

직류 피뢰기용 ZnO 소자의 전기적 특성

김석수, 최익순, 조한구
한국전기연구원

The Electrical Characteristics of ZnO varistor for d.c. Arrester

Seok - Sou Kim, Ike - Sun Choi, Han - Gu Cho
KERI

Abstract

The electrical characteristics of A~C's ZnO varistors fabricated according to variable sintering condition, which sintering temperature is 1130°C and speeds of pusher are A: 2mm/min, B: 4mm/min, C: 6 mm/min, respectively, were investigated. The varistor voltage of A~C's ZnO varistors sintered at 1130°C increased in order A < B < C's ZnO varistors. C's ZnO varistor exhibited good characteristics that nonlinear exponent is 31.70. Leakage current of A~C's ZnO varistors exhibited below 2mA at rated voltage. Lightning impulse residual voltage of A's ZnO varistor suited standard characteristics, which is 3.85kV at 2.5kA, 4.4kV at 5kA and 5.16kV at 10kA. After multi lightning impulse residual voltage test of A's ZnO varistor exhibited good discharge characteristics which ZnO varistor reveals no evidence of puncture, flashover, cracking in visual examination. After high current impulse test of A's ZnO varistor exhibited good discharge characteristics, which variation rate of residual voltage is 0.4% before and after test, and revealed no evidence.

Key Words : ZnO varistor(ZnO 바리스터), Varistor voltage(바리스터 전압), Nonlinear exponent(비직선지수), Multi lightning impulse residual voltage(다중뇌충격제한전압), High current impulse (단시간 대전류)

1. 서론

최근 철도에서는 회생방식 차량(PWM 방식)의 도입으로 부하 특성이 기존의 차량방식보다 많은 변화를 나타내고 있으며, 여러 제어 방법(저항 제어, Thyristor 위상제어, PWM 제어)을 사용하는 전기차량이 한 급전구간을 동시에 운행하게 됨으로써 고조파의 합성 또는 상쇄 등 다양한 부하 패턴이 나타나고 있다. 이와 같은 원인에 의해 보호 계전기의 오동작 유발로 차단기가 동작되고, 또한 변전기에서 발생하는 내부적 혹은 외부적 요인에 의해 오동작하면서 차단 서지가 자주 발생하게 되었다.[1]

차단 서지 측면에서 볼 때, 차단기의 개폐에 의해 생기는 개폐 과전압으로 절연계급이 올라가고 더불

어 차단 서지의 배수도 올라가면서 절연전압도 상승하게 되는데 이런 차단 서지를 감쇄하지 않으면 절연과 운용에 커다란 문제점이 발생되므로 각별한 대책이 필요하다. 특히 차단 서지는 낙뢰 서지보다 에너지량이 상당하므로 기기의 파손이나 소손에 더 심각한 상태를 발생시키는데 이를 보호하기 위해서는 피뢰기(Surge arrester)의 핵심부품인 산화아연 바리스터(ZnO varistor)소자가 고성능, 고안정성을 갖도록 하는 기술개발이 절실히 필요하다.[2]

현재의 우리나라의 피뢰기 산업은 배전선로용 피뢰기만 개발되어 적용되고 있으며, 그 외에는 일본 등 외국으로부터 수입에 의존하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 전철 선로계통 및 차량의 시스템에 손상을 초래하는 뇌서지 및 과도 이상 전

압으로부터 전기 설비들을 보호하기 위해 사용되는 직류 피뢰기용 ZnO 소자를 일련의 세라믹 공정을 통해서 제작하여 전기적 특성을 고찰하여 응용 가능성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 ZnO 바리스터 제작

표 2.1와 같이 주어진 원료의 조성비에 따라 전자 천평을 사용하여 평량하였다.

표 2.1 ZnO 바리스터의 주요 성분조성 (mol%).

