

배전용 자기제 현수애자의 고장 분석

Failure Analysis of Porcelain Suspension Insulators for Distribution Line

김찬영, 김주용, 송일근, 이병성, 한용희
(Chan Young Kim, Ju Yong Kim, Il keun Song, Byung Sung Lee, Yong Heui Han)

Abstract

The paper provides the results of failure analysis for the porcelain suspension insulators. The comparisons of characteristics were made as a function of failed and unfailed insulators which had been used in real distribution lines. This paper also described the failure modes which could be occurred in the fields. The cracks inside cap were detected though measuring the resistance or the leakage current. The ratio of open porosity was calculated from the Archimedes Method. The failure analyses of porcelain suspension insulators were conducted from the various analysis method.

Key Words(중요용어) : Suspension insulator, Leakage current, Microstructure,

1. 서 론

배전용 자기제 현수애자는 선로와 대지간에 절연을 목적으로 사용된다. 현수애자의 고장은 선로와 대지간에 단락으로 이어지고, 결국 전력설비 및 수용가에 막대한 피해로 이어진다.

자기제 현수애자는 자기부, 금구부 그리고 자기와 금구를 결합하는 접합부(시멘트)로 구성되어 있다. 고장은 시멘트의 팽창과 금구의 부식 등에 의하여 주로 일어나고, 사용조건에 따라 열화 진행 속도가 다르다.

유약은 애자의 기계적강도를 향상시키고, 자기가 흡습되는 것을 방지하며, 오손물 부착을 감소시키고, 우천시 오손물이 쉽게 씻겨나가도록 되어 있다. 만일, 유약표면이 매끈하지 않을 경우는 표면 오손을 가속시켜 결국 섬락 등의 고장으로 진전될 수 있다.

본 논문은 국내 배전선로에서 사용되던중 고장난 현수애자의 고장원인을 분석한 결과에 대하여 기술하였다. 고장난 현수애자는 절연저항 및 누설전류를 측정하여 두부에 균열 존재여부를 확인하였으며, 자기 미세구조를 전자현미경(SEM)으로 관찰하였고, x-선 회절분석기로 결정상을 분석하였으며, 흡습시험으로 자기의 소결상태를 조사하였다.

2. 실험방법

애자의 절연저항을 Yokogawa사의 수동식절연저항계(JISC1301)로 측정하였으며, 애자표면의 오손도를 파악하기 위해 전기전도도로 등가염분부착밀도(ESDD)를 계산하였다. 등가염분부착밀도는 애자를 상부와 하부로 나누어 증류수 200 [ml]로 오손부위를 세척하여 전도도를 측정하고 실험식에 의해 염분량을 계산하였으며, 염분량을 표면적으로 나누어 등가염분 부착밀도를 계산하였다. 누설전류는 Tettex에서 제작한 Capacitance and Dissipation Factor Test Set으로 측정하였다. 자기의 밀도를 Archimedes 방법으로 측정하여, 개기공의 체적률을 계산하였다. 자기의 미세구조는 시료를 3 [μ m] 크기의 다이아몬드가 혼합된 반죽으로 연마하고, 이온 증착기 (ion sputter coater, JEOL, JFC-1100E)로 금 (Au)을 증착시켜, JEOL사의 전자현미경 (SEM ; JSM-5410)으로 관찰하였으며, 에너지 분산분광기 (EDS)를 사용하여 정성분석을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 두부에 균열이 존재하는 애자

(1) 주수 절연저항 측정

애자 두부에 균열이 존재하는 경우, 육안으로는 관찰이 불가능하다. 따라서, 애자 두부에 균열 존재 여부를 판단하기 위해 여러 방법이 사용되어 왔다. 가장 기본적인 방법은 절연저항계로 측정하는 방법이다. 그렇지만, 자기두부의 두께가 15 [mm] 이상이고 시멘트 두께까지 생각하면 캡과 핀사이의 간격이 20 [mm]를 넘는다. 결국 자기에 균열이 존재하더라도 균열사이가 오손되지 않은 상태에서 절연저항을 측정하면 역시 ∞를 지시하게 된다. 하지만 균열사이에 수분이나 기타 전도성물질이 존재한다면 낮은 절연저항 값을 나타내므로, 균열존재여부를 판단할 수 있다. 따라서, 절연저항을 측정하기 전에 균열사이에 수분을 침투시키고 절연저항을 측정하면, 두부 균열 존재여부를 판단할 수 있다.

