

전력용 피뢰기의 MOV 미립화와 에너지 내량 특성 연구

한세원, 조한구
한국전기연구원

Study on Surge Absorption Capability for Power Arrester with MOV Micro-milling Characteristics

Han Se-Won, Cho Han-Goo
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

The protection performance and energy absorption capability are important for both MOAs for distribution lines and MOAs for high voltage systems, therefore the manufacturing technique of ZnO varistor elements with high ability against surge impacts is great important for high voltage systems. But until now ZnO varistors for low voltage class have been developed in Korea, ZnO varistors with the rate discharge current of 5, 10kA class for high voltage systems depend on an import from advanced countries, such as Japan or U.S.A, which have developed its in the late 1980s. So in the aspect of taking independent technique the development of ZnO varistors with the rate discharge current of 5, 10kA class for high voltage systems is important. In this research project ZnO varistor elements with diameters of 35mm and 70mm for the rate discharge current of 5, 10kA class for high voltage systems are manufactured, then various chemical composition and processing variables affected the electrical and the physical characteristics of these ZnO varistors are investigated.

Key Words : Surge Arrester, ZnO Varistor, Surge Absorption Capability, Operating Characteristics

1. 서론

전력용 피뢰기를 설계하는데 있어서 중요한 파라메타 중 하나로 써지 에너지 내량을 들 수 있다. 써지 에너지 내량은 바리스터 소자가 인가된 써지를 온전히 흡수할 수 있는 능력으로 정의된다. 따라서 바리스터의 에너지 내량을 향상시키기 위한 주된 방향은 궁극적으로 펑쳐(puncture)나 파단(cracking)을 억제하는 제조공정 개선에 관심을 갖는다.

바리스터의 써지 에너지 내량 한계를 가져오는 대표적인 펑쳐사고의 경우 써지 전류밀도의 일부 집중으로 인한 입계 또는 입자의 국부 용융에 기인하는 것으로 알려져 있다. 더욱이 소자 미세구조와 관련된 불균일 발열이 소자의 기계적 강도이상의 열스트레스로 진전하는 경우 파단으로 발전하게된다. 이러한 불균일한 미세구조와 열-전류 집중 현상을

억제하는 것이 결국 피뢰기 소자의 에너지 내량을 향상시키는 중요한 요인임을 알 수 있다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 기존 바리스터 소자를 보다 미립화하고 미세구조의 균일화시킨 ZnO 바리스터 소자를 제조하여 기본적인 미세조직분석과 전기적 특성시험 특히 에너지 내량 특성을 시험 분석을 실시하여 써지 에너지 내량 향상을 도모하고자 하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 피뢰기 소자의 주성분은 ZnO에 Bi₂O₃, Sb₂O₃, CoO, NiO, MnO₂, Cr₂O₃ 외에 미량의 Al₂O₃를 첨가하여 시편을 제조하였다. 전력용 고압 서지 흡수 소자의 에너지 내량을 증가시키기 위해 표 1과 같이 3종류의 조성을 비교 모델로 하여 기본

물성과 전기적 특성 시험을 실시하였다. 조성 2와 조성 3은 기존 조성과는 달리 고압 써지에 대한 내량을 향상시키는 첨가물 류(Glass 1, Glass 2)를 선택하여 제조되었다.

표 1. 기본 조성표

시료	조성 (mol%)
조성 1	ZnO-Bi ₂ O ₃ -Sb ₂ O ₃ -CoO-NiO-MnO ₂ -Cr ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -Additives
조성 2	ZnO-Bi ₂ O ₃ -Sb ₂ O ₃ -CoO-NiO-MnO ₂ -Cr ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -Additives-Glass1
조성 3	ZnO-Bi ₂ O ₃ -Sb ₂ O ₃ -CoO-NiO-MnO ₂ -Cr ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -Additives-Glass2

전력용 바리스터 소자는 일반 저압용 써지 흡수 소자와는 달리 ZnO 분말체의 입자 크기와 분포가 바리스터 제반 물성에 중요한 영향을 미치므로 성형 및 소결이 용이한 미립 입자를 얻는 것이 중요하다. 기존 공정은 주로 볼 밀링(ball milling)과정에서 수분 및 분산제의 양을 변화시켜 그 효과를 검토하는 것이 일반적이다. 하지만 보다 균일하고 조립화된 분말을 얻기 위해 본 분말 성형 과정에는 ATTRITION MILLING 공정을 추가하여 그 효과를 실험하였다.

