

논문 17-6-18

소결 조건 변화에 따른 직류 피뢰기용 ZnO 바리스터의 미세구조 및 전기적 성질에 관한 연구

A Study on the Microstructure and Electrical Characteristics of ZnO Varistor for d.c. Arrester

김석수^{1,a}, 최익순¹, 박태곤², 조이곤³, 박춘현³

(Seok-Sou Kim^{1,a}, Ike-Sun Choi¹, Tae-Gon Park², I-Gon Cho³, and Choon-Hyun Park³)

Abstract

The microstructure and electrical characteristics of A~C's ZnO varistors fabricated according to variable sintering condition, which sintering temperature was 1130 °C and speeds of pusher were A: 2 mm/min, B: 4 mm/min, C: 6 mm/min, respectively, were investigated. The experimental results obtained from this study were summarized as follows : The sintering density of A~C's ZnO varistors sintered at 1130 °C were decreased by sintering keep time to shorten, such as A: 9hour, B: 4.5hour and C: 3hour. A's ZnO varistor exhibited good densification nearly 98 % of theory density. In the microstructure, A~C's ZnO varistors fabricated variable sintering condition was consisted of ZnO grain(ZnO), spinel phase($Zn_{2.33}Sb_{0.67}O_4$), Bi-rich phase(Bi_2O_3), wholly. 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 was 31.70. Leakage current of A~C's ZnO varistors exhibited below 2 mA at rated voltage. Lightning impulse residual voltage of A's ZnO varistor suited standard characteristics, which was 3.85kV at 2.5kA, 4.4 kV at 5kA and 5.16 kV at 10 kA. After continuous lightning impulse current 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 was 0.4 % before and after test, and revealed no evidence.

Key Words : ZnO varistor, ZnO grain, Spinel phase, Bi-rich phase, Continuous lightning impulse current test, High current impulse test

1. 서론

최근 철도에서는 회생방식 차량(PWM 방식)의 도입으로 부하 특성이 기존의 차량 방식보다 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 변전기기에서 발생하는 내부적 혹은 외부적 요인에 의해 오동작하면서 차단 시지가 자주 발생하게 되었다[1].

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

1. 한국전기연구원
(경남 창원시 성주동 28-1)
 2. 창원대학교 전기전자제어공학과
 3. 동아타이어공업(주) 절연물사업팀
- a. Corresponding Author : sskim@keri.re.kr
접수일자 : 2003. 11. 4
1차 심사 : 2004. 2. 23
심사완료 : 2004. 5. 6

더불어 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 에너지양이 상당하므로 기기의 파손이나 소손에 더 심각한 상태를 발생시키는데 이를 보호하기 위해서는 피뢰기(Surge arrester)의 핵심 소자인 고성능, 고안정성을 갖는 산화아연 바리스터(ZnO varistor) 소자 개발 기술이 절실히 필요하다[2,3].

현재의 우리나라의 피뢰기 산업은 배전선로용 피뢰기만 개발되어 적용되고 있으며, 그 외에는 전량 일본으로부터 수입에 의존하고 있는 실정이며, ZnO 바리스터 및 피뢰기를 국산화하기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다[4-6].

따라서 본 연구에서는 전철 선로계통 및 차량의 시스템에 손상을 초래하는 뇌찌지 및 과도 이상 전압으로부터 전기 설비들을 보호하기 위해 사용되는 직류 피뢰기용 ZnO 소자를 일련의 세라믹 공정을 통해서 제작하여 전기적 특성 및 미세구조를 고찰하여 응용 가능성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 ZnO 바리스터 제조

표 1과 같이 주어진 원료의 조성비에 따라 전자천평을 사용하여 평량하였다.

표 1. ZnO 바리스터의 주요 성분조성.

