

뇌임펄스전류에 의한 ZnO 피뢰기의 열화특성

(Degradation Properties of ZnO Surge Arresters Due to Lightning Impulse Currents)

이수봉* · 이복희**

(Su-Bong Lee · Bok-Hee Lee)

요 약

이 논문은 뇌임펄스전류의 입사에 따른 ZnO 피뢰기의 열화 특성에 대하여 기술하였다. 뇌서지에 의한 ZnO 피뢰기의 열화특성을 분석하기 위해 시료 ZnO 피뢰기에 8/20[μ s], 2.5[kA]의 표준뇌임펄스전류를 인가하였다. 뇌임펄스전류를 인가한 것과 인가하지 않은 ZnO 피뢰기에 흐르는 상용주파수 AC 및 DC 누설전류를 측정하였다. 그 결과 임펄스전류의 인가횟수가 증가함에 따라 누설전류는 증가하였고 AC전압에서 누설전류의 비대칭성은 뚜렷하게 나타났다. 뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 피뢰기의 ZnO 입자는 균일한데 반해 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 피뢰기의 ZnO 입자는 불균일하게 변형되었다. 또한 뇌임펄스전류 인가에 따른 Bi₂O₃의 감소가 입계층의 결핍을 발생시키며 입계층의 결핍에 의한 전류의 집중이 ZnO 피뢰기 소자의 비선형 특성의 열화에 대한 중요한 요인으로 작용한 것으로 밝혀졌다.

Abstract

This paper describes the degradation properties of ZnO surge arresters impressed by lightning impulse currents. To investigate the deterioration behaviors of ZnO surge arresters due to lightning surges, the 8/20[μ s], 2.5[kA] standard lightning impulse currents were injected to the ZnO surge arrester under test. The power frequency AC and DC leakage currents flowing through the ZnO surge arresters with and without the injection of lightning impulse currents were measured. As a result, the leakage currents are increased and the asymmetry of the AC leakage current is pronounced as the number of injection of the impulse current increases. The ZnO grain of the surge arrester without the injection of lightning surges are uniform but the ZnO grain of the ZnO surge arrester with the injection of lightning impulse currents are deformed. Also, it was found that the decrease of the Bi₂O₃ due to the lightning impulse current leads to the lack of grain boundary layer and the current concentrated by the lack of grain boundary layer play an important role to degrade nonlinear property of ZnO surge arrester blocks.

Key Words : ZnO Surge Arrester, Leakage Current, Impulse Current, Degradation, ZnO Grain, Lightning Surge

* 주저자 : 인하대학교 전기공학과 박사수료

** 교신저자 : 인하대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

접수일자 : 2008년 12월 9일

1차심사 : 2008년 12월 17일

심사완료 : 2009년 1월 9일

1. 서 론

피뢰기는 전력계통의 외부에서 침입하는 뇌서지나 내부에서 개폐장치의 조작으로 발생하는 개폐서지, 일시적 과전압 등의 높은 전압의 순시적 전기에너지를 대지로 방출하여 송전선로 및 발·변전 기기를 보호하는 역할을 한다. 하지만 전력계통에서의 선로 및 부하설비가 증가함에 따라 이상전압의 발생 빈도가 많아져 지난번 여수국가산업단지에서 발생한 것과 같은 피뢰기 고장으로 인한 정전사고가 증가하고 있다. 현재 배전용 피뢰기는 주로 산화아연(ZnO)소자로 구성되어 있으며, 산화아연소자의 서지전류에 대한 제한전압 특성은 우수한 비직선형을 가진다. ZnO 피뢰기에 동작개시전압보다 높은 뇌서지전압이 인가되면 수 $[\mu\text{s}]$ 이내에 이상전압을 피보호기기의 절연내력 이하로 억제시키고, 이 과정에서 발생한 뇌격전류는 ZnO 피뢰기 소자를 통하여 대지로 방출된다. 그 후 ZnO 피뢰기는 이상전압이 소멸되면 즉시 원래의 상태로 회복되며, 정격전압에서도 속류가 흐르지 않고 계통운전전압에 의한 미소한 누설전류만 흐르게 된다.

