

배전급 피뢰기(18kV, 5kA)용 ZnO 바리스터 소자 개발

Development of ZnO Varistor for Distribution Surge Arrester (18kV, 5kA)

박춘현*, 윤관준*, 조이곤*, 정세영*, 서형권*

Park Choon-Hyun*, Yun Kwan-Jun*, Cho I-Gon*, Jung Se-Young*, Suh Hyoung-Kwon*

Abstract

ZnO varistors for distribution surge arrester (18kV, 5kA) were developed and tested microstructure and electrical characteristics. Microstructure of ZnO varistor was consisted of ZnO grain, spinel phase and Bi-rich phase. Average grain size of ZnO varistor was $12.47\mu\text{m}$. Reference voltage and lightning impulse residual voltage of ZnO varistor exhibited a good characteristics above 5.5kV and below 11.56kV, respectively. Consequently, discharge capacity which is the most important characteristics of ZnO varistor for surge arrester exhibited excellent properties above 70kA at twice high-current impulse test. Moreover, variation rate of reference voltage and lightning impulse residual voltage showed below 5% and 2% after high-current impulse test, respectively. Leakage current and watt loss of ZnO varistor will not increase during accelerated aging test at stress condition, such as 3.213kV/115°C/1000h.

Keywords(중요용어) : ZnO varistor(산화아연 바리스터), distribution surge arrester(배전급 피뢰기), Reference voltage(동작개시전압), lightning impulse residual voltage(뇌충격제한전압), discharge capacity(방전 내량), high-current impulse test(대전류충격전류시험), accelerated aging test (가속열화시험)

1. 서 론

바리스터(VARISTOR)란 Variable Resistor의 약칭으로 인가전압에 따라 저항이 변하여 현저한 비직선적인 전압-전류 특성을 나타내는 소자이다. 어느 임계전압 이하에서는 특히 저항이 높아 절연체로 작용하여 거의 전류가 흐르지 않으며, 그 임계전압을 넘으면 급격히 저항이 낮아져 전류가 흐르는 반도체 소자이다.¹⁾

이와 같은 전기적 특성을 이용하여 전압 안정화, 접점소화제거, 서지흡수용 보호소자로서 저전압용 소자에서부터 송·발·변전용 피뢰기까지 널리 이용되고 있다.^{2~4)}

국내의 피뢰기 관련 기술은 배전급(18kV, 2.5kA 및 5kA)의 ZnO 바리스터 제조 및 피뢰기 설계·조립기

술을 갖추고 있으나, 고품성 ZnO 바리스터의 제조기술은 극히 미흡하여 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 국내기업과 학계연구소에서 활발한 연구로 한전 실선로에 배전용 18kV 2.5kA용 ZnO 소자가 사용되고 있다. 그러나 고품성용(18kV 5.0kA이상) ZnO 소자는 미국과 일본의 몇몇 회사에서 선진기술을 독점하고 있는 상태이며 기술이전을 기피하고 있다. 따라서 고품성용 ZnO 바리스터의 개발이 시급한 상황이다.

본 논문에서는 균일한 입자(Grain) 보유 및 고품성 균일화 절연전극의 설계와 동시에 적절한 ZnO 바리스터 소자의 에너지 방전내량 설계를 통하여 현재보다 높은 에너지 내량 특성과 내아크성을 가지는 ZnO 바리스터 소자를 개발하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 ZnO 바리스터 제조