Table 1. Formulation of ZnO varistor. (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 건조하였고, 건조된 분말은 100mesh 체(Sieve)를 사용하여 입자 크기 140 μm 이하의 크기로 체가름(Sieving)한 후, 지름(φ) 79.3 mm, 높이(t) 20.5 mm, 압력(T) 24 ton으로 성형(Pressing)하였다. 성형품은 1차적으로 탈바인더(Binder burn-out)를 시키기 위해 350 °C에서 11시

간 30분 동안 박스 전기로(Box furnace)에서 열처리하였다. 1차 열처리가 끝난 시료는 12개 온도분포로 구성된 터널 전기로(Tunnel furnace)에서 소결 온도가 1130 °C인 2차 소성(Sintering)을 하였다. 표 2와 같이 요입 속도를 변화시키기에 따라 승온율(Heating rate), 유지시간, 냉각율(Cooling rate)이 변화되는 조건으로 소성하였다. 마지막으로 소결이 끝난 시료는 박스 전기로(Box furnace)에서 600 °C에서 10시간 동안 3차 소성(Reheating)을 하였다.

표 2. 요입속도에 따른 소결조건 변화.

Table 2. The sintering condition by pusher speeds.

No.	요입속도	승온율	유지시간	냉각율
A	2mm/min	0.33°C/min	9.0hr	0.69°C/min
B	4mm/min	0.67°C/min	4.5hr	1.37°C/min
C	6mm/min	1.00°C/min	3.0hr	2.06°C/min

소성이 끝난 시료는 상·하부면을 연마(Lapping)하여 초음파 세척기에서 5분간 세척하여 건조기를 통해 30분간 건조 후, 전극 증착기를 이용하여 소자의 상·하 양면에 알루미늄 와이어(Al wire)를 사용하여 아크 스프레이(Arc spray)방식으로 용사시켜 전극을 형성시켰다. 전극이 형성된 시료는 오르가닉 실리카(유기제)의 코팅제를 사용하여 스프레이 방식으로 소자를 연면 절연코팅 하였다. 코팅이 완료된 시료는 270 °C에서 2.5시간 동안 건조시켰다.

2.2 전압(V)-전류(I) 특성 시험

ZnO 바리스터의 V-I특성시험은 동작개시전압시험기(DC Tester)와 충격전류시험기(8/20 μs)로 1 μA에서 10 kA까지 약 10배 단위로 증가시켜가며 바리스터에 전류를 흘려, 각 전류에서의 바리스터 양단자간 전압을 측정하였다. 동작개시전압(바리스터 전압:V_{1mA})의 측정은 동작개시전압시험기(DC Tester)를 이용하여 바리스터에 1mA의 전류를 흘렸을 때 바리스터 양단자간의 전압을 측정하였으며, 비직선 지수 a는 a=(logI₂-logI₁)/(logV₂-logV₁)의 관계식[7]으로부터 구하였다. 여기서 V₁과 V₂는 I₁=100μA과 I₂=1mA에서의 전압이다. 누설전류는 바리스터에 정격전압(d.c. 2.6 kV)의 40 %, 60 %, 80 %, 100 % 전압을 각각 인가하였을 때 바리스터를 통해 흐르는 전류를 누설전류 측정기(LCD-4)로 측정하였다.

2.3 뇌충격 제한전압시험

뇌충격제한전압은 8/20 μ s의 파형을 가지는 2.5 kA, 5 kA, 10 kA의 뇌충격전류가 ZnO 바리스터에 흐를 때 양단자간 전압을 분압기(Voltage divider)로 측정하였다[8,9].

2.4 연속 뇌충격전류시험

연속 뇌충격전류시험은 5 kA \pm 10 %, 8/20 μ s의 크기 및 파형인 뇌충격전류를 바리스터에 5회씩 4군으로 나누어 20회 방전을 방전시간은 50~60초, 군간의 시간은 25~30분의 간격으로 시행하였다. 시험중 바리스터의 외관검사를 하였으며, 시험 전, 후 공칭방전전류에서의 뇌충격제한전압 변화율을 측정하였다[8,9].

2.5 단시간 대전류 방전내량시험

단시간 대전류 방전내량시험은 4/10 μ s의 파형을 가지는 충격전류를 100 kA, 2회 인가하여 바리스터 소자의 방전내량을 확인하였으며, 충격전류 인가전과 후의 뇌충격제한전압 변화를 관찰하였다. 또한 바리스터의 외관을 검사하였다[8,9].