하지만 뇌서지가 침입하여 열화가 누적된 ZnO 피뢰기 소자는 상용주파수 전압에서 미소한 누설전류에 의해 지속적으로 열화가 가속된다. 오랜 사용으로 경년열화된 ZnO 피뢰기 소자의 저항성 누설전류는 증가하며 누설전류에 의한 ZnO 피뢰기 소자의 발열량이 증가한다. 이러한 과정이 지속되는 동안 n형 반도체인 ZnO 피뢰기의 부(-)온도 특성에 의해 저항성 누설전류는 더욱 증가하게 되어 결국에는 열 파괴 되어 보호장치로서의 역할을 충분히 발휘하지 못하고 사고를 유발하게 된다[1-4].

따라서 본 논문에서는 8/20 $[\mu\text{s}]$ 의 표준뇌임펄스전류 2.5[kA]를 인가시켜 인위적으로 열화시킨 ZnO 피뢰기와 뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 피뢰기에 대하여 상용주파수 교류 및 직류 전압을 인가할 때 흐르는 누설전류를 측정하여 그 특성의 변화를 분석하였다. 또한 뇌임펄스전류를 인가한 것과 인가하지 않은 ZnO 피뢰기에서 ZnO 소자를 분리하여 소자의 미세구조 변화를 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 ZnO 피뢰기의 규격과 전기적 특성은 표 1과 같다. 실험에 사용된 피뢰기는 산화아연 소자로 이루어진 애자형 피뢰기이며, 정격전압과 공칭방전전류가 각각 18[kV], 2.5[kA]이고 최대 연속운전전압은 15.3[kV]이다. 직류 및 교류전압에 의한 뇌임펄스전류의 인가여부에 따른 ZnO 피뢰기의 전기적 특성을 분석하기 위해 사용된 최대 50[kV]까지 발생시킬 수 있는 직류 및 교류전압 발생장치의 실험회로도를 그림 1에 나타내었다.

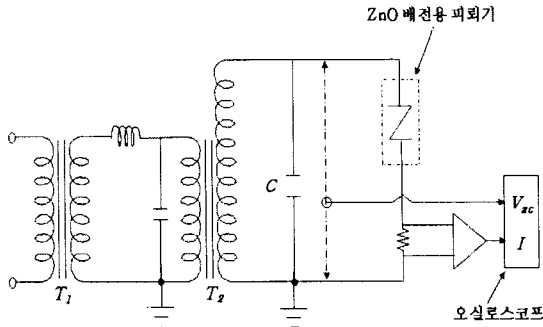
표 1. 본 연구에 사용된 ZnO 피뢰기의 규격
Table 1. Specifications of the ZnO surge arrester used in this work

항 목		특성값	
정격전압[kV]		18	
공칭방전전류[kA]		2.5	
최대 연속운전전압[kV]		15.3	
동작개시전압 [kV]	교류전압	16.20	
	직류전압	22.90	
제한전압[kV]		65	
방전내량	단시간 대전류[kA]	25	
	장시간 소전류	$[\mu\text{s}]$	500
		A_{crest}	20

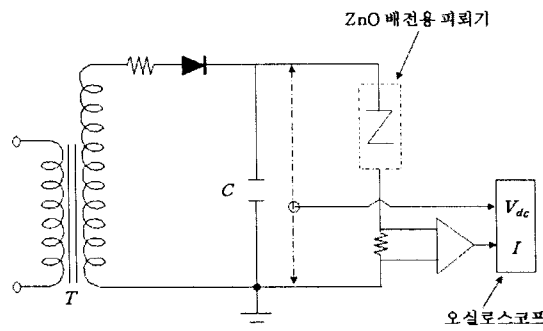
그림 1 (a)는 교류전압발생장치의 실험회로도로서 콘덴서 C에 상용주파 교류전압이 인가되고, 전원측으로 침입하는 노이즈를 제거하기 위해서 변압기 T_1 과 T_2 사이에 LC저역통과필터를 사용하였다. 그림 1 (b)는 직류전압발생장치의 실험회로도로서 다이오드와 커패시터 C를 이용하여 직류전압이 인가되도록 구성하였다. 18[kV] ZnO 피뢰기에 직류 및 교류전압을 인가하였으며, 피뢰기 하단에 1[k Ω]의 저항을 접속하여 누설전류를 측정하였다.