표 2. ATTRITION MILLING 후 첨가물의 입자 분포 (≤1μm)

Mixing Condition(rpm)	Average Size Distribution (%)
Condition 1(200)	50
Condition 2	45
Condition 3	62
Condition 4(450)	76

1차 분쇄 공정은 ATTRITION MILLING 작업으로 이루어진다. 여기서 우선 여러 가지 첨가물을 미립화된 입자로 확보하는데 목적이 있다. 표 3-3은 ATTRITION MILLING 의 회전 속도를 달리한 몇 가지 조건에 따른 첨가 혼합물의 입자의 분포를 비교한 것이다.

준비된 시료를 Current-Voltage Source/Measuring Tester (Keithly, Model 237, USA)와 방전전류 내량 시험기(50kA/220V,USA)를 이용하여 기본적 I-V 특성을 시험하였다. 이때 비선형 계수(nonlinear coefficient, α)는 측정된 전류-전압

곡선에 대한 다음과 같은 관계식을 가지고 계산하였다.

$$\alpha = d(\ln I)/d(\ln V) \dots\dots (1)$$

바리스터 전압은 1 mA/cm²의 전류가 흐를 때의 전압 (V_{1mA/cm})으로 설정하였다. 누설 전류 밀도(leakage current density)는 바리스터 전압의 80%에 해당하는 전압의 전류치를 기준으로 하여 검토하였다.

써지 에너지 내량 특성 평가를 위한 제한 전압 특성 시험 및 동작 개시 전압 그리고 방전 내량 시험은 최대 100kVA 용량의 대전류 임펄스 발생기를 이용하여 시험하였다. 이때 적용되는 임펄스 파형은 IEC 및 ANSI 규격에서 제시하는 8/20μs, 4/10μs 및 급준파 시험 범위에서 특성 시험 평가하였다. 그림 1은 써지 임펄스 특성 시험에 사용된 측정 시스템 회로도이다. 상시 내전압 내구성 평가는 제조된 시료의 과전류를 설정하여 115℃에서 시험하였다. 이때 과전류는 다음 식으로 계산된다.

$$\text{과전류} = (\text{인가 전압 과과치}/V_{1\text{mA}}) \times 100\% \dots\dots (2)$$

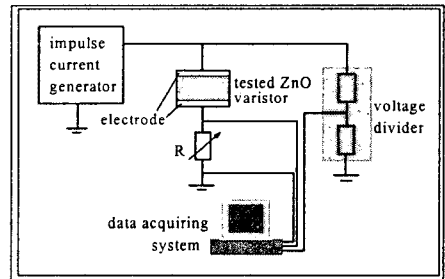


그림 1. 임펄스 특성 시험 시스템 회로도

3. 결과 및 고찰

3.1 미세 조직 분석

그림 2는 1000rpm, 100℃의 분사 건조 공정의 구형 원료를 사용하여 소결 온도 1100℃, 1150℃ 및 1200℃에서 제조된 조성 2의 미세 조직을 관찰하기 위한 SEM을 나타낸 것이다. 소결 온도가 증가하면서 ZnO 입자의 평균 크기는 약 5μm에서 10μm 정도로 ZnO 입자가 성장하는 것을 나타냈다.

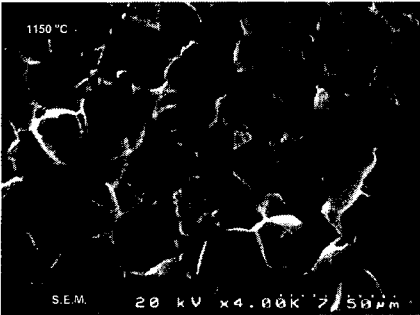
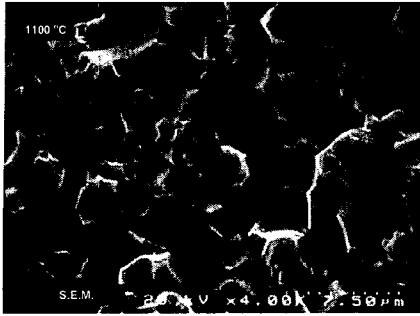


그림 2. 소결 온도에 따른 미세 조직(SEM, 조성 2)

표 3. 소결 온도에 따른 ZnO 입자 분포 특성

소결온도(°C)		입자 특성	
		입자 평균 크기(μm)	표준 편차(%)
1100	조성2	4.7	1.2
	조성3	4.2	1.1
1150	조성2	5.3	1.8
	조성3	5.1	1.5
1200	조성2	8.5	2.1
	조성3	6.5	2.0

시료의 입계층의 구성과 입자 형태를 보다 자세히 확인 할 수 있다. 표 3은 소결 온도에 따른 ZnO 입자의 평균 크기를 비교한 것이다. 조성 2보다는 조성 3의 조건에서 미세 구조상 ZnO 입자 크기는 보

다 미립화된 형태를 갖고 있었으며 분포상 균일도도 안정된 것으로 나타났다. 특히 미세 구조의 균일도를 나타내는 입자 분포의 표준 편차는 소결 온도가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있으며 전반적인 편차는 매우 낮은 값을 가지고 있어, 기 설명된 분쇄 및 분사 건조 공정 상 주어진 조건이 입자의 균일도 형성에 좋은 영향을 미친 것으로 판단된다.