2.6 미세구조 관찰

미세구조의 관찰은 전기적 특성 측정이 완료된 바리스터 소자의 한 면을 SiC 연마지(#2000)로 래핑하고 0.3 μ m Al₂O₃ 분말로 폴리싱한 후, 초음파 세척하여 830 $^{\circ}$ C에서 30분 동안 열적 에칭하였다. 상의 선명도를 개선시키기 위해 표면에 100 \AA 의 Au를 코팅한 후, SEM으로 각 시료의 미세조직을 관찰하였다. 평균 결정립 크기 d는 SEM 사진을 이용하여 선형교차기법[10](Lineal intercept technique)에 의한 식, $d=1.56C_{eff}/MN_{eff}$ (C_{eff} 는 Test-line의 유효길이, M은 SEM의 배율, N_{eff} 은 입계와 Test-line과의 유효교차수)로 결정하였으며, 미세조직에 생성된 각 상의 성분 분포는 SEM에 부착된 EDAX로 조사하였다. 생성된 각 상의 성분분포를 XRD로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ZnO 바리스터의 미세구조

서로 다른 소성조건 변화에 따라 제작된 ZnO 바리스터 시편 A~C의 밀도와 수축율을 측정하였고 밀도를 이용하여 기공율을 계산하였다. 그 결과는 표 3에 나타내었다.

소성 밀도는 같은 소성온도(1130 $^{\circ}$ C)에 대한 소성 유지 시간(A: 9h, B: 4.5h, C: 3h)이 짧아짐에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 시편 A의 소성 밀도는 5.645 g/cm³로 이론밀도(5.78 g/cm³)의 98% 정도로 가장 높은 치밀성을 보였다. 기공율 또한 2.34%정도의 낮은 기공율을 나타내었다. 전체적으로 시편 A~C의 소성밀도와 기공율은 양호한 특성을 나타내었고, 이것은 SEM 사진에서도 확인할 수 있었다.

소결이 완료된 소자 높이(t)와 지름(ϕ)은 각각 A: 16.9 mm, 65.51 mm, B: 16.91 mm, 65.60 mm, C: 17.11 mm, 66.26 mm로 16.5~17.5% 정도의 수축율을 보였다.

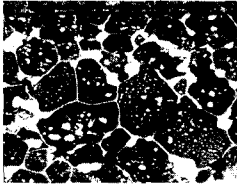
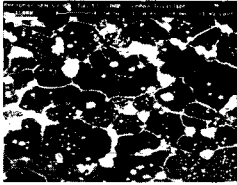
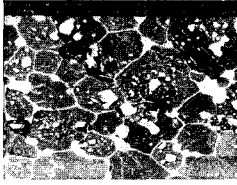
표 4는 서로 다른 소성 조건에 대한 시편 A~C의 미세구조를 나타낸 것이다.

표 3. 각 시편에 대한 소결밀도, 수축율 및 기공율.
Table 3. Density, shrinkage and porosity of samples.

No.	밀도	수축율	기공율
A	5.645 g/cm ³	17.5%	2.34%
B	5.524 g/cm ³	17.4%	4.43%
C	5.498 g/cm ³	16.5%	4.88%

표 4. 소성 조건에 따른 미세구조 사진.

Table 4. Microstructure by sintering condition.

No.	Microstructure	ZnO Grain Size
A		15.44 μ m
B		13.57 μ m
C		11.92 μ m

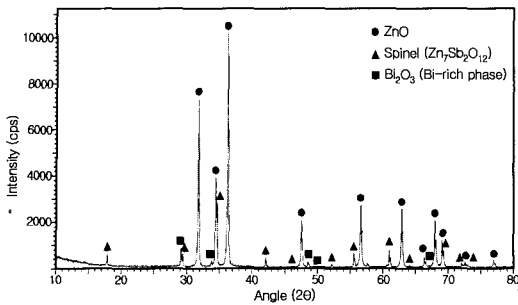


그림 1. 시편 A의 X선 회절 패턴.

