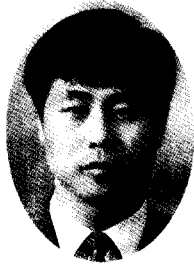


## 피뢰기 소자(ZnO)의 열화원인 분석



김찬영  
전력연구원 전력계통연구실



송일근  
전력연구원 전력계통연구실



김주용  
전력연구원 전력계통연구실

### I. 서론

이 논문은 현장에서 사용중 고

장난 피뢰기를 발취하여 고장원인을 분석한 결과를 요약하였다. 주요내용은 X-선회절(XRD) 및 전자현미경(SEM)으로 피뢰기 소자(ZnO)의 미세구조(microstructure)를 분석하였다. 분석 결과, 산화아연(ZnO) 입자와 시멘트 층이 불균일 하였고, 소자에 포함되어 있던 불순물 주위에 전기적인 스트레스가 집중되어 입자가 성장하는 재소결 현상이 있었으며, 약 50 $\mu$ m의 길쭉한 기공(pore)이 관찰되었다.

### II. 이론적 고찰

피뢰기의 동작원리를 이해하기 위해서는 소자의 전압-전류 특성과, 전압-전류 특성이 소자의 재료와 어떠한 관련이 있는가를 이해하는 것이 필요하다. 또한 피뢰기 소자에서 발생할 수 있는 고장의 유형을 파악하여 고장원인 분석에 사용하였다.

#### (1) 전압-전류 특성

피뢰기 소자의 전압-전류 특성은 그림 1과 같다. 피뢰기 소자의

동작특성은 전압-전류 특성에 따라 누설영역, 전압제한영역, 그리고 저항영역으로 구분된다.

#### (a) 누설영역

피뢰기가 정상전압에서 동작하고 있을 때 피뢰기 소자에는 누설 전류가 흐른다. 이 누설 전류는 1mA 이하이고, 이 영역을 누설영역이라 한다. 이 영역에서의 재료는 선형저항 특성을 보인다. 그림 1에서처럼 로그 그래프에 그리면 선형저항은 지수함수의 곡선처럼 보인다.

#### (b) 전압제한영역

선로에 과전압이 유입되면 그 과전압이 피뢰기에 인가된다. 만일 그 과전압이 최대연속 동작전압(MCOV)보다 크면 피뢰기가 동작하는데, 이 영역을 전압제한영역이라 한다. 이 영역에서는 전압이 약간만 증가하여도 소자에 흐르는 전류는 크게 증가한다. 이 영역에서 재료의 특성은 비선형이고, 전류는 전압에 따라 거의 지수함수로 증가한다. 그림 1에서처럼

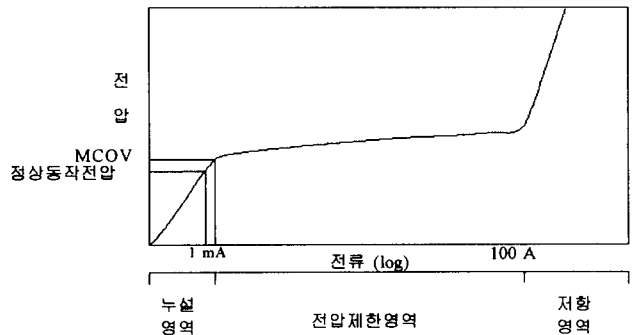


그림 1. 피뢰기 소자의 전압-전류 특성

럼 로그 그래프에 그리면, 이것은 거의 직선으로 나타난다.

**(c) 저항영역**

피뢰기에 인가되는 전압이 전압 제한영역 보다 크면 피뢰기 소자는 다시 선형저항의 특성을 보인다. 이러한 선형저항의 특성이 다시 나타나는 영역을 저항영역이라 한다.

**(2) ZnO의 전기적 특성**

피뢰기 소자는 여러 성분들이 함께 혼합되고 소결(높은 온도로 열을 가함)되어 제조된다. 피뢰기 소자에서 가장 중요한 성분은 산화아연(ZnO)이다. 산화아연은 시멘트 역할을 하는 다른 성분들과 혼합된다.