주원료인 ZnO와 Bi₂O₃, Sb₂O₃, Co₃O₄ 등의 여러

* (주)에이피케이

주소: 경남 마산시 회원구 내서읍 중리 1127-14번지

Tel: 055-232-7081, Fax: 055-232-7086

E-mail: varistor@hanmail.net

첨가물을 조성식에 맞게 전자천평으로 10^{-3} 까지 평량하여 Attrition-Mill에서 70%이상의 입도가 $1\mu\text{m}$ 이하가 되도록 7시간 동안 슬러리를 분쇄(Milling)한 후, Ball-Mill로 이송하여 15시간 이상 혼합(Mixing)하였다. 혼합시에 성형성을 개선하기 위하여 결합제, 운할제 및 이형제 등을 적정량 첨가하여 혼합하였다. 슬러리에서 균일한 입도의 파우더를 얻기 위해서 Disc Type Spray-Dryer로 건조(Drying)하며, 입자의 크기가 $140\mu\text{m}$ 이하로 체가름(Sieving)하였다. 체가름된 파우더는 8ton의 성형압으로 지름(ϕ) 38.5, 높이(t) 36.9, 무게(w) 140g의 성형체로 성형(Pressing)하였다. 이 성형체에서 결합제 및 운할제, 이형제 등의 유기물을 없애기 위해 350°C 에서 1단계로 열처리(Burn-Out)한 다음, 1130°C 에서 2시간 30분간 2단계로 소결(Sintering)하였다. 소결이 끝난 소성체를 전기적 안정성을 유지시키기 위해 600°C 에서 12시간 동안 3차 재열처리(Reheating)시켰다. 이 소자에 전극을 부착하기 위하여 우선 소자의 양면을 연마기를 이용하여 상하 양면을 연마(Lapping)하고 Arc-Spray 방식으로 Al전극을 증착한 후, 소자의 연면을 절연시킬 목적으로 Spray 방식의 유기절연체를 코팅하여 바리스터 소자를 제조하였다.

2.2 전기적 특성 측정

동작개시전압(바리스터 전압)은 DC Tester(암전고 전압연구소, 50K1M4RC)를 사용하여 d.c. 1mA에서 측정 한 후, $\alpha = (\log I_2 - \log I_1) / (\log V_2 - \log V_1)$ 의 관계식⁵⁾으로부터 비직선지수(α)를 구하였다. 여기서 V_1 , V_2 는 $I_1=0.1\text{mA}$, $I_2=1\text{mA}$ 에 대응되는 전압이다. 뇌충격제한 전압은 $5\text{kA} \pm 10\%$, $8/20\mu\text{s}$ 의 공칭방전전류에 대한 전압을 측정하였다. 대전류방전내량은 $65\text{kA} \pm 10\%$, $4/10\mu\text{s}$ 의 전류를 2회 인가한 후 관통이나 섬락의 흔적이 있는지 바리스터의 외관을 검사하고 인가전·후의 동작개시전압과 공칭방전전류에 대한 제한전압의 변화율을 측정하였다. 가속열화시험은 온도 115°C , 스트레스 시간 1,000시간동안, 최대연속운전전압 3.213 kV의 조건하에서 누설전류와 전력손실의 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

(1) 미세구조

그림 1은 5kA용 ZnO 바리스터 소자의 미세조직 표면형상을 나타낸 SEM 사진이다. SEM 사진을 살펴보면 세 개의 상이 존재함을 볼 수 있는데, 그 상은 (a) 결정입을 구성하는 ZnO, (b) 주로 입계 교차점에