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of sample A.

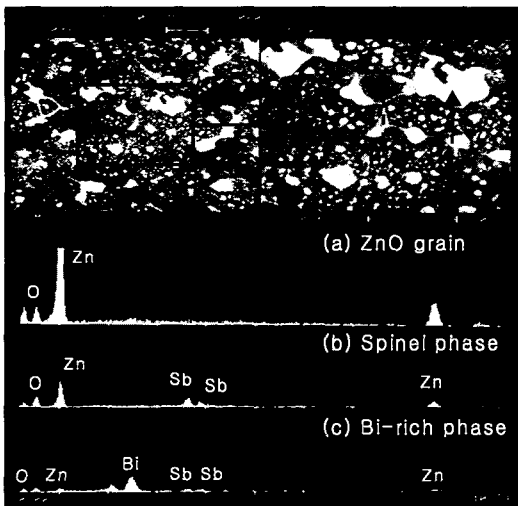


그림 2. 시편 A의 EDAX 패턴.

Fig. 2. EDAX analysis of sample A.

모든 시편의 SEM 사진에서 세 개의 상이 존재함을 볼 수 있으며, 그 상은 결정립을 구성하는 ZnO, 주로 입계 교차점과 결정립 내에 존재하지만 입계에도 존재하는 스피넬상(Zn_{2.33}Sb_{0.67}O₄), 입계 교차점에 존재하는 Bi 과다상 (Bi₂O₃)으로 그림 1의 XRD 회절패턴으로부터 확인하였고, 그림 2의 EDAX 패턴으로부터 그 성분을 확인하였다. 여기서 a부위는 ZnO 결정립, b부위는 결정립 내부 및 외부의 스피넬상, c부위는 Bi 과다상으로 확인되었다. 특히 Bi 과다상은 소성 유지 시간이 짧아짐에 따라 시편 A에 비해 시편 C가 상대적으로 적은 면적으로 분포하였다. 시편 A~C의 평균 결정립 크기는 각각 15.44 μm, 13.57 μm, 11.92 μm로 시편

A의 ZnO 결정립이 가장 크게 나타났다. 이것은 같은 소성온도에 대해 소성유지 시간이 가장 긴 시편 A가 결정립이 성장할 수 있는 활성화 에너지가 상대적으로 큰 것에 기인하는 것으로 사료된다. 한편 본 논문에서의 소성조건은 연속 투입식 터널 전기로(Tunnel Kiln)이기 때문에 요입 속도(2~6mm/min)가 달라짐에 따라 소성 유지 시간과 승온율 및 냉각율이 모두 달라짐으로써 바리스터의 미세 구조 및 생성상들이 달라질 것이라 예상했으나, 평균 결정립의 크기만 달라질 뿐 상기에 설명한 바와 같이 생성상들은 동일한 것으로 나타났다.

3.2 ZnO 바리스터의 전기적 특성

표 5은 직류 피뢰기용 ZnO 바리스터의 시험항목 및 시험기준[11]을 요약한 것이다.

표 5. 직류 피뢰기용 ZnO 바리스터의 시험항목 및 기준.

Table 5. Test list and reference of ZnO varistor for DC arrester.

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

3.2.1 전압(V)-전류(I) 특성

그림 3은 서로 다른 소성 조건에 따라 제작된 소자 A~C의 수 μA ~ 수 kA에 대응되는 전압과의 관계인 V-I 특성을 나타낸 것이다.

그림 3에서 나타난 바와 같이 ZnO 바리스터의 V-I 특성은 예비항복영역, 항복영역 및 벌크 영역이 뚜렷이 대별됨을 알 수 있으며, 소성 조건에 따라 서로 다른 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

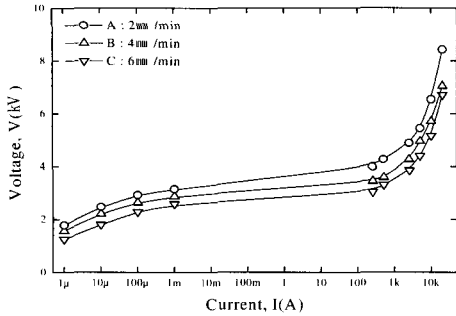


그림 3. 소성조건에 따른 각 소자의 전압(V)-전류(I) 특성 곡선.