피뢰기 소자의 전기적인 특성은 산화아연 입자의 미세함, 소결온도와 시간, 그리고 시멘트 성분에 의하여 조절된다. 시멘트의 중요한 성분은 산화비스무스( $Bi_2O_3$ )이다. 산화비스무스와 혼합된 것은 산화알루미나( $Al_2O_3$ ) 분말이다. 알루미나는 전압제한 영역에서 기울기 및 누설영역에서 누설전류에 많은 영향을 주기 때문에 시멘트에서 중요한 성분이다.

시멘트에서 알루미늄 양의 증가는 전압제한영역에서 기울기를 더 평평하게 하며, 이것은 바람직한 효과이다. 그러나 알루미늄 양의 증가는 누설영역에서 누설전류를 증가시키는데, 이것은 바람직하지 않은 효과이다. 실제로 전압-전류 특성을 조절하기 위해서 그 밖의 성분들이 첨가되기도 한다.

누설영역에서 모든 전류는 시멘트를 통하여 흐른다. 불행하게도 시멘트는 온도에 따라 저항이 지수 함수적으로 감소한다. 그 영향은 높은 온도에서 더욱 뚜렷해진다. 온도에 따른 저항의 변화는 피뢰기 고장 원인의 하나이다. 주어진 온도에서 시멘트 재료의 V-I 곡선은 거의 선형이다.

전압제한영역에서 동작할 때 이 과정은 더욱 복잡해진다. 소결 과정 동안 시멘트 층이 산화아연 입자 주위에 형성되고, 이 층에 에너지 장벽이 형성된다. 이 현상은

실리콘 트랜지스터 안의 P-N접합의 형성과 비슷하며, 전류가 그 접합을 흐르기 전에 어떤 전압이 요구된다. 그러나, 트랜지스터와 다르게 피뢰기 소자의 구조는 엄격하게 고정되어 있지 않다. 이 층들은 불규칙 방향으로 소자 전체에 퍼져있고 일반적으로 산화아연 입자를 감싸고 있다.

**(3) 피뢰기 고장유형**

피뢰기 소자는 국부적으로 높은 전류밀도에 의하여 손상을 받는다. 이것은 혼합물이나 시멘트의 어느 하나 또는 두 개 모두 영구적으로 손상을 일으키며, 소자 재료에 국부적인 재소결을 일으켜 소자의 물리적 및 전기적인 특성을 변화시키는 과정으로 나타날 수 있다. 피뢰기 소자의 고장유형은 아래와 같다.

- (a) 피뢰기 소자의 전극을 모서리까지 할 경우에 소자의 외부표면으로 삼각이 일어난다. 이것은 두 가지 이유 때문에 일어난다. 첫째로, 표면을 가로지르는 물리적인 거리가 작기 때문이다. 두 번째로, 소자의 옆면에 불순물이 포함되기 쉽다. 옆면에 어떤 불순물의 포함은 소자 삼각 전압을 상당히 줄일 수 있다.

(b) 모서리까지 전극을 하지 않은 소자는 전극의 외부 모서리에 전류가 집중된다. 전류의 집중은 모서리에 균열을 발생시킨다.

(c) 과전압이 유기 되면 소자에 열이 발생한다. 열이 초기에 균일하게 생성될 지라도 소자의 외부 표면은 공기로의 대류나 피뢰기 하우징쪽으로 전도에 의하여 열을 분산할 수 있다. 하지만 소자의 중앙은 주위의 산화아연 입자에 열을 전도시킨다. 따라서 소자의 중앙에 열이 집중되는 열 폭주(thermal runaway)를 일으킨다.

(d) 공기는 파이버글래스나 실리콘 고무(폴리머에자의 하우징에 사용하는 보통의 재료)와 같은 고체보다도 열전도가 훨씬 나쁘다. 그러므로 피뢰기 하우징 안에 갇혀진 공기에 열이 집중되는 부분이 발생할 것이다. 이와 같이 열이 집중되어 고장이 발생하게 된다.

