

초고압 피뢰기용 ZnO 소자의 장시간 방전내량 특성 평가

Evaluation of Long Duration Current Impulse Withstand Characteristics of ZnO Blocks for High Voltage Surge Arresters

조한구^{1,a}, 윤한수¹, 김석수¹
(Han-Goo Cho^{1,a}, Han-Soo Yun¹, and Seok-Soo Kim¹)

Abstract

This paper describes the evaluation of the long duration current impulse withstand characteristics of ZnO blocks for high voltage surge arresters. Four ZnO varistors were manufactured with the general ceramic production method and the long duration current impulse withstand test, electrical uniformity evaluation test and microstructure observation were performed. All varistors exhibited high density, which was in the range of 5.42~5.46 g/cm³. In the electrical properties, the reference voltage of samples was in the range of 5.11~5.25 kV and the residual voltage was in the range of 8.314~8.523 kV. In the long duration current impulse withstand test, sample No. 2 and No. 3 failed at the 2nd and 4th shot of series impulse currents, respectively, but the rest survived 18 shots during the test. Before and after this test, the variation ratio of the residual voltage of samples survived was below 0.5 %, which was in the acceptance range of 5 %. According to the results of the test, it is thought that if the soldering method is improved, ZnO varistors would be possible to apply to the high voltage arresters like the station class and transmission line arresters in the near future.

Key Words : Arrester, Varistor, Reference voltage, Residual voltage, Station class

1. 서 론

산업의 발전 및 생활의 현대화로 인해 전기의 원활한 공급은 국가적인 차원에서 그 중요성이 날로 증가하고 있다. 하지만 낙뢰 및 선로개폐 등으로부터 발생하는 이상 과전압에 의한 전력사고는 빈번히 발생하고 있으며, 이를 위한 대책으로 전력용 피뢰기가 개발되어 현재까지 그 성능에 관한 많은 연구가 행해지고 있다[1,2]. 피뢰기의 보호특성은 전적으로 피뢰기에 채용되는 ZnO 소자의 특성에 의존하며, 30여년 동안의 다양한 연구로 현재는 상당히 안정된 성능을 나타내고 있다. 이러한 산화아연소자는 선로의 전압 및 사용 환경에 따라

다양한 등급 및 종류가 존재하며 현재 국내의 제작기술은 공칭방전전류 5 kA의 배전급 정도이다.

한편 피뢰기 시험에 관해서는 국제규격 IEC 60099-4가 세계적으로 가장 많이 적용되고 있으며, 국내 규격 역시 상당부분 이 규격을 따르고 있다 [3]. 또한 이 규격내의 소자 시험에 관해서는 동작 개시전압시험 및 동작책무시험 등 다양한 시험항목을 제공하고 있으며, 특히 본 연구에서 제작된 공칭방전전류 10 kA, 선로방전등급 3의 ZnO 소자에 대해서는 배전용 ZnO 소자 시험과 비교하여 장시간 방전내량시험이 보다 가혹한 것으로 알려져 있다[4].

따라서 본 논문에서는 초고압용으로 제작된 ZnO 소자의 기본적인 전기적 특성과 더불어 장시간 방전내량시험을 실시하였으며, 시험이 완료된 소자에 대해서 전극구조, 균일성 평가 및 미세구조 분석을 통하여 국산소자의 에너지 내량을 향상을 위한 피하고자 하였다.

1. 한국전기연구원 신소재응용연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1)

a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr

접수일자 : 2005. 9. 8

1차 심사 : 2005. 12. 23

심사완료 : 2006. 3. 13

표 1. ZnO 소자의 원료 조성식.

Table 1. Formulation of raw materials.

원료	mol%	원료	mol%
ZnO	96.0	Mn ₃ O ₄	0.3
Bi ₂ O ₃	1.0	Cr ₂ O ₃	0.3
Sb ₂ O ₃	0.7	NiO	0.3
Co ₃ O ₄	0.7	기타	0.003~0.3

표 2. 장시간 방전내량 시험 파라미터.

Table 2. Parameter of long duration current impulse withstand test.