Fig. 3. V-I characteristic wave of samples by sintering condition.

표 6. 소성조건에 따른 각 소자에 대한 전압(V)-전류(I) 특성 파라미터.

Table 6. V-I characteristic parameter of samples by sintering condition.

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

이 그래프를 이용하여 ZnO 바리스터의 특성 파라미터인 동작개시 전압(바리스터 전압), 비직선 지수를 산출하였고 표 6에 나타내었다.

표 6에 나타낸 바와 같이 직류 피뢰기의 동작개시전압은 2.3 kV 이상이므로 상기의 결과는 모두 만족한 것으로 사료된다.

설비보호에서 가장 중요한 파라미터인 비직선 지수는 서로 다른 소성 조건에 대한 비직선 지수는 각각 A: 18.06, B: 27.56, C: 31.70으로 증가하였고, 소자 C가 가장 양호한 특성을 나타내었다. 이것은 상기의 미세구조에서 나타낸 바와 같이 터널 전기로의 요입 속도가 증가함에 따라 소성 유지시간이 9 h, 4.5 h, 3 h 순으로 짧아짐으로서 소자 A가 비스무스의 휘발이 가장 활발할 것이고 소자 C가 상대적으로 휘발이 적을 것으로 추정된다. 따라서 A의 바리스터는 비직선성에 영향을 주는 입간층의 면적이 소성 유지시간이 길어짐에 따라 소성온도에서의 비스무스의 휘발로 인하여 작아짐

으로써 비직선성 특성이 저하되는 것으로 사료된다. 용점이 낮은 Bi계 ZnO 바리스터는 장시간의 소결 시 비스무스의 휘발에 따른 특성이 저하되는 단점을 볼 수 있었다.

소성 조건에 따른 각 시편에 대한 누설전류 특성은 표 7에 나타내었다.

표 7에 나타낸 바와 같이 서로 다른 소성 조건에 따른 시편 A~C의 누설전류를 비교해 보면 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 2 mA 이하로 규정되어 있으며, 그림 4와 같이 소자 A~C는 규정값 이하의 결과치를 나타내었다.

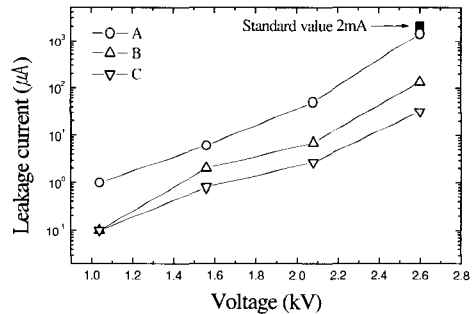


그림 4. 소성조건에 따른 각 소자에 대한 누설전류.

Fig. 4. Leakage current of samples by sintering condition.

표 7. 소성조건에 따른 각 소자에 대한 누설전류 특성.

Table 7. Leakage current characteristic of samples by sintering condition.

No.	누설전류(μA) [정격전압(2.6kV)×]			
	40%	60%	80%	100%
A	1	6.1	50	1430
B	0.1	2	7	132
C	0.1	0.8	2.7	32

3.2.2 뇌충격 제한전압시험

서로 다른 소성 조건에 따라 제작된 각각 소자에 2.5 kA, 5 kA, 10 kA의 뇌충격전류에 대한 뇌충격 제한전압(V_{RV}) 측정치를 표 8에 나타내었다. 이 시험은 피뢰기의 뇌찌지에 대한 보호 성능을 검증하는 시험으로 근접 뇌격에 의한 유도 뇌에 대한 보호 특성을 확인하는 시험으로 피보호 대상의 절연내력을 정하는 절연협조의 기준이 되기 때문에 매우 중요한 특성이라 말할 수 있다.