ZnO	Sb ₂ O ₃	Bi ₂ O ₃	Co ₃ O ₄	Mn ₂ O ₃	ZrO ₂	B ₂ O ₃	NiO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
95.7	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.4

조성비에 의해서 평량한 원료를 볼밀(Ball Mill)에 넣은 후 유기첨가제를 첨가하여 36시간 이상 습식 혼합을 하였다. ZnO, Bi₂O₃, 기타 첨가제(additive) 및 유기첨가제가 함유된 슬러리(Slurry)는 열풍 건조 방식인 스프레이 드라이어(Spray dryer)를 사용하여 건조하였다. 건조된 분말은 100mesh 체(Siever)를 사용하여 입자 크기 140 μ m 이하의 크기로 체가름(Sieving)한 후, 지름(ϕ) 79.3mm, 높이(t) 20.5mm, 압력(T) 24ton으로 성형(Pressing)하였다. 성형품은 3차에 걸쳐 소성하였다. 1차적으로 탈 바인더(Binder Burn-out)를 시키기 위해 350 $^{\circ}$ C 11시간 30분 동안 박스 전기로(Box Furnace)에서 열처리하였다. 1차 열처리가 끝난 시료는 12개 온도분포로 구성된 터널 전기로(Tunnel kiln)에서 소결 온도가 1130 $^{\circ}$ C인 2차 소성(Sintering)을 하였다. 표 2.2와 같이 요입 속도를 변화시킴에 따라 승온율(Heating rate), 유지시간, 냉각율(Cooling rate)이 변화되는 조건으로 소성하였다. 마지막으로 소결이 끝난 시료는 박스 전기로에서 600 $^{\circ}$ C 10시간 동안 3차 소성(Reheating)을 하였다.

표 2.2 요입속도에 따른 소결조건 변화.

No	요입속도	승온율	1130 $^{\circ}$ C 유지시간	냉각율
A	2mm/min	0.33 $^{\circ}$ C/min	9.0hr	0.69 $^{\circ}$ C/min
B	4mm/min	0.67 $^{\circ}$ C/min	4.5hr	1.37 $^{\circ}$ C/min
C	6mm/min	1.00 $^{\circ}$ C/min	3.0hr	2.06 $^{\circ}$ C/min

소성이 끝난 시료는 상·하부면을 연마(Lapping)하여 초음파 세척기에서 5분간 세척하여 건조기를 통해 30분간 건조시킨다. 건조된 시료는 전극 증착기를 이용하여 소결된 소자의 상·하 양면에 알루미늄 전극을 아크 스프레이(Arc spray)방식으로 용사시켜 전극을 형성시켰다. 전극 증착된 시료는 오르가닉 실리카(유기제)의 코팅제를 사용하여 스프레이 방식으로 소자를 절연코팅 한다. 코팅이 완료된 시료는 270 $^{\circ}$ C에서 2시간 30분 동안 건조기(Dry oven)에서 건조시킨다.

2.2 전압(V)-전류(I) 특성 시험

ZnO 바리스터의 V-I특성시험은 DC Tester와 충격전류시험기(8/20 μ s)로 1 μ A에서 10kA까지 약 10배 단위로 증가시켜가며 바리스터에 전류를 흘려, 각 전류에서의 바리스터 양단자간 전압을 측정하였다. 동작개시전압(바리스터 전압:V_{1mA})의 측정은 DC Tester를 이용하여 바리스터에 1mA의 전류를 흘렸을 때 바리스터 양단자간의 전압을 측정하였으며, 비직선 지수 a는 $a = (\log I_2 - \log I_1) / (\log V_2 - \log V_1)$ 의 관계식 [3]으로부터 구하였다. 여기서 V₁과 V₂는 I₁=100 μ A과 I₂=1mA에서의 전압이다. 누설전류는 바리스터에 정격 전압(d.c. 2.6kV)의 40%, 60%, 80%, 100% 전압을 각각 인가하였을 때 바리스터를 통해 흐르는 전류를 누설전류 Detector (LCD-4)로 측정하였다.

2.3 뇌충격 제한전압시험[4],[5]

뇌충격제한전압은 8/20 μ s의 파형을 가지는 2.5kA, 5kA, 10kA의 뇌충격전류가 ZnO 바리스터에 흐를 때 양단자간 전압을 전압 분압기(Voltage divider)로 측정하였다.