공칭방전전류	10 kA
선로방전등급	3
선로의 서지 임피던스 Z(Ω)	1.3 U _r
규약 파괴 지속 시간 T(μs)	2400
충전전압 U _L (kV _{dc})	2.8 U _r

2. 실험 방법

2.1 ZnO 소자의 제작

표 1과 같은 원료 조성식에 따라 일반적인 세라믹 공정으로 ZnO 소자를 제작하였다.

먼저 주원료 ZnO 및 Bi₂O₃, Sb₂O₃ 및 Co₃O₄ 등의 특성 개선용 첨가물들을 각각 칭량하였다. 칭량된 ZnO와 첨가물들은 각각 4시간 및 24시간 동안 불밀을 행한 후, 다시 혼합하여 18시간 동안 불밀하였다. 이처럼 습식으로 분쇄 및 혼합된 원료 슬러리를 Spray Dryer에 의해 분무 건조하여 조립화하였다. 건조된 원료분말은 seperator를 이용하여 입자 사이즈 150 μm 이하로 분급하였고, 이 후 성형압력 800 kg/cm², 높이를 각각 35~36 mm로 성형하였다. 성형된 ZnO block은 터널 전기로에서 1차 및 2차 소성하였으며, 그 후 절연코팅, 연마 및 전극처리 과정을 통해 최종 ZnO 소자로 제작되었다.

2.2 장시간 방전내량시험

제작된 ZnO 소자와 외산소자는 기본적인 전기적 특성을 평가하기 위해 동작개시전압과 제한전압을 측정하였다. 동작개시전압은 DC 1 mA가 흐를 때 소자에 인가되는 전압으로 측정하였으며, 제한전압은 공칭방전전류(10 kA, 8/20 μs)에서 측정하였다.

한편 장시간 방전내량 시험은 IEC 60099-4 규격을 의해 먼저 개폐서지 제한전압(250 A, 1000 A,

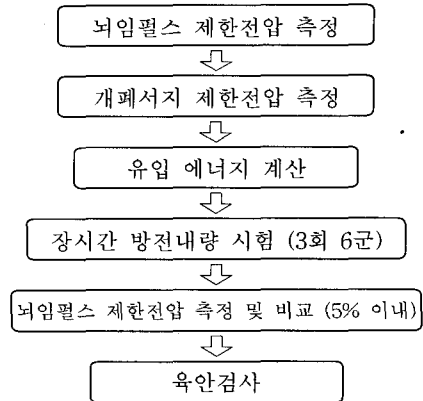


그림 1. 장시간 방전내량 시험방법.

Fig. 1. Flow chart of long duration current impulse withstand test.

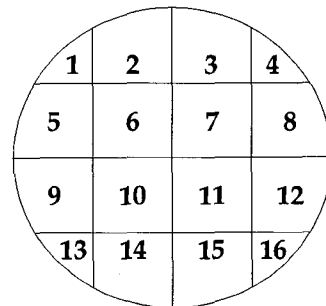


그림 2. ZnO 소자의 절단방법.

Fig. 2. Cutting method of ZnO blocks.

40/100 μs)을 측정하여 ZnO 소자에 유입되는 에너지를 식 (1)에 의해서 계산한 후 계산된 에너지에 해당하는 전류를 3회 6군으로 총 18회 인가하였다.

$$W = U_{res} \cdot (U_L - U_{res}) \cdot 1/Z \cdot T \quad (1)$$

여기서, U_{res}는 250 A에서 측정한 개폐서지 제한전압값이며, 그 외 파라미터들은 표 2와 같이 규격에 명시되어 있다[3]. 장시간 방전내량시험의 시험방법 및 순서를 그림 1에 나타내었다.

2.3 ZnO 소자의 균일성 평가

시험이 완료된 소자에 대해 그림 2와 같이 총 16부분으로 cutting하여 각각의 전류(100 μA, 500 μA, 1 mA 및 3 mA)에서의 전압을 측정하여 ZnO 소자의 균일성을 평가하였다.

표 3. ZnO 소자의 구조적 특성.

Table 3. Structural characteristics of ZnO blocks.

