

## 배전용 현수애자의 특성분석

### Characteristic Analysis of Suspension Insulators for Distribution Line

김찬영\*, 김주용\*, 송일근\*, 이병성\*

Chan Young Kim\*, Ju Yong Kim\*, Il keun Song\*, Byung Sung Lee\*

#### Abstract

The paper provides the characteristic analyses of porcelain suspension insulators. The comparisons of characteristics were made as a function of failed and unfailed insulators which had been used in the fields. This paper also describes the failure modes occurred in the fields. The aging of cement, corrosion of metal, breaking of shed, puncture in the head, and separation of glaze are different failure modes for porcelain suspension insulators. Among these failure modes, the puncture, breaking, and glaze problems were major concerns in this research. The cracks, porosities of porcelain, and micro-crystals on the glaze were the causes of these failures. These results were confirmed by conducting various failure analyses.

**Key Words(중요용어)** : Porcelain suspension insulator, Failure mode, Glaze

### 1. 서론

배전용 자기제 현수애자는 선로와 대지간의 절연을 목적으로 사용된다. 현수애자의 고장은 선로와 대지간을 단락시켜 전력설비 및 수용가에 막대한 피해를 입힌다.

자기제 현수애자는 자기부, 금구부 그리고 자기와 금구를 결합하는 접합부(시멘트)로 구성되어 있다. 최근에 발생하는 현수애자의 고장은 주로 자기파손, 두부관통, 유약박리, 금구부식 등으로 나타나고, 시멘트의 열화에 의한 핀 이탈고장은 적은 편이다<sup>1,2)</sup>.

자기파손은 자기의 재질, 기공, 결정상, 비정질상 등과 관련이 깊고, 이런 특성들은 소성조건과 밀접한 관계가 있다<sup>3)</sup>.

두부관통은 두부에 존재하는 미세균열, 기공 등이 시멘트, 자기 및 금구의 열팽창차이로 인해 성장하여 캡과 핀 사이에 절연파괴되는 것이다.

유약은 애자의 기계적강도 향상, 흡습 방지, 오손물 부착 억제 등의 목적으로 사용되며, 우천시 오손물이 쉽게 씻겨나 가도록 매끈하게 제작되어 있어야 한다. 만일 유약표면이 매끈하지 않을 경우는 표면 오손을 가속시켜 결국 섬락 등의 고장으로 이어질 수 있다.

금구부식에 의한 고장은 금구부식으로 인해 유약표면에 철(Fe)이 도포되고 섬락이 발생하는 것이다.

본 논문에서는 이러한 현수애자의 고장원인들 가운데, 두부관통, 자기파손 및 유약문제 등의 관점에서 고장 상태 및 유형을 확인하고 다양한 분석법을 이용하여 그 원인을 규명하고자 한다.

### 2. 실험 방법

완품의 현수애자에 대하여 캡과 핀 사이의 절연저항을 YOKOGAWA사의 수동식절연저항계(JISC 1301)로 1000 [V]의 전압을 인가하고 측정하였다. 자기표면의 오손도를 파악하기 위해 전기전도도를 측정하여 등가염분부착밀도(ESDD)를 계산하였다<sup>4)</sup>. 애자의 캡 끝단부터 바깥쪽 밀주름 중심까지의 표면적을 상부, 바깥쪽 밀주름 중심부터 핀까지의

\* : 한국전력공사 전력연구원(KEPRI)  
(대전광역시 유성구 문지동 103-16.)  
Fax : 042-865-5804.  
E-mail : kimcy@kepri.re.kr  
1999년 7월 15일 접수, 2000년 1월 25일 심사완료

표면적을 하부로 나누어 증류수 200 [ml]로 오손된 상부와 하부를 각각 세척하여 전기전도도를 측정하고 실험식에 의해 염분량을 계산하였으며, 염분량을 표면적으로 나누어 등가염분부착밀도를 계산하였다. 누설전류는 TETTEX에서 제작한 Capacitance and Dissipation Factor Test Set으로 측정하였다. 자기의 밀도는 Archimedes 방법으로 3개의 시료를 측정하여 평균값을 택했으며, 개기공의 체적률을 계산하였다. 자기의 미세구조는 시료를 3 [μm] 크기의 다이아몬드가 혼합된 현탁액으로 연마하고, 이온 증착기로 Au를 증착시켜, JEOL사의 전자현미경(JSM5410)으로 관찰하였으며, 에너지 분산분광기(EDS)를 사용하여 성분분석을 하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 두부에 균열이 존재하는 애자