(e) 피뢰기 소자는 어떤 레벨이상의 임펄스로 손상을 입는다. 이 손상은 전류밀도의 변화 때문이며, 소자재료에 국부적인 재소결을 일으킨다. 이 국부적인 재소결

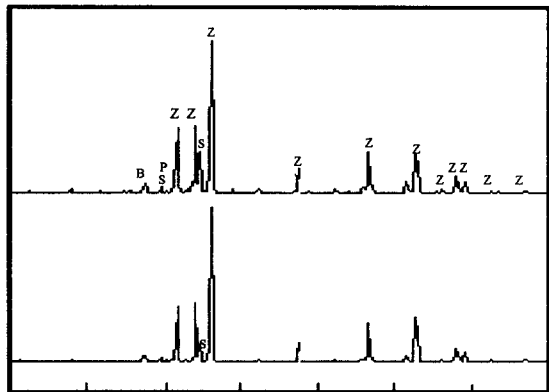


그림 2. X-선 회절에 의한 피뢰기 소자의 정성적 분석  
(Z: ZnO, B:  $Bi_2O_3$  P: Pyrochlore, S:  $Zn_7Sb_2O_{12}$ )

을 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 전압을 견디지 못한다. 증가된 국부적인 과열, 그리고 전력 손실증가를 갖게되어 연속 고장을 일으킨다.

### III. 파괴기 소자의 열화원인분석

현장에서 사용중 고장난 파괴기가 어떤 이유로 고장이 발생하였는가 파악하기 위해 경년 소자를 발취하여 분석하였고, 신품의 소자와 비교분석하였다.

고장난 파괴기 소자는 산화아연(ZnO)에  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  등의 금속산화물을 첨가하고, 고온( $1100^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$ )에서 소결시켜 만들어 졌으며, 고장 파괴기 소자를 여러 방법을 사용하여 열화원인을 분석하였다.

#### (1) 고장 파괴기의 균열

고장 파괴기 소자의 외관을 관찰한 결과, 소자 전극의 모서리에 아크 흔적이 있으며, 이 아크로부터 소자 내부로 균열이 발생하였다. 소자에 아크의 흔적이 있다는 것은 과전압이 인가된 것으로 생각될 수 있으며, 많은 전류가 흘러 소자가 가열되고 소자 저항이 작아져서 다시 전류가 집중되어 소자의 중앙에 균열이 발생한 것으로 생각된다.

#### (2) X-선 회절을 이용한 정성적 분석

발취한 경년품(고장품) 및 신품 파괴기 소자를 X-선 회절(X-ray Diffraction)을 이용하여 정성적인 분석을 하였다. 소자의 X-선 회절은 그림 2와 같다. 그림의 위쪽은 신품, 아래쪽은 고장난 파괴기 소자의 X-선 회절을 보여준다. 산화

아연(ZnO)이 주요 상(phase)이고, 그 밖에는  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  및  $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$  (Spinel) 상이 관찰되었다. 고장 파괴기 소자의 X-선 회절 패턴을 보면 산화아연을 제외한 상의 intensity는 신품파괴기에서 관찰한 intensity보다 작다. 이것은 제조시 시멘트의 성분을 적게 넣은 것으로 생각된다.

#### (3) 신품 파괴기와 고장 파괴기 소자의 미세구조 비교

그림 3은 신품 파괴기 소자를 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 관찰한 미세구조를 나타낸다. 산화아연(ZnO) 입자의 크기는 약  $10\mu\text{m}$ 로 재료 전체에 균일하다.