2.4 다중 뇌충격 제한전압시험[4],[5]

다중뇌충격제한전압시험은 5kA \pm 10%, 8/20 μ s의 크기 및 파형인 뇌충격전류를 바리스터에 5회씩 4군으로 나누어 20회 방전을 시행하며, 방전시간 간격은 50~60초, 군간의 시간간격은 25~30분으로 규정하였다. 시험중 바리스터의 외관검사를 하였으며, 시험 전, 후 공칭방전전류에서의 뇌충격제한전압 변화율을 측정하였다.

2.5 단시간대전류충격시험[4],[5]

단시간대전류충격시험은 4/10 μ s의 파형을 가지는

충격전류를 100kA, 2회 인가하여 바리스터 소자의 방전내량을 측정하였으며, 충격전류 인가전과 후의 뇌충격제한전압의 변화를 관찰하였다. 또한 바리스터의 외관검사를 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ZnO 바리스터의 전기적 특성

표 3.1은 직류 피뢰기용 ZnO 바리스터의 주요 시험항목 및 시험기준을 요약한 것이다.

표 3.1 직류 피뢰기용 ZnO 바리스터의 시험항목 및 기준[6].

항 목	기 준	
정격전압	DC 2,600V	
공칭방전전류	5,000A	
동작개시전압(1mA 통전시)	DC 2,340V 이상	
누설전류 (100% 전압인가시)	2mA 이하	
뇌임펄스 제한전압 특성시험	2kA	4,500V 이하
	5kA	5,000V 이하
	10kA	5,500V 이하
뇌임펄스 제한전압 특성시험(8×20μs)	5kA 20회	
단시간 대전류 방전시험 (4×10μs)	100kA 2회	

1. 전압(V)-전류(I) 특성

그림 3.1은 요입 속도별 소성 조건에 따라 제작된 소자 A~C의 수 μA~ 수 kA에 대응되는 전압과의 관계인 V-I 특성을 나타낸 것이다.

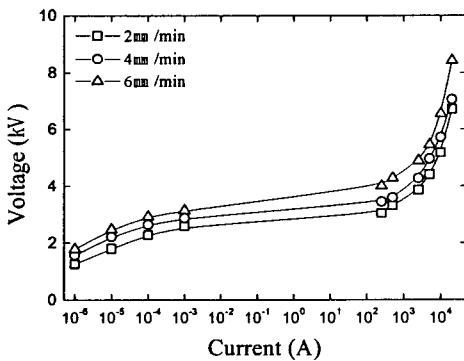


그림 3.1 ZnO 바리스터의 V-I 특성.

표 3.2 각 시편에 대한 V-I 특성 파라미터.

시편 No.	동작개시전압		α
	V _{100μA} (kV)	V _{1mA} (kV)	
A	2.28	2.59	18.06
B	2.64	2.87	27.56
C	2.92	3.14	31.70

그림 3.1에서 나타난 바와 같이 ZnO 바리스터의 V-I 특성은 예비항복영역, 항복영역 및 벌크 영역이 뚜렷이 대별됨을 알 수 있으며, 요입 속도별 소성 조건에 따라 서로 다른 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 그래프를 이용하여 ZnO 바리스터의 기본 특성 파라미터인 동작개시 전압(바리스터 전압), 비직선 지수와 누설전류를 측정하였고 표 3.2에 나타내었다.