현수애자의 절연저항이 85 [MΩ]으로 측정된 애자에 대해 조사하였다. 낮은 절연저항 값이 애자 표면의 오손 때문인지를 확인하기 위해 등가염분부착 밀도를 계산하였다.

애자의 표면에 부착되어 있는 오손물을 세척하여 전기전도도를 측정하고, 등가염분부착밀도(ESDD)를 계산하여 표 1에 나타냈다. 등가염분부착밀도가 각각 상부와 하부에서 0.009와 0.002 [mg/cm²]로 나타났기 때문에 오손등급은 A 등급(0 ~ 0.063 [mg/cm²])이고, 결과적으로 애자의 표면상태는 오손이 안된 매우 깨끗한 상태였으며, 결국 절연저항이 낮은 이유는 두부에 균열이 존재하기 때문인 것으로 나타났다.

표 1. 등가염분부착밀도

Table 1. Equilibrium salt distribution density

	표면적 (cm ²)	전도도 (μs/cm ²)	염분량 (mg)	ESDD (mg/cm ²)
상부	345	34.1	3.24	0.009
하부	545	13.4	1.27	0.002

(2) 주수 누설전류 측정

애자 두부에 균열 존재여부를 판단하기 위한 또 다른 방법은 누설전류 측정방법이다. 앞 절에서 설명한 것과 같이 두부에 균열이 존재하더라도 절연저항이 매우 크다고 하였다. 따라서, 누설전류의 변화를 측정하기 전에 애자를 물속에 담그어 균열사이로 수분을 침투시킨 후 측정한다. 다만, 주의할 점은 애자의 표면을 건조시켜 누설전류를 측정하여야 한다.

그림 1은 Tettex에서 제작한 Capacitance and

Dissipation Factor Test Set으로 정상 현수애자(19개)에 교류전압을 증가시키면서 측정한 누설전류이다. 상용주파수의 교류전압을 10 [kV]까지 상승시켰을 경우 누설전류가 선형적으로 증가한다. 10 [kV]에서 누설전류는 0.35 [mA]로 매우 작은 값을 나타냈다.

애자두부에 균열이 있는 애자의 누설전류를 측정한 그림은 2에 나타났다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 만일 애자에 균열이 있고 수분이 침투되었다면, 낮은 전압에서도 누설전류가 크게 증가되었다.

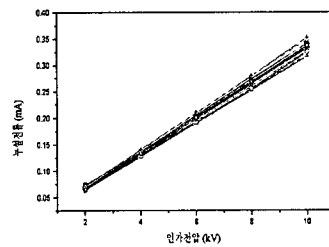


그림 1. 균열이 없는 현수애자의 누설전류
Fig. 1. Leakage current of un-cracked insulator

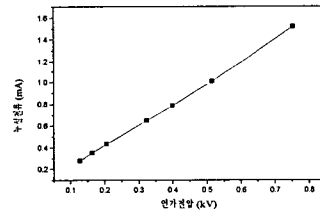


그림 2. 균열이 있는 애자의 누설전류 변화
Fig. 2. Leakage current of cracked insulator

(3) 건조 누설전류 측정

애자를 물속에 담그어 절연저항 또는 누설전류를 측정할 경우, 금구와 자기사이를 접합하고 있는 시멘트사이에 수분이 침투할 경로가 없다면 균열사이로 물이 침투되지 않아 절연저항 및 주수 누설전류 측정값이 정상적인 애자와 비슷한 특성을 갖기 때문에 두부균열을 검출하기가 어렵다. 애자두부에 균열 존재여부를 판가름 할 수 있는 또 다른 방법은 현수애자 한련에 고전압을 인가하면서 누설전류의 파형을 측정하는 방법이다.

그림 3은 정상현수애자 한련에 13.2 kV의 전압을 인가한 상태에서 누설전류 파형을 측정한 그림이다.