인가전압과 누설전류의 파형은 디지털 오실로스코프(BW 1[MHz], 5[Gs/s] 4채널)로 관측하였다. 인가전압의 측정에는 수동성 고전압 프로브(BW 75 [MHz], 감쇠비 1/1000, 최대입력 DC 50[kV])를 사용하였다. 또한 누설전류 검출용 저항 양단에서 능동

성 FET 프로브(BW 1[MHz], 감쇠율 1/10, 최대전압 ±15[V])에 의해 측정된 전압과 저항의 비로 ZnO 피뢰기를 통해 흐르는 누설전류를 산출하였다.



(a) AC 전압 발생장치



(b) DC 전압 발생장치

그림 1. ZnO 피뢰기의 전기적 특성의 평가를 위한 실험회로

Fig. 1. Experimental circuit for evaluating the electrical properties of ZnO surge arrester

3. 결과 및 고찰

3.1 뇌임펄스전류의 인가횟수에 따른 ZnO 피뢰기의 누설전류 특성

뇌서지전류에 의한 ZnO 피뢰기의 열화는 상용주파수 교류 과전압에 의한 열화기구와는 다르다. 뇌서지 전류는 ZnO 피뢰기 내부 소자의 비선형 저항 특성을 저하시켜 보호성능에 크게 영향을 주며 이것은 뇌서지 전류의 경우 상용주파수 교류 과전압에 비해 ZnO 피뢰기 소자의 입계층에 가해지는 전계의

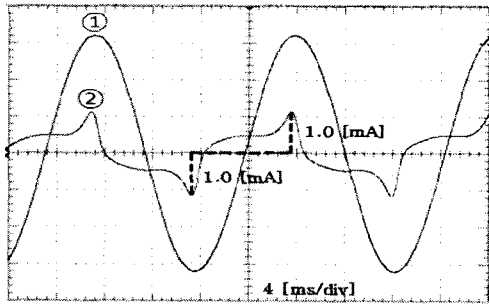
강도가 정상상태보다 대단히 크므로 소자의 보호동작시 보다 많은 열이 발생하고 이 때문에 입계층의 변형이 쉽게 일어나기 때문이다. 만약에 ZnO 피뢰기 소자가 불균일한 구조적 결함을 포함하고 있다면, 그 부분에 열이 집중되고 이로 인해 ZnO 피뢰기 소자는 용융과정을 통한 재소결이 일어난다. 이와 같은 과정에서 ZnO 입자가 성장하고 입계층이 감소하면 ZnO 피뢰기 소자는 정상운전전압에서도 쉽게 가열되어 열폭주가 발생하게 되고 결국 ZnO 피뢰기 소자는 파괴된다[5-6].

피뢰기의 시험과 성능평가에 적용되는 뇌임펄스전류에 대한 표준규격은 미국의 ANSI/IEEE 규격과 유럽에서 주로 적용하고 있는 IEC 규격이 있다.

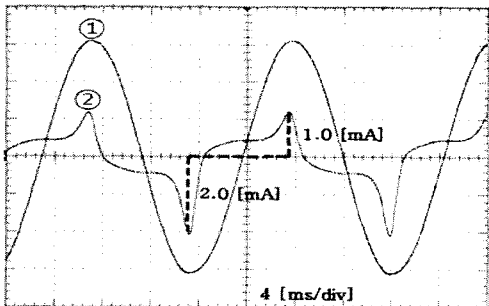
따라서 본 논문에서는 뇌서지 전류가 ZnO 피뢰기에 미치는 영향을 분석하기 위해 뇌격전류가 피뢰기에 입사되는 것을 모의하여 표준뇌임펄스전류 2.5[kA]를 75회까지 인가하여 ZnO 피뢰기의 전기적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. IEC 규격의 임펄스전류 시험방법에 따라 8/20[μs]의 임펄스전류를 발생시킬 수 있는 임펄스전류발생장치를 사용하여 ZnO 피뢰기에 40초 간격으로 표준뇌임펄스전류 2.5[kA]를 75회, 즉 5×15개의 군단위로 인가하였다. 각 군단위 마다 실온의 온도가 되도록 피뢰기를 충분히 냉각시킨 후 교류 및 직류전압을 인가하여 ZnO 피뢰기를 통해 흐르는 누설전류를 측정하였다.

뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 피뢰기와 45회, 75회의 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 피뢰기에 교류전압을 인가한 경우 피뢰기 양단에서 나타나는 전압과 피뢰기를 통해 흐르는 누설전류의 전형적인 파형의 예를 그림 2에 나타내었다. 그림 2 (a)의 뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 피뢰기에 흐르는 교류전압에 대한 누설전류 파형은 정·부극성이 대칭으로 나타나고 있지만 그림 2 (b), (c)는 뇌임펄스전류의 인가횟수가 많아질수록 누설전류 파형의 정극성은 변화가 없지만 부극성 부분이 커져서 정·부극성이 비대칭적으로 나타났다. 이처럼 임펄스전류의 인가횟수의 증가에 대한 ZnO 피뢰기의 교류전압-누설전류 특성이 서로 다른 변화를 보이는 것은 입계층의 경계면에서 각각의 쇼트키장벽이 다르게 변형되기 때문이다. 뇌임펄스전류가 흐르는 동안 순바이

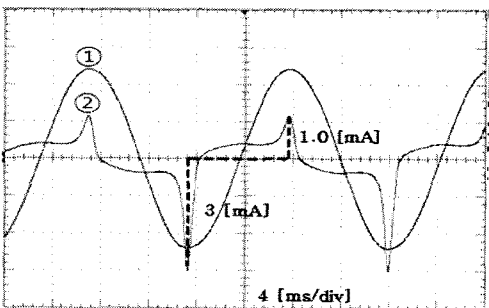
뇌임펄스전류에 의한 ZnO 피뢰기의 열화특성



(a) 인가하지 않음



(b) 45회



(c) 75회

그림 2. 8/20[μ s], 2.5[kA] 뇌임펄스전류의 인가횟수에 따른 ZnO 피뢰기의 누설전류 파형 [①전압-10(kV/div), ②누설전류-1(mA/div)]

Fig. 2. Waveforms of leakage current of ZnO surge arrester as a function of the number of injections of 8/20[μ s], 2.5[kA] impulse current [① : Voltage-10(kV/div), ② : Leakage current-1(mA/div)]

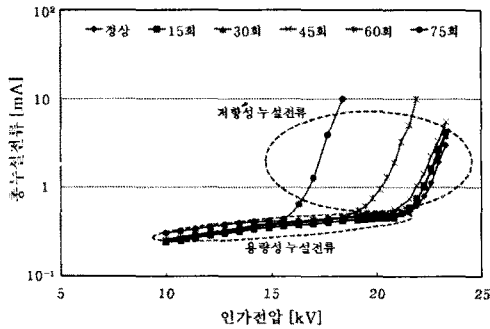
어스와 역바이어스의 쇼트키장벽의 높이는 각각 다르게 변형된다. 쇼트키장벽 높이의 변형은 금속 이온 분포의 변형과 입계층의 경계면인 Bi₂O₃ 입계층

에서의 산소이온 수의 감소에 영향을 미친다.