표 3.1에 나타낸 바와 같이 직류 피뢰기의 동작개시전압은 2.34kV 이상이므로 상기의 결과는 모두 만족한 것으로 사료된다. 설비보호에서 가장 중요한 파라미터인 비직선 지수는 요입 속도별 소성 조건에 대한 비직선 지수는 각각 A: 18.06, B: 27.56, C: 31.70으로 증가하였고 소자 C가 가장 양호한 특성을 나타내었다. 이러한 현상은 전기로의 요입 속도가 증가함에 따라 소성 유지 시간이 A: 9h, B: 4.5h, C: 3h 순으로 짧아짐으로서 소자 A가 비스무스의 휘발이 가장 활발할 것이고, 소자 C가 상대적으로 적을 것으로 추정된다. 따라서 A의 바리스터는 비직선성에 영향을 주는 입간층의 면적이 소성 유지시간이 길어짐에 따라 소성 온도에서의 비스무스의 휘발로 인하여 작아짐으로써 비직선성 특성이 저하되는 것이다. 용점이 낮은 Bi계 ZnO 바리스터는 장시간의 소결시 비스무스의 휘발에 따른 특성이 저하되는 단점을 볼 수 있었다.

요입 속도별 소성 조건에 따른 시편 A~C의 누설전류를 측정하여 그림 3.2에 나타내었다. 각 시편에 정격전압(d.c. 2.6kV)의 40%, 60%, 80%, 100% 대응되는 전압에 대한 누설전류는 소자 A가 가장 높게 나타났으며 소자 C가 가장 낮은 누설전류를 나타내고 있다. 이것은 소자 A의 비직선 지수와 관계가 있으며 긴 소성 시간에 대한 활성화 에너지가 높아 다른 소자에 비해 낮은 장벽높이에 기인한 결과로 사료된다. 직류 피뢰기의 규격에서 누설전류는 정격전압(100%)에서 2mA 이하로 규정되어 있고 소자 A~C는 규정값에 만족하는 결과치를 나타내었다.

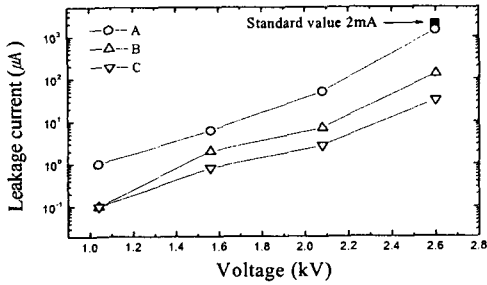


그림 3.2 각 시편에 대한 누설전류.

2. 뇌충격 제한전압

서로 다른 소성 조건에 따라 제작된 각각 소자에 2.5kA, 5kA, 10kA의 뇌충격전류에 대한 뇌충격 제한전압(V_{RV}) 측정치를 그림 3.3에 나타내었다.

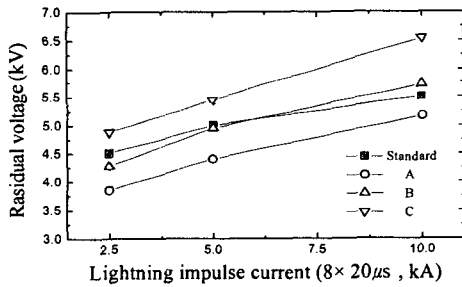


그림 3.3 각 시편에 대한 뇌충격제한전압.

이 시험은 피뢰기의 뇌썩지에 대한 보호 성능을 검증하는 시험으로 근접 뇌격에 의한 유도 뇌에 대한 보호 특성을 확인하는 시험으로 피보호 대상의 절연 내력을 정하는 절연협조의 기준이 되기 때문에 매우 중요한 특성이라 말할 수 있다.

그림 3.3에 나타낸 바와 같이 소자 B는 10kA 때의 제한전압이 표 3.1의 규정된 제한전압의 값보다 높게 나타났고, 소자 A의 제한전압은 모두 만족하는 것으로 나타났다.

상기의 기본적인 특성인 동작개시전압, 누설전류, 뇌충격제한전압을 모두 만족하는 소자 A에 대하여 연속적인 썩지에 대한 ZnO 바리스터의 썩지흡수 특성을 살펴보았다.

3. 다중 뇌충격 제한전압시험

다중 뇌충격 제한전압시험은 뇌충격 전류의 썩지를 수회 연속으로 중첩시켜 피뢰기에 가해도 매회 그 책무에 견디고 정상 상태로 회복되는가를 확인하는 시험이다. 시험 전, 후의 뇌충격 제한전압을 표 3.4에 나타내었다.