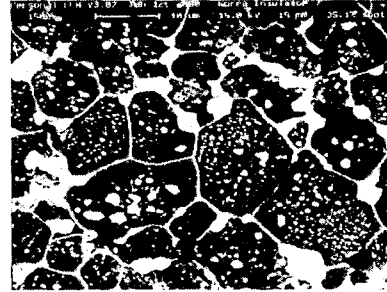


그림 1. 5kA용 ZnO 바리스터의 미세구조
Fig. 1. SEM of ZnO varistor for 5kA

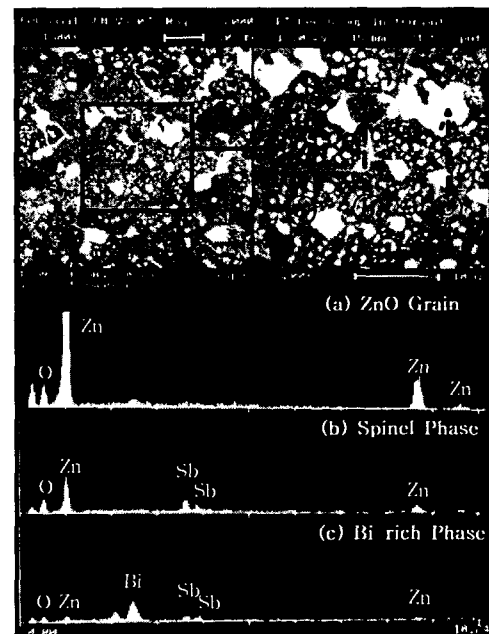


그림 2. 5kA용 ZnO 바리스터의 XRF 분석
Fig. 2. XRF analysis of ZnO varistor for 5kA

및 결정입 내에 존재하며 입계에도 존재하는 스피넬(Spinel)상 그리고 (c) 입계 교차점에 존재하는 Bi 과다상(Bi-rich)상인 것으로 그림 2의 XRF 분석을 통해 확인하였다.

5kA용 ZnO 바리스터 세라믹스의 밀도는 아르키메데스 원리를 이용하여 구하였다. 그 밀도는 5.5로서 이론밀도($5.78\text{g}/\text{cm}^3$)에 95%정도의 치밀한 소결이 이루어졌으며, 이것은 미세구조에서도 확인할 수 있었다. 또한 SEM 사진을 이용하여 평균 결정립 크기 d 를 $d=1.56C_{\text{eff}}/MN_{\text{eff}}$ 의 선형교차기법(Lineal Intercept

표 1. 5kA용 ZnO 바리스터 소자에 대한 동작개시전압 및 뇌충격제한전압

Table 1. Reference voltage and lightning impulse residual voltage of ZnO varistor for 5kA

Sample No.	동작개시전압		제한전압(kV)		V_{5kA}/V_{1mA}	α
	$V_{100\mu A}$ (kV)	V_{1mA} (kV)	$V_{2.5kA}$	V_{5kA}		
1	5.20	5.65	10.32	11.56	2.04	27.74
2	5.23	5.68	10.32	11.56	2.03	27.90
3	5.09	5.51	9.77	11.15	2.02	29.04
4	5.15	5.62	9.90	11.28	2.01	26.36
5	5.19	5.64	10.18	11.42	2.02	27.69

Technique)으로 구하였다.⁶⁾ 여기서 C_{eff} 는 test-line의 유효길이, M은 SEM의 배율, N_{eff} 은 입계와 test-line과의 유효교차수이다. 5kA 소자의 평균 결정립 크기는 $12.47\mu m$ 로 나타났다.

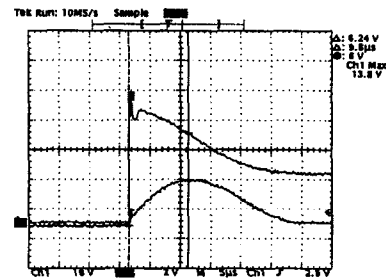
(2) 전기적 특성

표 1은 5kA용 ZnO 바리스터 소자 5개의 동작개시전압과 뇌충격제한전압의 측정값을 나타낸 것이다.

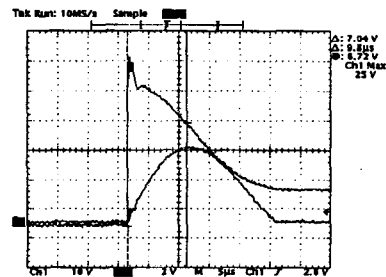
동작개시전압(바리스터 전압)은 18kV 배전용 피뢰기의 정격에 대하여 22.9kV 이상이어야 한다.⁷⁾ 본사의 피뢰기 제품은 5개의 소자를 사용하므로 소자당 동작개시전압은 4.58kV 이상이어야 하는데 표 1에 나타난 동작개시전압은 5.51~5.68kV로 모두 기준에 적합하였다. 그러나 비직선지수(α)가 25정도로 다소 낮은 값을 나타내고 있어 향후 계속적인 실험을 통해 비직선성을 향상시켜야 할 것이다.