##### (1) 절연저항 측정

애자 두부에 균열이 존재할 경우, 육안으로는 관찰이 불가능하다. 따라서 애자 두부에 균열의 존재여부를 판단하기 위해 여러 방법이 사용되어 왔다. 가장 기본적인 방법은 절연저항계로 측정하는 방법이다. 그렇지만 자기두부의 두께가 15 [mm] 이상이고 시멘트 두께까지 생각하면 갭과 편사이의 간격이 20 [mm]를 넘는다. 결국 자기에 균열이 존재하더라도 균열사이가 오손되지 않은 상태에서 절연저항을 측정하면 역시 ∞를 지시하게 된다. 하지만 균열사이에 수분이거나 기타 전도성물질이 존재한다면 낮은 절연저항 값을 나타내므로, 균열 존재여부를 판단할 수 있다. 실제로 절연저항이 85 [MΩ]으로 측정된 현수애자에 대하여 조사하였다.

##### (2) 등가염분부착밀도 측정

현수애자의 절연저항이 85 [MΩ]로 낮게 측정된 이유가 애자 표면의 오손 때문인가를 확인하기 위해 등가염분부착밀도를 계산하였다.

애자의 표면에 부착되어 있던 오손물을 세척하여 전기전도도를 측정하고, 등가염분부착밀도를 계산하여 표 1에 나타냈다. 등가염분부착밀도가 상부와 하부에서 0.009와 0.002

표 1. 등가염분부착밀도  
Table 1. Equivalent salt deposit density

	표면적 (cm <sup>2</sup> )	전기전도도 (μS/cm <sup>2</sup> )	염분량 (mg)	ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )
상부	345	34.1	3.24	0.009
하부	545	13.4	1.27	0.002

[mg/cm<sup>2</sup>]로 각각 나타났기 때문에 오손등급은 A 등급 (0 ~ 0.063 [mg/cm<sup>2</sup>])이었고, 결과적으로 애자표면은 오손이 안된 매우 깨끗한 상태였으며, 결국 절연저항이 낮은 이유는 두부에 균열이 존재하였기 때문인 것으로 판단되었다.

##### (3) 주수 누설전류 측정

애자 두부에 균열 존재여부를 확인하기 위하여 누설전류를 측정하였다. 앞 절에서 설명한 것과 같이 두부에 균열이 존재하더라도 균열사이가 매우 깨끗하다면 절연저항이 매우 크게 나타난다. 따라서 누설전류를 측정하기 전에 애자를 물속에 담가 균열사이로 수분을 침투시킨 후 측정한다. 다만, 주의할 점은 애자의 표면을 건조시킨 후 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 선형적

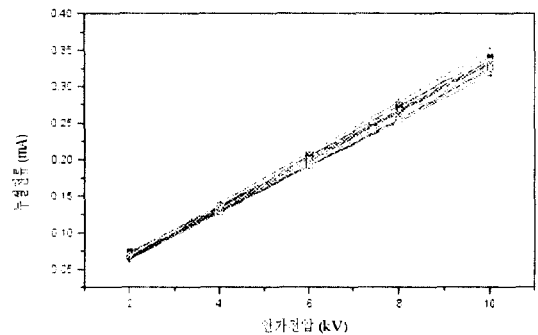


그림 1. 균열이 없는 현수애자의 누설전류  
Fig. 1. Leakage current of un-cracked insulator

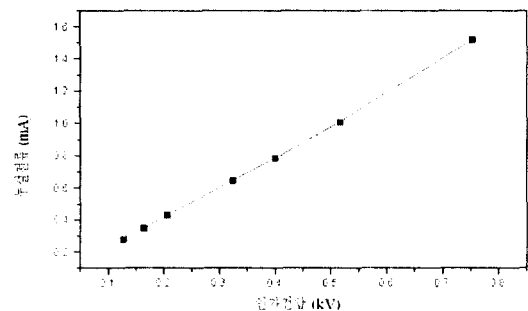


그림 2. 균열이 있는 애자의 누설전류 변화  
Fig. 2. Leakage current of cracked insulator

으로 증가하였고, 10 [kV]에서 누설전류는 0.35 [mA]로 매우 작은 값을 나타냈다.

두부에 균열이 있던 애자의 누설전류를 그림 2에 나타냈다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 애자에 균열이 있고, 균열 사이에 수분이 침투된 애자는, 낮은 전압에서도 누설전류가 크게 증가되었다.

(4) 누설전류 파형 측정

애자두부에 균열존재 여부를 판가름 할 수 있는 또 다른 방법은 현수애자에 고전압을 인가하면서 누설전류의 파형을 측정하는 방법이다.

