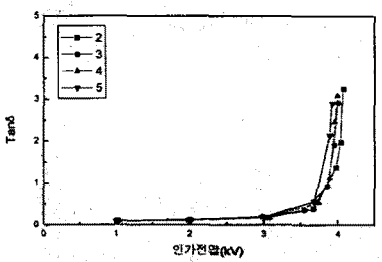


그림 8. 인가전압에 따른 tan $\delta$ (신품)

Fig. 8. Tan $\delta$ as a function of applied voltage(controlled)

그림 9와 10에는 온도변화에 따른 유전상수와 tan $\delta$의 변화를 나타냈다. 온도가 증가함에 따라서 유전상수와 tan $\delta$가 증가하는데 신품에 비하여 경년품의 증가률이 컸다. 현장에서 사용되었던 경년 열화된 피뢰기는 항시 전압이 인가된 상태였고 입계의 두께가 얇아 신품에 비하여 누설전류가 많았으며, 유전손실이 커서 온도가 상승되어서, 그림 1과 같이 열화를 더욱 가속시켜 그림 3에서 처럼 열화가 심하게 발생한 것으로 판단된다. 고유저항은 그림 11과 같이 신품이 경년품에 비하여 크다. 이것은 저항의 대부분이 입계의 두께에 의존하므로 앞에서 설명한 것과 같이 신품 입계의 두께가 크다는 것이 증명되었고, 결국 신품에 흐르는 누설전류가 작았던 것으로 판단된다.

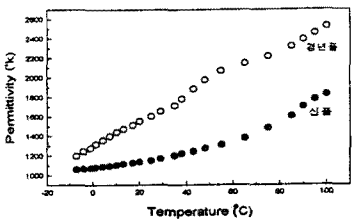


그림 9. 온도에 따른 유전상수

Fig. 9. Dielectric constant as a function of temperature

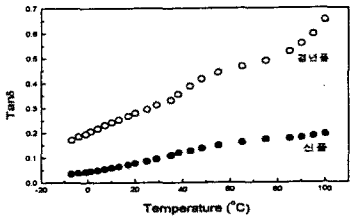


그림 10. 온도에 따를 tan $\delta$

Fig. 10. Tan $\delta$ as a function of temperature

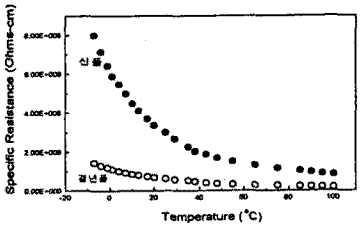


그림 11. 온도에 따른 고유저항

Fig. 11. Specific resistance as a function of temperature

## 3. 결 론

1. 경년품의 전 누설전류는 신품에 비하여 컸고, 소자별 전 누설전류의 증가율은 소자마다 달랐으며, 이것은 소자마다 열화의 진행속도가 달랐기 때문이다.
2. 경년품은 신품에 비하여 기공의 크기가 크고 수가 많았으며, 저항분 누설전류에 의하여 발생되는 주울 열이 기공내부에 갇히게 되어 피뢰기 소자를 국소적으로 열화시킨 것으로 판단된다.
3. 경년품 소자의 입계 두께는 0.10 [$\mu$m]이고 신품의 입계 두께는 0.13 [$\mu$m]로 계산되었다. 따라서 두께가 얇은 입계부터 열화가 진전되어 결국 피뢰기 소자 전체로 열화가 진행된 것으로 판단된다.
4. 경년품 피뢰기 소자는 입계 두께가 얇아 동작개시전압 아래에서 누설전류가 많이 흐른 것으로 판단된다.
5. 경년품이 신품에 비하여 유전손실이 크다. 또한 온도가 증가함에 따라 경년품이 신품에 비하여 유전상수와 tan $\delta$의 증가율이 크다. 결국 온도가 증가함에 따라 유전손실의 증가율이 컸고 결국 피뢰기 소자의 열화를 더욱 가속시킨 것으로 판단된다.

### [참고문헌]


[1] Lionel M. Levinson, "Electronic Ceramics," Marcel Dekker, pp. 275-305, 1988.

[2] W.D.Kingery, H.K.Bowen, B.W.Uhlmann, "Introduction to Ceramics", John Wiley & Sons,1976.

[3] 김주용 외, "배전용 피뢰기 열화특성 분석," 한전 전력연구원, TM.97ES03.R1999.265, 1999