ZnO 바리스터는 Bi_2O_3 또는 Bi_2O_3 화합물의 용융점 이상의 온도에서 액상의 출현으로 인한 급격한 소결 반응이 예상되므로 상변화에 관한 연구는 매우 중요하다. 상전이 과정을 이해하기 위해서는 X-선 회절 분석시험이 필요하다. 파이로클로르(Pyrochlore, $\text{Bi}_2(\text{Zn}_{4/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_6$, $\text{Bi}_{3/2}\text{ZnSb}_{3/2}\text{O}_{12}$) 상은 열처리 온도 750°C에서 850°C 사이에 형성되며 더 높은 온도에서는 파이로클로르 상이 분해되어 스피넬(Spinel, $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$) 상과 Bi_2O_3 상을 형성한다. 본 실험의 경우 소결 최고 온도는 1200°C까지 높여 열처리되므로 이러한 상 분리 현상은 상당히 진행되어 나타난다.

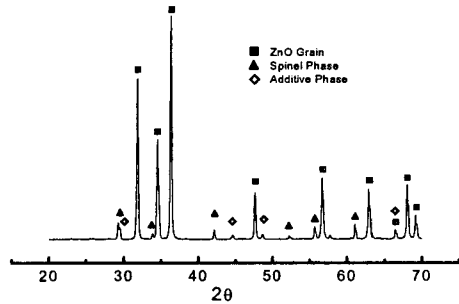


그림 3. 시료의 XRD 패턴 분석 (조성 3)

스피넬 상의 종류는 $\text{Sb}_3\text{O}_3(\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12})$, $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{ZnAl}_2\text{O}_4)$, $\text{TiO}_2(\text{Zn}_2\text{TiO}_4)$ 등이 대표적으로 알려져 있으며 이들 중 $\text{Sb}_3\text{O}_3(\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12})$ 과 $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{ZnAl}_2\text{O}_4)$ 의 역할은 소결 시 ZnO 입자 성장을 억제하는 역할을 한다고 알려져 있다. 그림 3은 조성 3의 XRD 실험 결과를 나타낸 것으로 ZnO 바리스터에서 보이는 ZnO 입자 상, Bi_2O_3 상, 스피넬 상 및 파이로클로르 상 모두 포함하고 있다. 하지만 조성 3의 경우 스피넬과 첨가물에 의한 파이로클로르 상이 보다 잘 발달하여 이러한 상이 소결 시 ZnO 입자 성장을 방해하는 효과를 가져오게 되어 앞에서

언급한 바와 같이 동일한 제조 조건에서 평균 입자의 크기가 작게 나타나는 것으로 생각된다.

3.2 에너지 내량 특성

소자의 단위 체적당 에너지 내량을 비교하면 그림 4와 같다. 단위 체적당 에너지 내량은 소자의 파괴 시험으로부터 산출되며 파괴까지에 이르는 처리 에너지 내량을 의미한다. 여기서는 2ms, 500A의 임펄스 시험 조건으로 시험하였다. 조성 2, 조성 3의 경우 200[J/cm³]이상의 에너지 내량을 갖는 것으로 통상 표현되는 처리 에너지 값으로는 약 10[kJ]에 해당하는 값이다. 이 값은 동일한 시험 조건에서 IEC 나 일본 JEC 피뢰기 관련 규격에서 요구하는 기준치 9.2[kJ]과 동등한 특성값으로 판단되며 고압용 써지 흡수 소자로 사용상 문제가 없는 것으로 분석되었다.