그림 3은 정상 현수애자에 13.2 kV의 전압을 인가한 상태에서 누설전류 파형을 측정한 것이다. 그리고 그림 4는 누설전류 파형을 Fourier Transform한 그래프이다. 정상 현수애자의

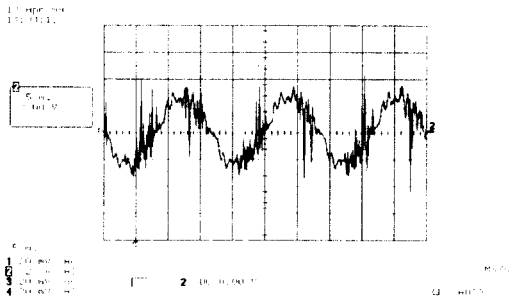


그림 3. 균열이 없는 애자의 누설전류 파형 (인가전압 : 13.2 (kV))  
Fig. 3. Wave form of leakage current for un-cracked insulator(applied voltage : 13.2 kV)

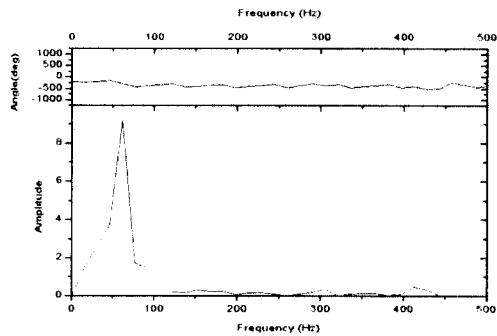


그림 4. 균열 없는 애자의 누설전류 FFT  
Fig. 4. FFT of leakage current for un-cracked insulator

누설전류의 파형은 기본파(60 Hz)가 대부분을 차지하고, 3 고조파는 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 형태를 그림 6에 나타냈고, 3 고조파 성분이 정상 현수애자와 비교하여 볼 때 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 따라서 누설전류의 파형 또는 3 고조파를 검출함으로써, 애자 두부에 균열이 존재하는 것을 확인하였다.

3.2 자기가 파손된 애자

자기가 파손된 애자를 관찰하였다. 애자는 2개가 연결되어 있었으며, 접지측에 가까운 애자는 유약층 표면이 용융되어 벗겨졌고, 선로측 애자는 자기가 파손되어 있었다. 자기의

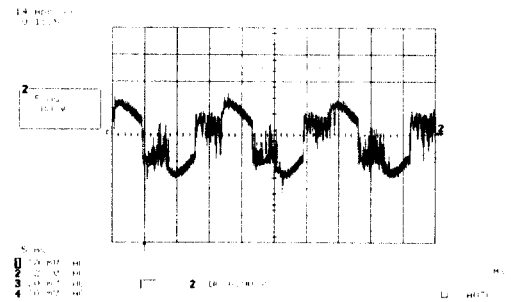


그림 5. 균열이 있는 애자의 누설전류 파형 (인가전압 : 8.5 (kV))  
Fig. 5. Wave form of leakage current for cracked insulator(applied voltage : 8.5 kV)

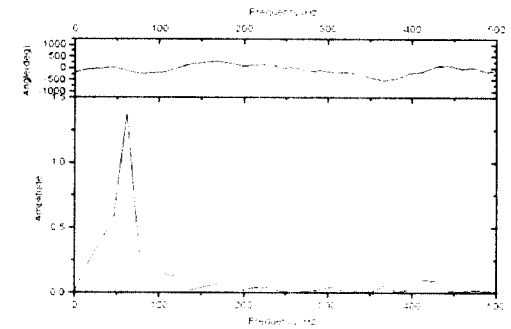


그림 6. 균열 있는 애자의 누설전류 FFT  
Fig. 6. FFT of leakage current for cracked insulator

유약이 용융되었다는 것은 섬락이 일어났다는 것을 의미하고, 섬락에 의해 유약이 용융된 것으로 판단된다. 선로측 애자도 전기적인 충격으로 파손된 것으로 생각되었다. 다만, 파손된 자기가 정상적으로 소결된 자기인가를 확인하기 위해 다양한 방법으로 분석하였다<sup>9)</sup>.

(1) 밀도의 측정

자기의 밀도를 Archimedes 방법으로 측정하였다. 파손된 애자의 자기밀도는 2.44 [g/cm<sup>3</sup>]로 측정되었고, 개기공의 체적률은 0.16 [%]로 계산되었다. 개기공의 체적률은 자기의 표면에 존재하는 기공의 정도를 나타내고, 그림 8에서와 같이 소결이 잘된 정상 애자의 개기공 체적률은 0.05 [%]로 계산되었다. 따라서 파손된 애자는 정상애자에 비하여 개기공의 체적률이 3배정도 컸던 것으로 나타났다.