No.	직경	높이	밀도
	mm	mm	g/cm ³
1	65.0	29.0	5.42
2	65.0	29.0	5.42
3	65.0	30.0	5.46
4	65.0	30.0	5.45

2.4 ZnO 소자의 미세구조 관찰

시험이 완료된 ZnO 소자를 적당한 크기로 cutting한 후 연마 및 폴리싱한 후 HClO₄와 물의 비율이 1 : 1000인 수용액에 2분간 Chemical etching 하였다. etching된 시편들을 전자주사현미경으로 ZnO 소자 표면, 절연 코팅부 및 전극부의 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 ZnO 소자의 구조적 특성을 표 3에 나타내었다. 제작된 소자의 직경은 65 mm로, 목표로 하는 발변전용 피뢰기에 적용되는 소자의 일반적인 범위인 60-70 mm내에 있었으며, 높이는 29.0 mm 및 30.0 mm로 제작되었다. 또한 소자의 밀도는 5.4 이상으로 양호한 특성을 나타내었다.

한편 표 4에 측정된 동작개시전압과 제한전압 그리고 계산된 단위 두께당 동작개시전압 및 제한전압과 제한전압비를 나타내었다. 제작된 소자의 동작개시전압 및 제한전압은 표와 같이 소자의 높이가 증가함에 따라 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 동작개시전압에 대한 제한전압의 비인 제한전압비는 1.63 정도로 제작된 모든 소자들이 우수한 특성을 나타내었다. 한편 소자의 단위 두께당 동작개시전압은 일반적인 배전용 및 발변전용 피뢰기에 적용되는 ZnO 소자의 단위 두께당 동작개시전압이 200 V 내외인 것을 감안하면, 170 V 정도로 다소 낮은 것으로 나타났다. 또한 제작된 소자의 정격전압은 3.6 kV 정도로 동일 높이의 상용제품에 비해 조금 낮았다. 이와 같이 낮은 동작개시전압으로 인한 정격전압의 감소로 동일 정격의 피뢰기에 적용하기 위해서는 상용제품에 비해 더 많은 소자를 채용해야하기 때문에 피뢰기의 길이가 길어지므로 단위 두께당 동작개시전압의 상승이 필요한 것으로 판단되었다. 하지만 ZnO 소자

표 4. ZnO 소자의 전기적 특성.

Table 4. Electrical characteristics of ZnO blocks.

No.	V _{1mA}	V _{10kA}	V _{1mA/mm}	V _{10kA/mm}	제한 전압비
	kV	kV	V	V	
1	5.11	8.314	176.2	286.7	1.627
2	5.12	8.338	176.6	278.5	1.629
3	5.22	8.474	174.0	282.5	1.623
4	5.25	8.523	175.0	284.1	1.623

의 동작개시전압은 ZnO 결정립 크기에 의존하므로 첨가물 또는 소결온도를 조절함으로써 충분히 성취 가능할 것으로 판단되었다.

표 5에는 장시간 방전내량시험시 소자에 유입되는 에너지를 계산하기 위해 측정된 각각의 전류에서의 개폐서지 제한전압값과 계산된 유입에너지를 나타내었다. 본 연구에서 장시간 방전내량 시험에 적용되는 개폐서지전류는 선로방전등급 3에 해당하는 것으로, 배전용 시험조건에 비해 8배의 파고 값 및 2배 이상의 지속시간으로 상당히 가혹한 스트레스이다. 배전용의 경우 장시간 방전내량시험보다는 대전류 충격시험(65 kA, 4/10 μs)에서 소자의 파괴가 빈번히 발생하지만, 적용되는 선로의 전압이 상승하고 피뢰기의 사양이 높아짐에 따라 대전류 충격시험보다는 장시간 방전내량시험이 보다 가혹한 것으로 알려져 있다[4]. 그림 3은 장시간 방전내량시험시 마지막 전류 인가시의 시험파형으로 No. 1과 No. 4 소자는 18회 동안에 파괴가 일어나지 않았으나, No. 2와 No. 3 소자는 각각 2회와 4회에서 각각 파괴되었다. 파괴된 소자들은 ZnO 소자의 특성 파괴 모드 가운데 puncture 현상인 것으로 나타났으며, 이는 시험 중 소자 내부에 국부적인 급격한 열발생에 의한 것으로 사료된다. 이와 같은 국부적인 hot spot의 발생 원인으로서는 기공 또는 불균일한 결정립 사이즈가 주원인이며, 전극구조에 따른 전극 외경에서의 온도상승도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[5,6].