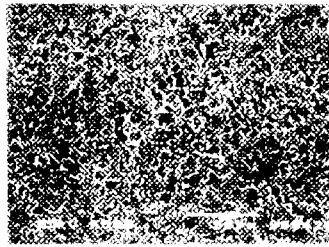


그림 3. 신품 파괴기 소자의 SEM 사진

그림 4는 고장 파괴기 소자의 미세구조를 보여준다. 산화아연 입자의 크기가 수  $\mu\text{m}$ 에서  $20\mu\text{m}$

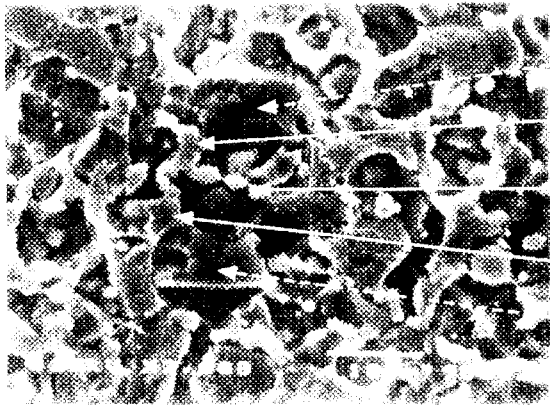


그림 5. 신품 파괴기 소자의 미세구조

이상으로 다양하게 분포되어 소자의 입자가 균일하지 않음을 알 수 있다.

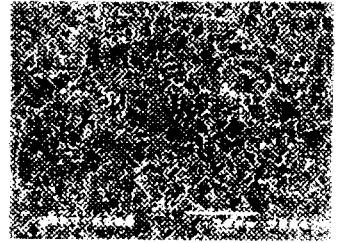


그림 4. 고장 파괴기 소자의 SEM 사진

#### (4) 신품 파괴기 소자의 미세구조 및 화학적 분석

그림 5는 신품파괴기 소자 입자를 SEM으로 관찰한 미세구조이다. 위에서 설명하였듯이, 산화아연 입자가 균일하게 분포되어 있고, spinel 상이 산화아연 입자를 감싸고 있다. 이러한 spinel 상은 산화아연 입자의 사이에  $1 \sim 2\mu\text{m}$ 의 크기로 성장한다.

Spinel은 소결시 입계 이동을 억제시켜 ZnO 입자 성장을 감소시킨다. 산화아연 입자(A)와 spinel(B)의 화학적 성분 분석은 그림 6과 같다. 산화아연 입자는 소량의  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 와  $\text{CoO}$ 를 함유하고 있다. Spinel( $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$ ) 상의 주요 성분은 ZnO와  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ 이고, 여기에 소량의  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,

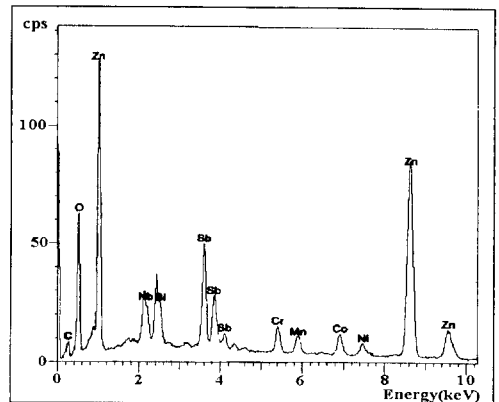
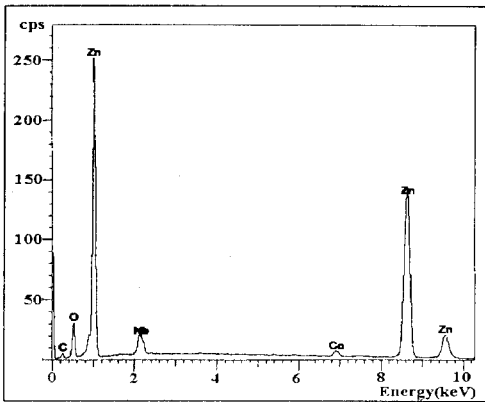