(2) 미세구조 관찰

파손된 현수애자 자기를 전자현미경(SEM)으로 관찰하였

다. 그림 7에 나타난 것과 같이 파손된 애자에 포함된 기공의 수가 다른 정상애자 (그림 8)보다 많은 것으로 나타났고, 기공도 고리 형태로 연결되어 있는 것으로 나타났다.

(3) 흡습시험

자기의 미세구조를 관찰한 결과 기공의 수가 정상애자에 비해 많고, 기공이 고리처럼 연결되어 있기 때문에 흡습시험을 하였다. 흡습시험은 애자의 제작년도가 1995년이기 때문에 제작당시의 규격인 282 kg/cm<sup>2</sup>의 압력에서 5시간 동안 실시하였다.

그림 9는 흡습시험 후 자기의 단면을 저배율 입체현미경으로 촬영한 사진이다. 그림에 나타난 것과 같이 자기의 일부분에 흡습을 의미하는 잉크마크가 5 [mm]정도 침투되었다. 결국 이 애자의 자기는 소결이 불량하였던 것으로 나타났다.

따라서 파손된 애자는 비록 섬락에 의해 파손되었지만, 소결이 불량하여 쉽게 파손된 것으로 판단되었다.

그림 7. 파손된 애자의 미세구조  
Fig. 7. Microstructure of broken insulator

그림 9. 흡습시험 후의 단면  
Fig. 9. Cross section after porosity test

3.3 유약표면이 불량한 애자

건조상태에서는 절연저항 및 섬락전압에 이상이 없으나 애자표면에 수분이 묻은 상태에서는 절연저항이 급격히 떨어지고, 상용주파 주수섬락시험의 시료별 섬락전압 변화가 심한 애자에 대해 조사하였다.

(1) 절연저항 및 누설전류 측정

현수애자를 24 시간 동안 물속에 담근 다음 절연저항을 측정하였다. 물이 표면에 존재하면 절연저항이 매우 낮게 나타났다. 표면을 완전히 건조시킨 후의 절연저항은 ∞로 나타났다. 결국 애자의 표면 상태에 따라 절연저항이 변하는 것을 알 수 있었다. 애자의 누설전류도 정상 현수애자의 누

그림 8. 정상애자의 미세구조  
Fig. 8. Microstructure of standard insulator

설전류와 비슷하였다. 따라서 애자에 두부균열은 없었던 것으로 확인되었다.

(2) SEM에 의한 표면의 관찰

애자 유약표면을 전자현미경으로 관찰하였다. 그림 10에서와 같이 일부 애자의 표면에 약 4  $\mu\text{m}$  이하의 미세결정이 넓게 성장해 있었다. 선주사(line scan) 분석 결과에 따르면, 미세결정이 유약표면보다 높고, 표면에 굴곡이 있는 것으로 나타났다. 또한 미세결정의 주요 성분은 산화철이고, 크롬과 망간이 포함되어 있는 것으로 나타났다<sup>6)</sup>. 따라서 유약의 원료에 포함되어 있던 철, 크롬, 망간 등이 결정의 핵으로 작용하여 미세결정을 성장하도록 seed 역할을 했던 것으로 판단된다. 이와 같이 미세결정이 애자 표면에 넓게 분포되어 있으면, 표면에 광택이 없어지고, 굴곡이 생겨, 염분 또는 진해 등이 부착되어 심락이 발생하기 쉬운 것으로 나타났다<sup>7)</sup>.

그림 10. 유약의 미세구조(5,000배)  
Fig. 10. Microstructure of glaze

3.4 유약이 박리된 애자

그림 11은 유약단면을 나타낸 미세구조이고, 유약단면의 두께는 약 300  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 유약층에는 원형의 secondary phase가 형성되어 있고, 그 크기가 불균일함을 알 수 있다. 또한 그림 12는 secondary phase를 자세히 관찰한 사진으로 secondary phase가 큰 경우에 경계에 미세균열이 성장하였다. 유약에 존재하는 secondary phase는, 애자의 소성온도인 약 1300  $^{\circ}\text{C}$ 에서, 유약이 두 종류의 액상으로 phase separation이 일어난 상태에서 냉각되어 생성된 것으로써, 이것은 spinodal 분해 또는 입자의 성장과 결합으로 형성될 수도 있다.<sup>3)8)</sup>