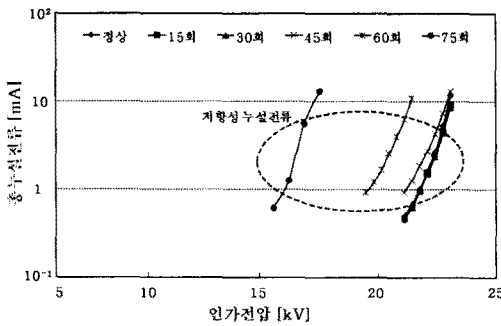
또한 임펄스전압이 인가되면 입계 또는 입계층의 접점에서 나온 산소 이온이 입계층에서 전계의 정극성 방향으로 이동함에 따라 이질 접합의 산소 양이 감소하게 된다. 이때 산소 이온과 Zn 이온의 이동과 더불어 다른 불순물 이온(Sb, Co, Mn, Cr)들도 쉽게 이동하고, 입계층에서 이온 이동의 가능성은 산화아연 입계에서보다 높게 나타난다. 이러한 이온 이동은 공간 전하의 분배와 변형을 일으키는 입계층의 소모, 쇼트키장벽의 감소에 영향을 준다. 특히 역바이어스 된 쇼트키장벽 근처에서 산소 양의 감소는 순바이어스 된 쇼트키장벽보다 잘 일어나므로 역바이어스의 장벽 높이 변형이 순바이어스 보다 더 잘 일어나고, 역방향으로 흐르는 누설전류는 순바이어스로 흐르는 값보다 많게 된다[7-8]. 따라서 뇌임펄스전류의 인가횟수에 따른 피뢰기 열화의 진전은 누설전류의 극성에 따라 비대칭적으로 일어나게 되므로 누설전류에 의한 열화진단을 할 때에는 반드시 운전전압에 대한 극성효과를 고려할 필요가 있다.

25[kA]의 표준뇌임펄스전류의 인가횟수에 따라 ZnO 피뢰기에 흐르는 교류전압 또는 직류전압에 대한 누설전류 특성을 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)에서와 같이 뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 피뢰기에 흐르는 교류전압에 의한 누설전류는 정격전압 18[kV]에서 약 0.46[mA]로 용량성 전류가 대부분이며, 뇌임펄스전류가 75회 인가된 ZnO 피뢰기는 정격전압 이전의 인가전압 15[kV]에서 10[mA]로 저항성 누설전류가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. ZnO 피뢰기에 인가되는 전압이 점점 증가함에 따라 뇌임펄스전류에 의해 열화된 ZnO 피뢰기의 누설전류가 낮은 인가전압에서 급격히 증가하였다.

반면에 직류전압에 대한 누설전류는 용량성 전류는 흐르지 않고 순수 저항성 전류만 흐르기 때문에 정격전압에서 뇌임펄스전압이 인가되지 않은 ZnO 피뢰기에는 누설전류가 거의 흐르지 않았다. 그러나 임펄스전류에 의해 열화된 ZnO 피뢰기의 경우 입계층의 에너지 장벽높이, 공핍층의 두께, 입계층의 트립밀도 및 분포의 변화에 따라 등가저항이 작아져 누설전류가 증가하게 된다. 교류전압에서와 마찬가지로 직류전압에서도 인가전압이 증가할수록 누설



(a) 교류전압-누설전류 특성



(b) 직류전압-누설전류 특성

그림 3. 8/20[μ s], 2.5(kA) 뇌임펄스전류의 인가횟수에 따른 ZnO 피뢰기의 인가전압-누설전류 특성

Fig. 3. Leakage current-applied voltage characteristics of ZnO surge arrester as a function of the number of injection of 8/20[μ s], 2.5(kA) lightning impulse current

전류는 증가하였고, 뇌임펄스전류의 인가횟수가 많은 피뢰기일수록 낮은 인가전압에서 누설전류가 크게 나타났다. 직류전압을 인가한 경우 순수 저항성 누설전류만 흐르므로 교류전압을 인가한 경우에 비해 미세한 인가전압의 차이에도 누설전류는 훨씬 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 결국 임펄스전류의 인가횟수가 증가할수록 교류 및 직류전압에서 누설전류는 급격히 증가하게 되고, 뇌임펄스전류의 인가횟수의 누적으로 피뢰기의 열화는 더욱 가속화되는 것을 알 수 있다.