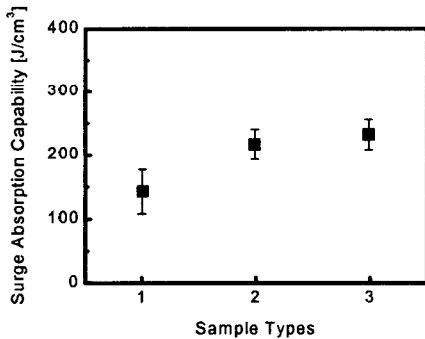
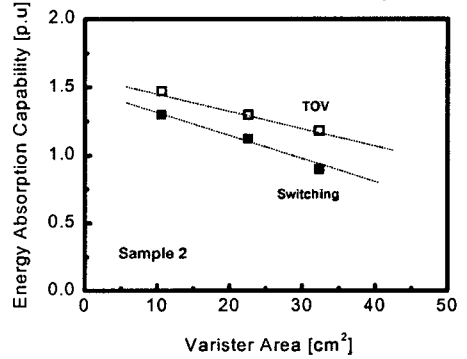
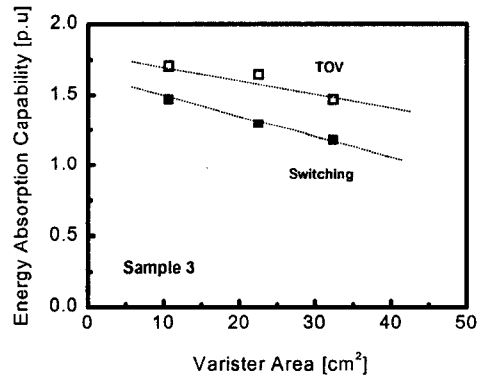


그림 4. ZnO 바리스터 소자 시료 별 써지 에너지 내량 비교

그림 5는 ZnO 바리스터 소자의 면적 크기 변화에 따른 TOV 및 개폐 써지 에너지 내량을 조성 별로 비교한 결과이다. TOV 내량은 개폐 써지 내량과 마찬가지로 소자의 파괴에 중요 요인으로 작용한다. 이는 써지 에너지 처리 시 생성되는 열이 소자 내부에서 발생하여 열응력으로 작용하면서 발생한다. 따라서 써지 에너지를 흡수 시 소자 내부의 전류 분포가 불균일한 경우 에너지 내량이 현저히 저하하게 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 3-25에서 보듯이 ZnO 입자의 미세 구조적 균일성을 높여 제조된 조성 3의 시료에서 개폐 써지 내량 및 TOV 써지 에너지 내량이 개선된 특징으로 잘 설명된다.



(a) 조성 2



(a) 조성 3

그림 5. 조성별 써지 에너지 내량 특성

일반적으로 개폐 써지 에너지 내량은 ZnO 바리스터 소자의 미세 내부 기공과 같은 결함(defects)에 의해 파손에 이르는 것으로 알려져 있다. 따라서 미세 구조의 미립화 및 기공의 감소가 가능한 공정으로 제조된 시편일수록 개폐 써지 에너지 내량은 향상된다.

4. 결론

본 연구에서는 이러한 관점에서 기존 바리스터 소자를 보다 미립화하고 미세구조의 균일화시킨 ZnO 바리스터 소자를 제조하여 기본적인 미세조직 분석과 전기적 특성시험 특히 에너지 내량 특성을

시험 분석을 실시하여 써지 에너지 내량 향상을 도모하고자 하였다. 미세 구조의 균일도를 나타내는 입자 분포의 표준 편차는 소결 온도가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있었으며 전반적인 편차는 매우 낮은 값을 가지고 있어, 분쇄 및 분사 건조 공정 상 주어진 조건이 입자의 균일도 형성에 좋은 영향을 미친 것을 알 수 있다. 개폐 써지 에너지 내량은 ZnO 바리스터 소자의 미세 내부 기공과 같은 결함(defects)에 의해 파손에 이르는데 이때 미세 구조의 미립화 및 기공의 감소가 가능한 공정으로 제조된 시편일수록 개폐 써지 에너지 내량은 향상되는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1]W. Komatsu, M. Miyamoto, S. Hujita, and Y. Moriyoshi, Effects of Dopants on Sintering of ZnO Oxide and Nickel Oxide, J. Ceram. Soc. Jpn., 18[12], 7-13 (1968).
- [2]T. K. Gupta and R. L. Coble, Sintering of ZnO: I, Densification and Grain Growth, J. Am. Ceram. Soc., 51[9], 521-25 (1968).
- [3]T. K. Gupta and R. L. Coble, Sintering of ZnO: II, Density Decrease and Pore Growth During the Final Stage of the Process, J. Am. Ceram. Soc., 51[9], 525-28 (1968).
- [4]M. Matsuoka, T. Masuyama and Y. Iida, Nonlinear Electrical Properties of Zinc Oxide Ceramics, Proc. Conf. Solid State Devices, 1st., 1969; Jpn. J. Appl. Phys., Suppl., 39, 94-101 (1970).
- [5]S. K. Dutta and R. M. Spriggs, Grain Growth in Fully Dense ZnO, J. Am. Ceram. Soc., 53[1], 61-62 (1970)