뇌충격제한전압은 $8/20\mu s$, 5kA의 공칭방전전류를 인가하였을 때 피뢰기 양 단자간의 측정전압이 60kV 이하이어야 한다.⁷⁾ 따라서 소자당(5개 기준) 제한전압은 12kV 이하이어야 하며, 표 1에서 알 수 있듯이 모두 11.15~11.56kV로 기준보다 낮은 값을 나타내었다. ZnO 바리스터 소자의 제조에 있어서 ZnO 바리스터는 외부에서 유입되는 각종 서지에 대해 빠르게 동작해야 하며, 이러한 빠른 응답특성을 나타내기 위해서는 제한전압이 보다 낮은 소자가 유리하다. 본 연구에서 개발한 ZnO 바리스터 소자의 제한전압이 기준값보다 낮은 값을 나타내기는 하지만 만족할 만한 특성을 나타내는 것은 아니다. 따라서 향후 지금보다 낮은 11kV이하의 제한전압을 얻기 위해 첨가물의 첨가량과 공정 조건의 변화를 통한 연구가 이루어져야 할 것이다. 그림 3은 Sample-1의 2.5kA 및 5kA 공칭방전전류에 대한 제한전압 파형이다.

표 2는 5kA용 ZnO 바리스터 소자의 대전류충격전류시험에 대한 방전내량을 나타낸 것이다. 대전류충격전류시험시 $4/10\mu s$ 의 충격전류를 피뢰기에 인가하였을 때, ZnO 바리스터는 65kA 이상의 방전내량을



(a) 2.5kA의 뇌충격전류에 대한 제한전압 파형



(b) 5kA의 뇌충격전류에 대한 제한전압 파형

그림 3. 2.5kA 및 5kA의 뇌충격전류에 대한 제한전압 파형

Fig. 3. Residual voltage wave on lightning impulse current of 2.5kA and 5kA

표 2. 5kA용 ZnO 바리스터 소자의 대전류충격시험 결과

Table 2. Results of high-current impulse test of ZnO varistor for 5kA

Sample No.	대전류 특성 ($4 \times 10\mu s$, kA)		소자 상태
	1회	2회	
1	75.2	71.2	양호
2	74.4	71.2	양호
3	75.2	70.8	양호
4	75.2	71.2	양호
5	75.2	71.2	연면방전

표 3. 5kA용 ZnO 바리스터 소자의 대전류충격전류시험 전·후 동작개시전압 및 뇌충격제한전압 변화율
Table 3. Variation rate of reference voltage and lightning impulse residual voltage of ZnO varistor for 5 kA before and after High-current impulse test

Sample No.	동작개시전압		변화율 (%)	뇌충격제한전압				변화율 (%)	
				시험전		시험후			
	시험전	시험후		2.5kA	5kA	2.5kA	5kA	2.5kA	5kA
1	5.65	5.36	-5.13	10.32	11.56	10.18	11.70	-1.36	1.21
2	5.68	5.38	-5.28	10.32	11.56	10.18	11.56	-1.36	0
3	5.51	5.21	-5.44	9.77	11.15	9.90	11.28	1.33	1.17
4	5.62	5.33	-5.16	9.90	11.28	9.90	11.15	0	-1.15

가져야한다. 또한 시험 전·후의 제한전압 변화율이 10% 이내 이어야 하며, ZnO 바리스터 소자의 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없어야 한다.⁷⁾

본 소자의 방전내량은 표 2에서 알 수 있듯이 2회의 대전류 충격전류시험에서 1회에서는 74.4~75.2kA, 2회에서는 70.8~71.2kA로 기준값보다 훨씬 높은 우수한 방전내량 특성을 나타내고 있다. 또한 시험후의 소자 외관 검사에서도 양호한 결과를 나타내었다. 그림 4는 Sample-1의 대전류충격전류시험 파형을 나타낸 것이다.