3.2 ZnO 소자의 미세구조 분석

ZnO의 결정구조는 ZnS의 우르쯔(wurtzite) 광형

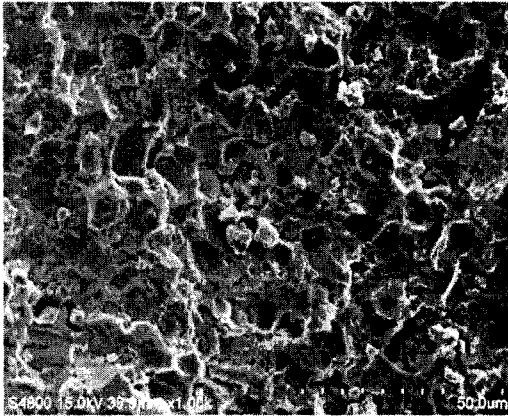
결정구조와 비슷한 육방정계이며 이온화된 격자간 원자에 의해 생긴 전자 때문에 n형 반도체 성질을 지니고 있다. ZnO 입자(grain)가 전기전도성을 가지는 것은 ZnO가 입자를 형성하는 과정에서 산소의 Frenkel 격자결합이 형성되어 도너 형의 불순물 준위를 형성하기 때문이다. 그래서 ZnO는 상온에서 $1\sim 10[\Omega \cdot m]$ 의 낮은 비저항을 갖게 된다[6-9]. 그리고 Bi₂O₃는 약 825[°C]에서 용융되는 저융점 산화물로 상온에서 비저항은 1,013[$\Omega \cdot cm$] 정도로 절연체에 가깝다. ZnO와 Bi₂O₃를 소결하면 저융점인 Bi₂O₃가 유동하여 ZnO 입자를 도포함으로써 순수한 ZnO보다 높은 비저항과 유전율을 나타낸다[10-11]. 또한 ZnO 입자가 상호입상 Bi₂O₃층에 의해 둘러싸여 있기 때문에 전기저항이 인가전압에 따라 변하는 비오염성 현상을 나타낸다. ZnO 피뢰기 소자의 미세구조는 ZnO 입자와 입계층을 형성하는 Bi₂O₃상 및 스피넬상 등으로 이루어져 있다. Bi₂O₃은 ZnO 입자 사이에서 절연층을 형성하기 때문에 비선형 전류-전압 특성을 나타내는 중요한 상일뿐만 아니라 소결시에 액상 소결을 유도하여 ZnO 입자성장에 영향을 준다.

뇌임펄스전류를 인가한 것과 인가하지 않은 ZnO 소자를 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 관찰한 미세구조를 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)의 뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 피뢰기 소자의 경우 ZnO 입자의 크기는 약 10[μm]이며 전체적으로 균일하다. 그러나 그림 4(b)의 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 피뢰기 소자의 미세구조는 ZnO 입자의 크기가 수 [μm]에서 20[μm] 이상으로 다양하게 분포되어 있으며 입자가 균일하지 않음을 알 수 있다. 이것은 뇌임펄스전류가 ZnO 피뢰기 소자에 인가될 경우 ZnO 피뢰기 내부의 불순물이나 기공에 전기적인 스트레스가 집중되어 국부적인 가열이 발생하고, 이 가열에 의해 입자가 성장하는 재소결 현상 때문인 것으로 판단된다.

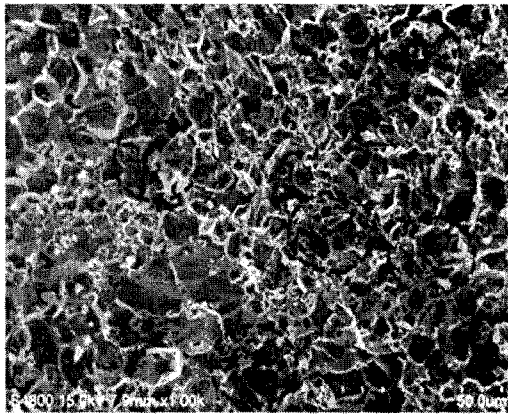
누설영역에서 모든 전류는 입계층을 통하여 흐른다. 입계층의 전기저항은 온도에 따라 지수 함수적으로 감소한다. 그 영향은 높은 온도에서 더욱 뚜렷해지고 온도에 따른 저항의 변화는 피뢰기 고장 원인의 하나이다. 전압제한영역에서 동작할 때 이 파

뇌임펄스전류에 의한 ZnO 피리기의 열악특성

정은 더욱 복잡해진다. 소결 과정 동안 입계층이 ZnO 입자 주위에 형성되고, 이 층에 에너지장벽이 형성된다. ZnO 소자의 구조는 엄격하게 정형화되어 있지 않다. 이 층들은 불규칙 방향으로 소자 전체에 퍼져있고 일반적으로 ZnO 입자를 감싸고 있다.