그림 6. 신품 피뢰기 소자의 산화아연 입자(A) 및 Spinel(B)의 화학적 분석

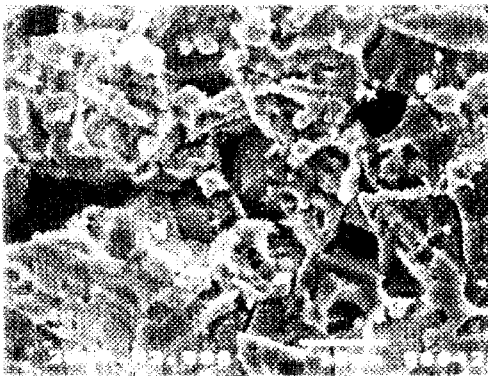


그림 7. 고장난 피뢰기 소자의 SEM 사진

CoO, NiO 등의 산화물을 함유하고 있다.

**(5) 고장난 피뢰기 소자의 미세 구조 관찰 및 화학적 분석**

그림 7은 고장난 피뢰기 소자에서 관찰한 두 곳의 미세구조를 보여준다. 입자의 형태 및 spinel 상의 분포가 위치에 따라 다름을 알 수 있다. 그림 7의 오른쪽에 보이는 것처럼, 산화아연 입자 사이에 시멘트 층이 적어 산화아연 입자끼리 접촉하고 있다. 시멘트 층은 피뢰기 소자에서 에너지 장벽을 형성하고 있는데, 고장난 피뢰기에서처럼 시멘트 층의 결핍은 누설영역에서 누설전류가 흐르지 않게 된다. 그리고 정상동작전압보다 약간 높은 전압만 가해져도

에너지 장벽이 없어(시멘트 층이 없으므로) 전류가 집중되고, 이때문에 피뢰기 소자의 고장으로 이어질 수 있다. 또한 산화아연 입자의 크기가 20 $\mu\text{m}$  이상인 입자도 관찰되었다. 이것은 전술한 바와 같이 spinel 상은 산화아연 입자의 성장을 억제하는 효과가 있는데, 고장난 피뢰기 소자에서는 X-선 회절 분석에서 관찰된 것처럼 spinel 상이 적어 입자가 20 $\mu\text{m}$  이상으로 성장한 것으로 생각되어 진다

**(6) 고장난 피뢰기 소자의 열화 현상**

그림 8은 고장난 피뢰기 소자의 재소결(열화) 과정을 보여준다. 사진의 위쪽은 전극이고, 이 전극으

로부터 전류가 유입된다. 그림에서 보이는 것처럼 전극과 산화아연 경계면에 불순물이 존재한다. 이 불순물의 화학적 성분[그림 9]은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ 로 구성되어 있다. 그림에서 보이는 것처럼 불순물 주위에 위치하고 있는 입자는 다른 입자들에 비하여 검고 크게 보인다.

그림 8의 오른쪽 그림은 불순물 주위에서 전류밀도가 변화하는 모습을 보여준다. 그림과 같이 불순물 주위에 전기적인 스트레스가 집중되어 국부적인 열이 발생하고, 입자가 성장하는 재소결 현상이 발생하였다. 이러한 재소결 과정 때문에 맑은 날에 고장이 발생한 것으로 추정된다.