유약이 박리되는 원인은 크게 세 가지로 나누어 생각할 수

있다. 첫째 유약과 자기사이에는 열팽창 차이가 존재하며, 그 차이로 인해 유약과 자기가 박리될 수 있다<sup>9)</sup>. 둘째 유약에 존재하는 secondary phase가 클 경우에 열팽창차이로 인해 그림 12에서와 같이 primary phase와 secondary phase 경계에 미세균열이 성장하여 유약에 균열이 생성되어 박리될 수 있다. 셋째 기계적인 충격으로 박리가 일어날 수 있다. 그렇지만 기계적 충격은 매우 국소적인 범위만 박리를 일으킨다. 만일 기계적 충격이 매우 크다면 유약의 박리와 함께 자기가 파손될 것이다.

그림 13은 유약이 박리된 애자의 사진이다. 유약이 용융되었다는 것은 낙뢰로 인하여 심락이 일어났다는 것을 의미하고, 자기와 유약의 경계면이 매우 깨끗한 점으로 미루어, 아크로 인하여 온도가 상승되고, 유약과 자기 사이에 열팽창 차이가 생겨 박리된 것으로 판단된다. 애자를 제조할 때 유약은 자기보다 열팽창 계수가 약간 작은 재질을 사용하여 자기를 압축하도록 하여 애자의 기계적 강도를 향상시킨다<sup>10)</sup>.

그림 11. 유약단면의 미세구조  
Fig. 11. Microstructure of cross section for glaze

그림 12. 유약에 존재하는 secondary phase  
Fig. 12. Secondary phase of glaze

## 참고 문헌

- [1] E. A. Cherney, "Cement Growth Failure of Porcelain Suspension Insulators, Transactions on Power Apparatus and Systems", Vol. PAS-102, No. 8, August 1983.
- [2] D. E. Alexander, "Portand Cement Curing and Volume Characteristics", IEEE PAS paper F76 pp. 375-376.
- [3] W. D. Kingery, Introduction to ceramics, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 402-458, 1960.
- [4] 이위문의, 전력설비의 염진해대책에 관한 연구(Ⅲ), 기술연구원 최종보고서, pp. 58-119, 1988.
- [5] 송일근외, 배전기자재 수명예측 기준제정, 전력연구원 중간보고서, 1999.
- [6] 김찬영외, 자기제 현수애자의 미세구조분석과 유전특성에 관한 연구, 대한전기학회 논문지, 제 48권, 9호, C, pp. 641-647, 1999.
- [7] 김찬영외, 표면방전을 이용한 배전용 현수애자의 표면 특성 분석에 관한 보고서, 전력연구원, TM.97ES03, P1999.381, 1999.
- [8] R. H. Doremus, "Glass Science", John Wiley & Sons, New York, pp. 44-73, 1973.
- [9] C. W. Parmelee, P. E. Buckles, "Study of Glaze and Body Interface", J. Am. Ceram. Soc., pp. 11-15, Vol. 25, No. 1, 1942
- [10] "がいし", 日本電氣學會, pp. 27 - 56, 1983.

그림 13. 유약의 박리  
Fig. 13. Separation of glaze

그렇지만 그 열팽창 차이가 너무 크면 온도변화시 유약이 박리될 수 있기 때문에 적당한 열팽창차이를 선정하는 것이 유약 박리를 감소시킬 것이다.

## 4. 결 론

실선로에서 사용 중에 고장난 애자의 고장유형 및 고장원인에 대해 기술하였다. 두부에 균열이 있던 애자는 절연저항, 건조 및 주수 누설전류, 등가열분부착밀도 등을 측정하여 두부에 균열이 존재하는 것을 확인하였다. 또한 자기의 밀도 측정 및 미세구조 관찰을 통해 기공이 많고, 고리처럼 연결되어 있는 것을 확인하였고, 흡습시험을 통해 자기의 소결이 불량한 것으로 판명되었으며, 결국 이 애자는 소결이 불량하여 쉽게 파손된 것으로 밝혀졌다. 또한 건조상태에서는 이상이 없으나 주수상태에서는 섬락전압이 낮게 나타난 애자는 표면에 미세결정이 성장하여 수분이 애자표면에 접촉하고 있는 시간이 길어 섬락전압이 낮아진 것을 알았다. 섬락으로 유약이 박리된 애자를 분석한 결과, 유약층에 존재하는 secondary phase의 크기가 크고, 유약과 자기의 열팽창 차이가 커서 유약이 박리된 것으로 판단되었다.