표 6에는 장시간 방전내량시험 전·후의 제한전압 및 변화율을 나타내었다. 제작된 소자는 총 4개 중 2개가 시험 중에 파괴되어 제한전압을 측정할 수 없었으며, 시험을 통과한 2개는 변화율이 -0.34 % 및 0.05 %로 거의 변화가 없는 것으로 나타나 허용 범위인 5 % 이내에 있는 것으로 나타났다. 샘플 1~4는 동일한 공정조건으로 제작되었으며, 기본적인 전기적 및 세라믹 특성에서 동일한

표 5. ZnO 소자의 개폐서지 제한전압 및 유입되는 에너지.

Table 5. Switch impulse residual voltage and injected energy of ZnO blocks.

No.	250 A	1000 A	유입에너지
	kV	kV	kJ
1	6.593	7.037	11.790
2	6.618	7.081	11.750
3	6.718	7.195	11.583
4	6.773	7.244	11.486

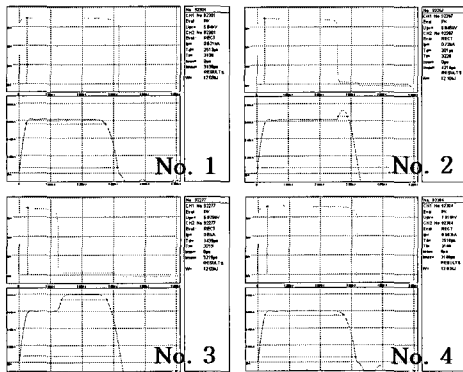


그림 3. 장시간 방전내량시험 파형.
Fig. 3. Wave shape of long duration current impulse withstand.

특성을 나타내었으나 장시간 방전내량시험에서는 극단적인 결과를 나타내었다. 일반적으로 배전용 소자 제작과 비교하여 본 연구에서 제작된 발변전용 소자의 경우 직경이 증가함에 따라 성형공정이나 소결공정 등에서 동일한 압력 또는 온도 허용 범위내에서 보다 큰 영향을 받을 수 있으므로 대부분의 제작업체에서 공정관리에 보다 세심한 주의를 기울이고 있다.

또한 앞서도 설명한 바와 같이 puncture 현상은 ZnO 소자내의 국부적인 열발생에 의한 것으로 본 연구에서는 세가지 측면(전극구조, 균일성 및 미세구조)에서 국산소자의 문제점을 조사하였다. 먼저 전극구조에 있어서는 본 연구에서 제작된 ZnO 소자들은 전극 edge와 소자 edge 사이에 여유가 있는 border 전극을 채용하고 있는데 반해 대부분의 상용제품들은 full face 전극 구조를 채용하고 있

표 6. 장시간 방전내량 시험 전·후의 제한전압 변화.

Table 6. Variation of residual voltage before and after long duration current impulse withstand test.

No.	시험전	시험후	변화량	비고
	kV	kV	%	
1	8.322	8.294	-0.34	양호
2	8.352	-	-	2회 파괴
3	8.477	-	-	4회 파괴
4	8.518	8.522	0.05	양호

다. 일반적으로 border 전극구조의 문제점은 불균일한 전류 및 전계 분포를 가지게 되고, 전극 edge 밑부위에서의 열발생이 크다는 것이다. 반면에 full face 전극은 균일한 전류분포를 가지지만, 전극처리공정이 어려워 전극이 소자의 연면으로 번지게 되면 연면섬락이 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 최초 full face 전극을 채용하고자 하였으나, 기술 노하우의 부족으로 border 전극을 채용하였으며, 이것이 장시간 방전내량시험에서 발생한 puncture 현상의 직접적인 원인이라고는 볼 수 없으나 puncture 현상이 발생한 영역이 모두 전극 바깥쪽임을 볼 때 어느 정도 영향을 받은 것으로 생각되었다. 다음으로 ZnO 소자 내부의 균일성이 고르지 못할 경우 가장 낮은 동작개시전압을 가지는 영역에서 뇌임펄스 시험시 puncture 현상이 발생할 수 있는데, 본 연구에서는 파괴된 No. 2 소자에 대해 균일성 평가를 실시하였다.