시험 전, 후의 제한전압은 각각 4.40kV, 4.36kV로서, 변화율이 -0.91% 정도로 양호한 특성을 나타냈고, 외관 검사에서 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없었다. 이것은 소자 A가 연속적인 썩지에 대한 신뢰성이 높은 소자임을 입증하는 결과로 사료된다.

표 3.4 소자 A에 대한 다중 뇌충격 제한전압 시험의 결과치.

No.	측정 회	충격전류(kA)	제한전압(kV)
A	5회	5.04	4.40
	10회	5.04	4.44
	15회	5.02	4.44
	20회	5.04	4.44

4. 단시간 대전류방전시험

다중 뇌충격 제한전압시험이 끝난 시료 A에 대한 대전류 충격 시험을 하였다. 표 3.5는 소자 A의 대전류 충격 시험의 결과치를 나타낸 것이다.

표 3.5 소자 A의 단시간 대전류 충격 시험 결과치.

No.	측정 (회)	충격전류 (kA)	시험 기준	외관 검사
A	1회	102.7	관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없어야 한다.	양호
	2회	102.7		

2회에 걸친 100kA의 대전류 충격 시험 후, A 소자는 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없는 양호한 우수한 방전내량 특성을 나타내었다. 시험 전, 후의 뇌충격제한전압은 각각 4.40kV, 4.38kV으로 시험 전, 후의 제한전압 변화율이 -0.45% 정도로 양호한 특성을 나타냈다. 이것은 소자 A가 직격 뇌썩지와 같은 고에너지에 대한 썩지흡수성이 높은 소자임을 입증하는 결과로 사료된다.

4. 결 론

요입 속도별 소성 조건(소성온도: 1130℃, 요입속도: 2mm/min, 4mm/min, 6mm/min)에 따라 각각 A, B, C의 ZnO 바리스터를 제작하여, 소성조건 변화에 따른 ZnO 바리스터의 전기적 특성을 조사하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 바리스터 전압은 A: 2.59kV, B: 2.87kV, C: 3.14kV 순으로 증가하였으며, 비직선 지수는 각각 A: 18.06, B: 27.56, C: 31.70으로 증가하였고 소자 C가 가장 양호한 비직선성을 나타내었다. 누설전류는 A~C 소자 모두 정격전압에서 2mA 이하로 규정된 값에 만족하는 결과치를 나타내었다.
2. 소자 A의 제한전압이 2.5kA: 3.85kV, 5kA: 4.4kV, 10kA: 5.16kV으로 규정된 값에 만족하는 것으로 나타났다.
3. 소자 A에 공칭 방전전류(5kA)를 연속적으로 20회 인가하는 다중 뇌충격 제한전압시험 후, 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없었으며, 시험 전, 후의 제한전압 변화율이 -0.91% 정도로 양호한 특성을 나타내었다.
4. 다중 뇌충격 제한전압시험이 끝난 소자 A에 2회에 걸친 100kA의 단시간 대전류 충격시험 후, 시험 전, 후의 제한전압 변화율이 -0.45% 정도로 양호한 특성을 나타냈고, 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없었다.

이상의 결론으로부터 시료 A의 ZnO 바리스터는 가혹한 썸지 특성에도 모두 만족는 우수한 소자로서 직류 피뢰기용 ZnO 바리스터 소자로 실선로에 적용할 수 있는 특성을 나타내고 있다.

참고 문헌

- [1] 변전설비 보호용 피뢰기 기술 (철도청)
- [2] 뉴-케라스 시리즈 編集委員會, “半導体セミクスとその應用,” 學獻社, pp. 188, 1990.
- [3] M. Matsuoka, “Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 10, pp. 736, 1971.
- [4] 한국산업규격, “갭리스형 금속산화물 피뢰기,” KS C 4616, 1997
- [5] 한국전력공사, “전력용피뢰기,” ES-153-261-283,

1998.

- [6] 서울 지하철 공사 표준 규격서, 2000.