그리고, 그림 4는 누설전류 파형을 Fourier Transform한 그래프이다. 정상현수애자의 누설전류의 파형은 제 1고조파(60 Hz)가 대부분을 차지하고, 3 고조파 이상 성분은 매우 적게 포함되어 있는 것으로 나타났다.

그림 5는 두부에 균열이 존재하는 애자의 누설전류 파형을 나타낸 것이다. 두부에 균열이 존재하는 경우에 전압이 증가될수록 그림에서처럼 파형이 왜곡된다. 왜곡된 파형을 Fourier Transform한 형태는 그림 6에 나타냈고, 3 고조파 성분이 정상 현수애자와 비교하여 상대적 큰 것으로 나타났다. 따라서, 누설전류의 파형을 측정하여 3 고조파 성분을 검출함으로써, 애자 두부에 균열 유무를 판단할 수 있다.

3.2 자기가 흡수되는 애자

자기가 흡수되는 애자를 관찰하였다. 애자는 2련으로 접지측에 가까운 애자는 유약층 표면이 용융되어 벗겨졌고, 선로측 애자는 자기가 파손되어 있었다. 자기의 유약이 용융되었다는 것은 섬락이 일어났다는 것을 의미하고, 섬락에 의하여 유약이 용융된 것으로 판단된다. 선로측 애자도 전기적인 충격으로 파손된 것으로 생각되어 진다. 다만, 파손된 자기가 정상적으로 소성된 자기인가를 파악하기 위해 다양한 방법으로 분석하였다.

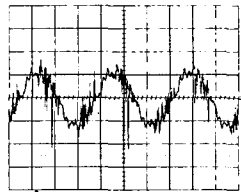


그림 3. 균열이 없는 애자의 전류 파형 (인가전압 : 13.2 [kV])

Fig. 3. Wave form of leakage current for un-cracked insulator(applied voltage : 13.2 kV)

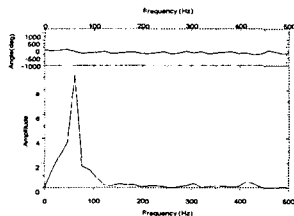


그림 4. 누설전류 파형의 FFT
Fig. 4. FFT of leakage current

(1) 밀도의 측정

자기(porcelain)의 밀도를 Archimedes 방법으로 측정하였다. 자기의 밀도는 2.44 [g/cm³]으로 측정되었고 개기공의 체적률이 0.16 [%]로 계산되었다. 개기공의 체적률은 자기의 외부에 존재하는 기공의 정도를 나타내므로, 개기공의 체적률이 0.16 [%]인 자기는 폐기공률이 높다고 할 수 있다.

(2) 미세구조 관찰

파손된 현수애자 자기를 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 그림에 나타난 것과 같이 파손된 애자(그림 7)에 포함된 기공의 수가 다른 정상 애자에 비하여 특이하게 많은 것으로 나타났고, 기공도 체인 형태로 연결되어 있는 것으로 나타났다.

(3) 흡습시험

자기의 미세구조를 관찰한 결과 기공의 수가 다른 제작년도에 비해 많고, 기공이 체인처럼 연결되어 있었기 때문에 자기가 흡수될 가능성이 있어 흡습시험을 하였다. 흡습시험은 ES 131에 따라 153 [kg/cm²]의 압력에서 12시간 방치한 후에 파단면을 관찰하였다.

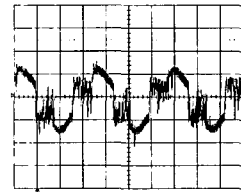


그림 5. 균열 애자의 누설전류 파형 (인가전압 : 8.5 [kV])

Fig. 5. Wave form of leakage current for cracked insulator(applied voltage : 13.2 kV)

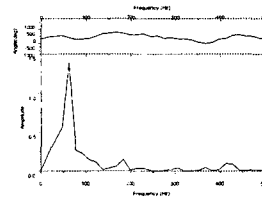


그림 6. 누설전류 파형의 FFT
Fig. 6. FFT of leakage current

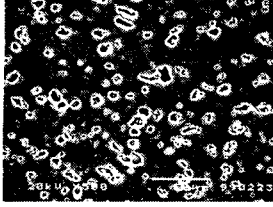


그림 7. 파손된 애자 자기의 미세구조
Fig. 7. Microstructure of broken insulator

그림 8은 흡습시험 후 자기의 파단면을 저배율 입체현미경으로 촬영한 사진이다. 그림에 나타난 것과 같이 자기의 일부분(편에 가까운 쪽)에 흡습을 의미하는 잉크마크가 5 [mm]정도 침투되었다.