균일성 평가는 그림 2와 같이 총 16부분으로 cutting 된 소자에 대해 전류-전압 특성으로 조사하였으며, 표 7에 각 부위의 전압-전류 특성 측정 결과를, 그림 4와 5에 각각의 전류에 대한 각 부위의 전압과 동작개시전압을 그래프로 나타내었다. No. 2 소자의 경우 그림과 같이 파괴 부위인 4번과 8번 부위를 제외하고는 최고값과 최소값의 차이가 110 V 정도로 매우 균일한 특성을 나타내어 장시간 방전내량시험에서의 puncture 현상은 불균일함과는 관계가 없음을 확인하였다. 또한 각각의 전류에서 측정된 전압의 폭이 상당히 좁은 것으로부터 비직선성이 매우 우수한 것을 알 수 있으며, 전체적으로 낮은 전류 영역에서의 편차가 큰 것을 알 수 있다.

표 7. ZnO 소자 각 부위의 전압-전류 특성.

Table 7. Voltage-current characteristics of ZnO blocks.

No.	100 μ A	500 μ A	1 mA	3 mA
1	5.15	5.29	5.35	5.44
2	5.05	5.21	5.28	5.36
3	5.06	5.22	5.27	5.36
4	2.39	2.83	3.01	3.25
5	5.05	5.22	5.28	5.36
6	5.01	5.20	5.26	5.34
7	5.03	5.20	5.26	5.35
8	0.45	1.18	1.19	1.63
9	5.04	5.22	5.28	5.37
10	4.98	5.20	5.25	5.34
11	5.02	5.19	5.25	5.33
12	5.06	5.21	5.26	5.34
13	5.15	5.28	5.33	5.42
14	5.04	5.20	5.26	5.34
15	5.04	5.19	5.24	5.32
16	5.09	5.23	5.30	5.40

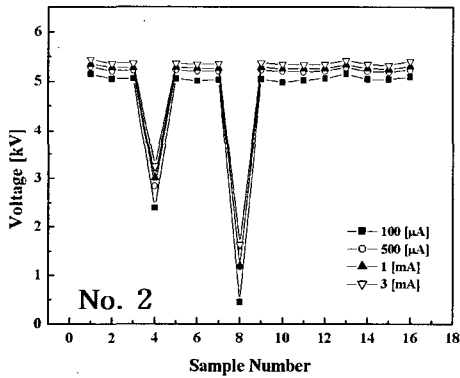


그림 4. ZnO 소자의 전압-전류 특성.

Fig. 4. Voltage-current characteristics of ZnO blocks.

마지막으로 모든 시험이 완료된 소자에 대해 미세구조를 관찰하였으며, 그림 6에 ZnO 소자 각 부위의 미세구조 사진을 나타내었다. 제작된 소자는 기공이 조금 분포하는 것으로 나타났지만 다른 상용 제품에 비해 뒤떨어진다고는 볼 수 없었으며, 단위 두께당 동작개시전압이 결정립 크기에 반비례함으로 차후 제작시에는 결정립 크기를 보다 작게 해야 할 것으로 생각되었다. 또한 기공의 분포가 에너지내량을 저하시키는데 중요한 요인이므로

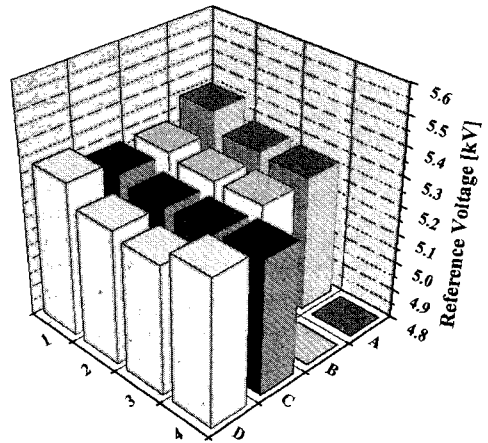


그림 5. ZnO 소자 각 부위의 동작개시전압.

Fig. 5. Reference voltage of ZnO blocks.