(a) 뇌임펄스전류 인가 전

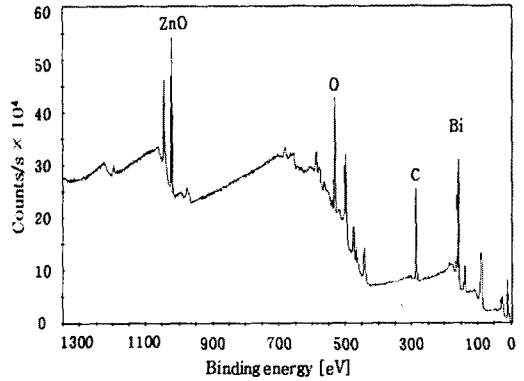


(b) 뇌임펄스전류 인가 후

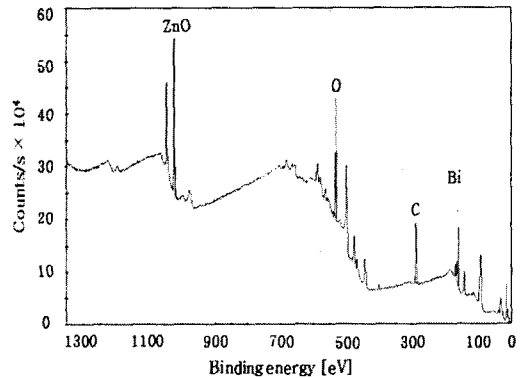
그림 4. ZnO 소자의 SEM사진
Fig. 4. Photos. of scanning electron microscope of ZnO element

ZnO 소자는 국부적으로 높은 전류밀도에 의하여 손상을 받는다. 이것은 혼합물이나 입계층을 하나 또는 두 개 모두를 영구적으로 손상시키며 소자 재료에 국부적인 재소결을 일으켜 소자의 물리적 및 전기적인 특성을 변화시키는 과정으로 나타날 수 있

다. ZnO 소자는 어떤 레벨 이상의 임펄스전류에 의해 손상을 입는다. 이 손상은 전류밀도의 변화에 기인되며, 소자재료에 국부적인 재소결을 일으킨다. 이 국부적인 재소결은 소자 내부를 약하게 만든다[7].



(a) 뇌임펄스전류 인가 전



(b) 뇌임펄스전류 인가 후

그림 5. ZnO 소자에 대한 XPS분석의 결과
Fig. 5. Results of XPS analysis of ZnO elements

X-선 광전자분광법(X-ray photoelectron spectroscopy: XPS)으로 분석한 ZnO소자의 미세구조의 물성을 그림 5에 나타내었다. 그림 5 (a)에서 뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 소자의 경우에는 Bi의 함유량이 4.99[%]로 나타났으나 그림 5 (b)의 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 소자의 경우 Bi 성분은 2.1[%] 낮게 나타났다. ZnO 소자는 ZnO 입자와 스

피넬(spinel), 입계층(grain boundary)으로 구분되어 있으며 주성분은 ZnO 입자이다. 스피넬은 ZnO 입자 사이에 존재하고 높은 저항을 가지고 있어 ZnO 입자의 성장을 제한하는 역할을 하지만 전기적 역할은 하지 않는다. 그러나 ZnO 입자를 둘러싸고 있는 입계층은 Bi₂O₃를 주된 성분으로 하는 첨가물으로써 ZnO 소자의 비선형 저항특성에 영향을 미치는 성분이다. 따라서 뇌임펄스전류에 의한 Bi₂O₃의 감소가 입계층의 결핍을 발생시키며 입계층의 결핍에 의한 전류의 집중으로 ZnO 피뢰기 소자의 열화에 영향을 미치며 정상적인 동작개시전압보다 약간 높은 전압이 가해지면 ZnO 피뢰기 소자의 고장을 유발시킨다.