자기의 밀도, 기공의 크기와 형태를 관찰하여, 자기가 흡습될 가능성이 있는 애자는 흡습시험을 통해 고장원인을 추정할 수 있다.

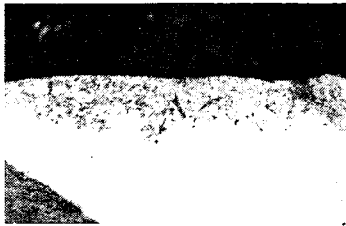


그림 8. 자기의 파단면 사진
Fig. 8. photograph of broken insulator

3.3 표면에 미세결정이 성장한 애자

건조상태에서는 특성에 이상이 없으나 애자표면에 수분이 묻은 상태에서는 절연저항이 급격히 떨어지고, 상용주파 주수 섬락시험에서 전압변동이 심한 애자에 대해 연구하였다.

(1) 절연저항 및 누설전류 측정

현수애자를 물에 24 시간동안 담근 다음에 절연저항을 측정하였다. 물이 표면에 존재하면 절연저항이 매우 낮게 나타나지만, 표면을 완전히 건조시킨 후의 절연저항은 ∞로 나타났다. 결국, 애자의 표면상태에 따라 절연저항이 변하는 것을 알 수 있었다. 애자의 누설전류도 정상 현수애자의 누설전류와 비슷하였다. 따라서 애자에 두부균열은 없었던 것으로 나타났다.

(2) SEM에 의한 표면의 관찰

애자 표면(유약)을 전자현미경으로 관찰하였다.

일부 애자의 표면에 약 4 [μm]이하의 미세결정이 애자 표면에 넓게 성장해 있었다 (그림 9). 미세결정의 주요 성분은 철이고, 크롬과 망간이 포함되어 있었다(그림 10). 이와 같이 미세결정이 애자 표면에 넓게 분포되어 있으면, 표면에 광택이 없어지고, 미세결정의 모양이 매끈하지 못해(그림 10의 왼쪽 위), 염분 또는 진해 등이 애자표면에 부착되어 섬락이 발생하기 쉽다. 그리고, 일부 애자에서 회복전압이 느린 이유는 미세결정 때문에 표면이 매끈하지 못해 물이 표면에 부착되어 있는 시간이 길기 때문이다.

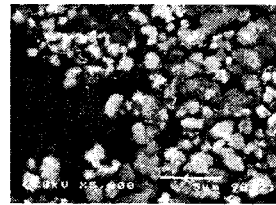


그림 9. 유약층 표면의 미세구조(5,000배)
Fig. 9. Microstructure of broken insulator

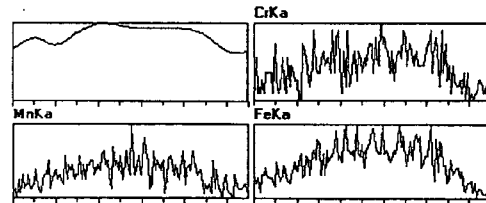


그림 10. 미세결정의 표면높이(왼쪽 위)와 성분(나머지 그림)

Fig. 10. Surface height and component of micro-crystal

4. 결 론

실선로에서 사용중에 고장난 애자의 고장유형 및 고장원인에 대해 기술하였다. 절연저항측정법, 건조 및 주수 누설전류측정법에 등에 의해 애자 두부에 균열 존재여부를 판단하였으며, 파손된 애자의 자기는 기공이 많고, 기공이 고리처럼 연결되어 있었으며, 자기의 일부가 흡습된 것으로 나타났으며, 애자마다 주수섬락시험 값이 다른 원인은 애자표면에 미세결정이 성장하였기 때문인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. W. D. Kingery, Introduction to ceramics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
2. 송일근외, 배전기자재 수명예측 기준제정. 전력연구원 중간보고서, 1998.