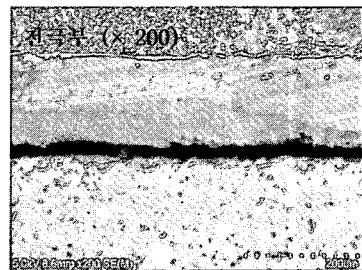
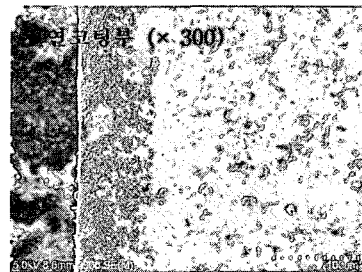
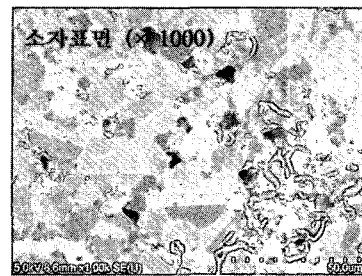


그림 6. ZnO 소자 표면의 미세구조 사진.

Fig. 6. Microstructure of ZnO blocks.

보다 치밀한 미세구조 특성을 위한 연구는 계속되어야 할 것으로 생각되었다. 한편 절연코팅부의 미세구조 사진에서는, 제작된 소자는 2층 구조로 연면방전과 같은 절연코팅부의 파괴를 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 생각되었으며 대부분의 제작자들이 1층 구조로 제작하는 것에 비해 상당히 안정된 특성을 기대할 수 있었다. 또한 절연코팅부와 ZnO 소자부의 접합면이 상당히 균일하고 기공과 같은 내부 결함들도 보이지 않는 등 매우 뛰어난 미세구조 특성을 나타내었다. 하지만 전극부의 미세구조 사진에서는 제작된 소자들은 장시간 방전내량시험 후 전극과 소자가 거의 분리된 것으로 나타나 border 전극을 채용했다는 약점과 함께 전극과 소자의 접합상태 또한 좋지 않은 것으로 판단되어 전극공정의 개선이 절대적으로 요구되었다.

4. 결론

본 논문에서는 초고압 피뢰기용 ZnO 소자의 장시간 방전내량특성을 조사하였으며, 전극구조, 균일성 평가 및 미세구조 관찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 초고압용의 ZnO 소자는 border 전극방식으로 제조하였으며, 동작개시전압 및 제한전압은 각각 5.11~5.2 kV 및 8.314~8.523 kV이며, 제한전압비는 1.63 정도로 뛰어난 전기적 특성을 나타내었다.
- [2] 장시간 방전내량시험 동안에 제작된 소자는 4개 중 2개가 파괴되었으며, 파괴되지 않은 소자들은 제한전압 변화율이 0.5 % 이하로 매우 안정된 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

- [3] 장시간 방전내량시험이 완료된 시료에 대한 균일성 평가에서는 각 부위의 동작개시전압은 5.24~5.35 kV로 최대 최소의 차가 110 V로 소자 전체에 걸쳐 균일한 특성을 나타내었다.
- [4] ZnO 소자 표면 및 절연코팅부의 미세구조 관찰에서는 기공이 조금 분포하는 것으로 나타났으며, 전극부의 미세구조 관찰에서는 시험 후 전극과 소자가 거의 분리된 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] T. K. Gupta, "Application of zinc oxide varistors", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, p. 1817, 1990.
- [2] S. Shirakawa and S. Kojima, "Review of surge arresters for power systems and transition of their standards", T.IEE Japan, Vol. 124-A, No. 8, p. 561, 2004.
- [3] IEC 60099-4, Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 1998.
- [4] R. Perkins, "Metal oxide discs impact performance of arresters", INMR, Vol. 12, No. 2, p. 60, 2004.
- [5] T. Tsuneko, "Protection Equipment and ZnO Blocks", Surge Arrester & Components Symposium, p. 25, 2003.
- [6] S. Boggs, J. Kuang, H. Andog, and S. Nishiwaki, "Increased energy absorption in ZnO arrester elements through control of electrode edge margin", IEEE Trans. PWRD, Vol. 15, No. 2, p. 562, 2000.