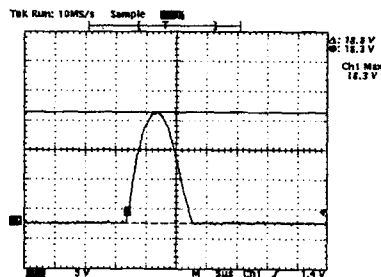


그림 4. 5kA용 ZnO 바리스터 소자의 대전류충격전류시험에 대한 전류 파형

Fig. 4. Current wave on high-current impulse test of ZnO varistor for 5kA

대전류충격전류시험을 한 소자의 동작개시전압 및 뇌충격제한전압을 측정하여 시험 전·후의 변화를 관찰하였고 그 결과를 표 3에 나타내었다. 5kA용 ZnO 바리스터 소자는 시험 후의 동작개시전압의 변화가 5.14~5.44%로 양호한 특성을 나타내었다. 또한 대전류충격전류시험 전·후의 5kA의 충격전류에 대한 제한전압의 변화율은 2% 이내로 매우 양호한 특성을 나타내었다.

그림 5는 5kA용 ZnO 바리스터 소자의 스트레스 시간에 따른 누설전류와 전력손실을 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 1000시간 동안의 스트레

스 시간에 따른 누설전류는 거의 일정하였으며, 저항분 누설전류에 의한 전력손실 또한 일정하였다.

5kA용 ZnO 바리스터 소자는 동작개시전압, 뇌충격제한전압, 대전류방전내량, 가속열화특성에서 모두 기준에 적합한 특성을 나타내었다.

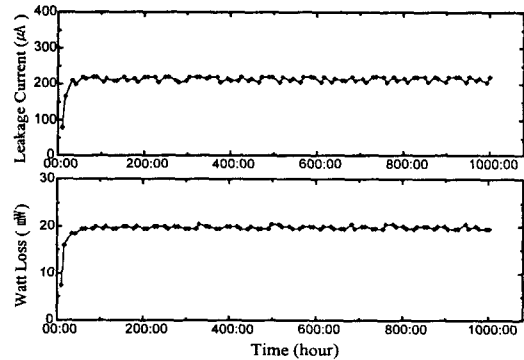


그림 5. 5kA용 ZnO 바리스터 소자의 스트레스 시간에 따른 누설전류와 전력손실

Fig. 5. Leakage current and watt loss of ZnO varistor for 5kA with stress time

4. 결 론

본 연구에서는 배전급 피뢰기(18kV, 5kA)용 ZnO 바리스터 소자를 개발하여 미세구조 및 전기적 특성을 조사하였다. ZnO 바리스터의 미세구조는 ZnO 결정립, 스피넬상, Bi 과다상으로 구성되었으며, 평균 결정립 크기는 각각 12.47 μ m로 나타났다. 동작개시전압은 5.5kV 이상, 뇌충격제한전압은 11.56kV 이하로 양호한 특성을 나타내었다. 또한 피뢰기용 ZnO 바리스터 소자에서 가장 중요한 방전내량은 70kA 이상 2회의 대전류충격전류에서도 건디는 매우 우수한 특성을 나타내었다. 또한 대전류충격전류시험 후의 동작개시전압과 뇌충격제한전압의 변화율이 5%와 2%

정도로 양호한 특성을 나타내었다. 가속열화특성에서 3.213kV/115°C/1000h의 스트레스 조건에 따른 누설전류와 전력손실도 거의 변화가 없는 일정한 특성을 나타내어 우수한 안정성을 나타내었다.

참고 문헌

1. -ノ瀬 昇, “電子セラミクス,” 오-ム社, pp. 90~93, 1985.
2. 山口 喬 ほか, “エレクトロセラミクス,” 技報堂出版社, pp. 171~172, 1984.
3. ニューケラスシリーズ 編集委員會, “半導体セラミクスとその應用,” 學獻社, pp. 149~161, 1990.
4. 電氣學會, “酸化亞鉛避雷器の特性と評價試驗法,” 電氣學會技術報告, 第474号, 1993.
5. M. Matsuoka, “Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 10, pp. 736~746, 1971.
6. J. C. Wurst and J. A. Nelson, “Lineal Intercept Technique for Measuring Grain Size in Two-Phase Polycrystalline Ceramics,” J. Am. Ceram. Soc., pp. 109, Feb. 1972.
7. 한국전력공사, “전력용 피뢰기,” ES-153-261-283, 1998.