그리고, 그림 8에 약 50 $\mu\text{m}$ 의

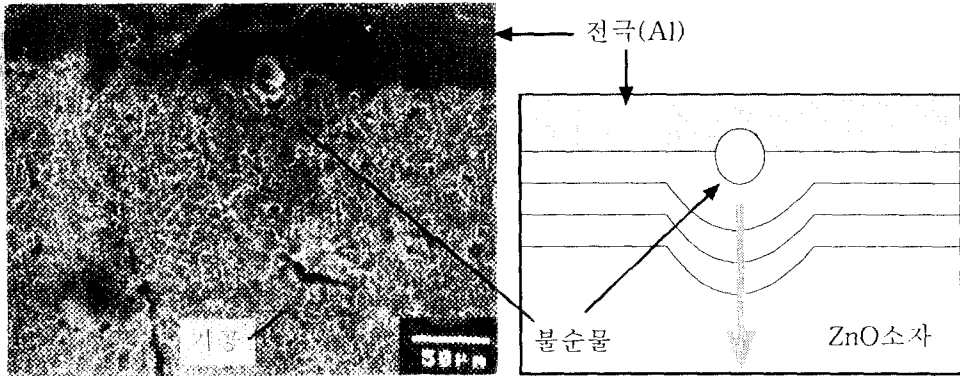


그림 8. 고장 피뢰기 소자의 재소결 현상

기공(pore)이 관찰되었는데 이것은 소자의 제조과정 중에 생성된 것으로 생각된다. 기공 속의 공기는 열전도율이 적어서 열이 집중되어 피뢰기 소자의 고장으로 이어질 수 있다.

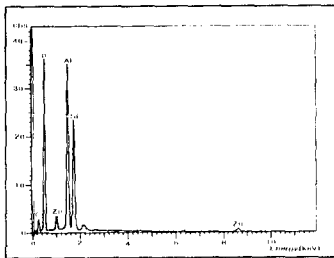


그림 9. 불순물의 화학적 분석

#### IV. 결 론

소자의 전극에 아크의 흔적이 있고, 이 아크로부터 소자에 균열이 시작되었으며, 이것은 아크가 일어난 부분에 과전류가 유입되어 소자의 열화가 급격히 진전한 것으로 생각된다.

1) X-선 회절 분석에서는 고장 피뢰기 소자의 시멘트 함량이 신

품 피뢰기 소자와 비교하여 적게 나타났다. 또한 그림 7(B)와 같이 SEM으로 관찰한 미세구조에는 시멘트 없이 산화아연 입자끼리 접촉하고 있음을 보여준다. 시멘트 층은 피뢰기 소자에서 에너지 장벽을 형성하고 있는데, 고장난 피뢰기처럼 시멘트 층의 결핍은 누설영역에서 누설전류가 전혀 흐르지 않아서 좋은 점은 있으나, 정상 동작전압보다 약간의 높은 전압만 가해져도 에너지 장벽이 없기 때문에 전류가 집중되어 피뢰기 소자의 고장 원인이 된다.

2) 대부분 피뢰기 소자에서 산화아연 입자의 크기는 약  $10\mu\text{m}$ 로 균일한데 비하여 고장난 피뢰기의 산화아연 입자의 크기는 수  $\mu\text{m}$ 에서  $20\mu\text{m}$  이상으로 불균일하였다. 또한, 약  $50\mu\text{m}$ 의 기공(pore)도 관찰되었는데 이것은 소자의 제조과정 중에 생성된 기공의 일종이며, 기공 속에 갇혀진 공기는 열전도율이 적어서 열이 집중될 수 있고, 열의 집중은 피뢰기 소자의 고장으로 이어질 수 있다.

3) 전극(AI)에 포함된 불순물 주위에 전기적 스트레스가 집중되어 국부적인 열이 발생하였고, 입자가 성장하는 재소결 현상이 일어

났다. 재소결 현상은 단기간에 일어날 수 있으며, 이러한 재소결 현상이 고장을 유발시킨 것으로 추정된다.

#### V. 참 고 문 헌

- [1] Alain VICAUD, "A. C. VOLTAGE AGEING OF ZIN C-OXIDE CERAMICS," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, pp. 49-58, April 1986.
- [2] 송일근외 4명, "배전기차재 수명예측 기준제정," 본기보고서, 전력연구원, 1998.
- [3] 김형식의 4명, "피뢰기 소자의 Surge 흡수용량 증대에 관한 연구(II)," 최종보고서, 한국전기연구소, 1996.
- [4] M.V. Lat and J. Kortschinski, "Distribution Arrester Research," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7, pp. 3496-3504 July 1981.
- [5] L. M. Levinson, "Electronic Ceramics," Marcel Dekker, Inc. pp. 275-305, 1987.

< 조한구 박사 >