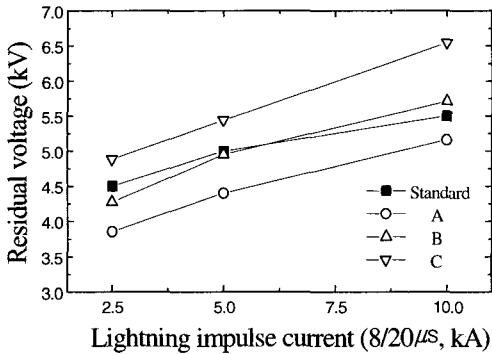


그림 5. 소성조건에 따른 각 시편에 대한 뇌충격 제한전압.

Fig. 5. Lightning impulse residual voltage of samples by sintering condition.

표 8. 소성조건에 따른 각 소자의 뇌충격제한 전압 특성.

Table 8. Lightning impulse residual voltage of samples by sintering condition.

No.	뇌충격제한전압 (kV, 8/20 μ s)		
	2.5kA	5kA	10kA
A	3.85	4.4	5.16
B	4.27	4.95	5.71
C	4.88	5.44	6.54

표 8과 그림 5에 나타낸 바와 같이 서로 다른 소성조건에 따라 각 소자의 뇌충격제한전압특성이 차이가 있음을 알 수 있다. 소자 A의 제한전압은 표 4의 규정된 제한전압의 값에 만족하는 것으로 나타났으며, 소자 B는 2.5 kA, 5 kA의 제한전압은 조건에 만족하나 1 kA의 뇌충격전류에서의 제한전압은 규정된 제한전압 보다 높아 전차선 선로의 적용에 어려움이 있다. 소자 C는 각각의 뇌충격전

류에서의 제한전압은 규정값에 모두 초과하였다. 뇌충격제한전압 특성은 바리스터의 V-I 특성 중 벌크영역(파괴영역)에 해당하는 특성으로 ZnO 결정립의 고유저항에 의해 그 특성이 변화되는데, 서로 다른 소성조건에 따른 결정립의 고유저항 변화에 기인한 것으로 사료된다.

3.2.3 연속 뇌충격전류시험

상기의 기본적인 특성인 동작개시전압, 누설전류, 뇌충격제한전압을 모두 만족하는 소자 A에 대하여 연속적인 찌지에 대한 ZnO 바리스터의 찌지 흡수 특성을 살펴보았다. 연속 뇌충격전류시험은 뇌충격 전류의 찌지를 수회 연속으로 피뢰기에 가해도 매회의 충격전류에 견디고 정상 상태로 회복되는가를 확인하는 시험이다. 시험 전, 후의 뇌충격 제한전압을 표 9에 나타내었다.

표 9. 소자 A의 연속 뇌충격전류시험 결과.

Table 9. Result of continuous lightning impulse current test for sample A.

No.	측정횟수	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

시험 전, 후의 제한전압은 각각 4.40 kV, 4.36 kV로서, 변화율이 -0.91 % 정도(규정된 변화율은 5 % 이내)로 양호한 특성을 나타냈고, 외관 검사에서 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없었다. 이것은 소자 A가 연속적인 찌지에 대한 신뢰성이 높은 소자임을 입증하는 결과로 사료된다.

3.2.4 단시간 대전류 방전내량시험

연속 뇌충격전류시험이 끝난 시료에 대한 대전류 방전내량시험을 실시하였고 그 결과치를 표 10에 나타내었다. 2회에 걸친 100 kA의 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, 4.38 kV으로 시험 전, 후의 제한전압 변화율이 -0.45 % 정도(규정된 변화율은 5 % 이내)로 양호한 특성을 나타냈다. 이것은 소자 A가 직격 뇌찌지와 같은 고에너지에 대한 찌지흡수성이 높은 소자임을 입증하는 결과로 사료된다.

표 10. 소자 A의 단시간 대전류 방전내량시험 결과.

Table 10. Result of high current impulse test for sample A.