4. 결 론

ZnO 피뢰기에 뇌임펄스전류의 인가 전후의 상용 주파수 교류 및 직류 전압에 대한 누설전류를 측정하고, ZnO 소자의 미세구조 변화의 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 피뢰기의 교류 전압에 대하여 누설전류는 비대칭성으로 나타났으며, 뇌임펄스전류의 인가횟수가 증가함에 따라 저항성 누설전류의 증가로 비대칭성이 더욱 커졌다.

(2) SEM 분석결과 뇌임펄스전류를 인가하지 않은 ZnO 소자의 입자는 전체적으로 균일하였으나 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 소자의 입자크기는 수 [μm]에서 20[μm] 이상으로 다양하고 불균일한 분포를 나타내었다.

(3) XPS 분석결과 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 소자의 경우 Bi성분이 2.1[%] 낮게 나타났다. 뇌임펄스전류에 의한 Bi₂O₃의 감소가 입계층의 결핍을 발생시키며 입계층의 결핍에 의한 전류의 집중으로 ZnO 피뢰기 소자의 열화에 영향을 미치며 정상적인 동작개시전압보다 약간 높은 전압이 가해지면 ZnO 피뢰기 소자의 고장을 유발시키는 것으로 밝혀졌다.

References

[1] W. G. Carlson, Dr. T. K. Gupta and A. Sweetana, "A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge arresters for AC Application", IEEE Transac-

tions on Power system, Vol. PWRD-1, No. 2, pp.67-74, 1986.
 [2] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki, T.Nitta, "Stability and long term degradation of metal oxide surge arresters", IEEE Trans. Vol. PAS-99, No. 4, pp.1548-1556, 1980.
 [3] Jinbo Kuang, Jeffrey A. Bennett, Ram C. Bommakanti and Steven A. Boggs, "Temperature Distribution in a ZnO Arrester Subjected to Multiple Current Impulses", Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.494-497, 1996.
 [4] Kazuo Eda, "Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents", J. Appl. Phys. Vol. 56, No. 10, pp.2948-2955, 1984.
 [5] Yoshihisa Yamashita and Sinzo Yoshikado, "Evaluation of factors in the degradation of ZnO varistor", T.IEE Japan, Vol. 119-B, No. 6, pp.203-213, 1999.
 [6] 김찬영, 송일근, 김주용, "피뢰기 소자(ZnO)의 열화원인 분석", 전기전자재료 제 2권 제7호, pp.637-641, 1998.
 [7] P. L. Hower and T. K. Gupta, "A Barrier Model for ZnO Varistors", J. Appl. Phys. Vol. 50, No. 7, pp.4847-4855, 1979.
 [8] 이복희, 박건영, 강성만, "산화이온 피뢰기 소자와 전극 사이에 발생하는 방전광 현상", 조명설비학회논문지, Vol. 19, No. 3, pp.44-50, 2005.
 [9] W. G. Morris, "Electrical Properties of ZnO-Bi₂O₃ Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 56, No. 7, pp.360-364, 1973.
 [10] E. Olsson, L. K. Lfalk, and G. L. Dunlop "The microstructure of a ZnO varistor material", Journal of Materials Science 20, pp.4091-4098, 1985.
 [11] M. Mizuno, M. Hayashi and K. Mitani, "Thermal stability and life of the gapless surge arrester", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 5, pp. 2664-2761, 1981.

◆ 저자소개 ◆

이수봉 (李守俸)

1979년 4월 13일생. 2002년 2월 경남대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사수료.
 Tel : (032)860-7398
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : lsbong1@naver.com

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대공대 전자전기공학부 교수. 본학회 부회장.
 Tel : (032)860-7398
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : bhlee@inha.ac.kr