No.	측정 횟수	충격전류 (kA)	시 험 기 준	외관 검사
A	1회	102.7	관통, 섬락, 균열 등의 손상이 없어야 한다.	양호
	2회	102.7		

4. 결 론

서로 다른 소성조건(소성온도: 1130 °C, 요입속도: 2 mm/min, 4 mm/min, 6 mm/min)에 따라 각각 A, B, C의 ZnO 바리스터를 제작하여, 소성조건 변화에 따른 미세구조 및 전기적 특성을 조사하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 소성 밀도는 같은 소성온도(1130 °C)에 대한 소성 유지 시간(A: 9h, B: 4.5h, C: 3h)이 짧아짐에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 시편 A의 소성 밀도는 5.645 g/cm³로 이론밀도(5.78 g/cm³)의 98 % 정도로 가장 높은 치밀성을 보였다.
2. 요입 속도가 달라짐에 따라 소성 유지 시간과 승온율 및 냉각율이 모두 달라짐에도 불구하고 평균 결정립의 크기(15.44 μm, 13.57 μm, 11.92 μm)만 달라질 뿐 ZnO 결정립(ZnO), 스피넬상(Zn_{1-2.33}Sb_{0.67}O₄), Bi-rich상(Bi₂O₃)등의 생성상들은 동일한 것으로 나타났다.
3. 바리스터 전압은 A: 2.59 kV, B: 2.87 kV, C: 3.14 kV 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 2 mA 이하로 규정된 값에 만족하는 결과치를 나타내었다.
4. 소자 A의 제한전압이 2.5 kA: 3.85 kV, 5 kA: 4.4 kV, 10 kA: 5.16 kV으로 규정된 값에 만족하는 것으로 나타났다.
5. 소자 A에 공칭방전전류(5 kA)를 연속적으로 20 회 인가하는 연속 뇌충격전류시험 후, 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없었으며, 시험 전, 후의 제한전압 변화율이 -0.91 % 정도로 양호한 특성을 나타내었다.
6. 연속 뇌충격전류시험이 끝난 소자 A에 2회에

걸친 100 kA의 단시간 대전류 방전내량시험 후, 시험 전, 후의 제한전압 변화율이 -0.45 % 정도로 양호한 특성을 나타냈고, 관통, 섬락 및 균열 등의 손상이 없었다.

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

참고 문헌

- [1] 변전설비 보호용 피뢰기 기술 (철도청).
- [2] 뉴-클래스시리즈 編集委員會, “半導体セミクスとその應用,” 學獻社, p. 188, 1990.
- [3] -ノ瀬 昇, “電子セラミクス,” オーム社, p. 90, 1985.
- [4] 한세원, 강형부, 김형식, “Al₂O₃가 미량 첨가된 비선형성 ZnO 바리스터의 미세구조와 전도 기구,” 전기전자재료학회는문지, 9권, 7호, p. 708, 1996.
- [5] 남춘우, 박춘현, “ZnO-Pr₆O₁₁-CoO-Er₂O₃계 바리스터의 미세구조 및 전기적 성질,” 전기전자재료학회는문지, 13권, 6호, p. 493, 2000.
- [6] 김석수, 조한구, 박태근, 박춘현, 정세영, 김병규, “배전급 피뢰기용 ZnO 바리스터 소자의 미세구조 및 서지 특성에 관한 연구,” 전기전자재료학회는문지, 15권, 2호, p. 190, 2002.
- [7] M. Matsuoka, “Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 10, p. 736, 1971.
- [8] 한국산업규격, “갭리스형 금속산화물 피뢰기,” KS C 4616, 1997
- [9] 한국전력공사, “전력용피뢰기,” ES-153-261~283, 1998.
- [10] J. C. Wurst and J. A. Nelson, “Lineal Intercept Technique for Measuring Grain Size in Two-Phase Polycrystalline Ceramics,” J. Am. Ceram. Soc., Vol. 97-12, p. 109-111, 1972.
- [11] 서울 지하철 공사 표준 규격서, 2000.