

Series Gap Type 피뢰기의 뇌임펄스 동작책무 및 온도의존성에 관한 연구

A Study of Lightning Impulse Operating Duty and Temperature Dependence of Series Gap Type Arrester

조한구^{1,a}, 유대훈¹
(Han-Goo Cho^{1,a} and Dae-Hoon Yoo¹)

Abstract

This paper describes lightning impulse operating duty performance and temperature dependence of series gap type for transmission line arresters. The ageing parameters of lightning arresters are impulse current, moisture ingress, temperature ageing and so on. Especially it is important to estimate the change of electrical characteristics by lightning impulse current. In the discharge withstand test, total energy applied to the ZnO arrester each time is $4/10 \mu\text{s}$, 30 kA. and in the operating duty test, the arrester has passed the test if thermal stability is achieved, if the residual voltage measured before and after the test is not changed by more than 5 %, and after the test reveals no evidence of puncture, flashover or cracking of the ZnO block. As a results, the residual voltage was in the range of 17.2~20.3 kV and ZnO block bear up against at 2 shot of series impulse current of 30 kA. Also it was so excellent that the mechanical destruction does not occur at the 2 groups of 5 impulses current of $2/20 \mu\text{s}$ 10 kA. According to the tests, it is thought that the ZnO arrester shows good stability with impulse current test. and it was found that the ambient temperature is increased resistive leakage current was increased in the range 47.3~167.4 μA .

Key Words : Transmission line, ZnO block, Lightning impulse, Residual voltage, Discharge withstand

1. 서론

오늘날 급속한 산업의 발전 및 생활의 현대화로 인해 송전전압의 고압화와 전기품질의 신뢰성 확보는 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]. 최근에는 피뢰기 폭발 및 비산특성과 수분침투에 의한 열화 등의 단점을 보

완한 폴리머(polymer) 재질의 피뢰기가 활발히 연구되고 있으며 다양한 성능평가 실험을 통해 그 성능이 확인되고 있어 수요가 날로 증대되고 있다 [3]. 이러한 피뢰기의 보호특성은 전적으로 피뢰기에 채용되는 ZnO 소자의 특성에 의존하며 선로 전압 및 사용 환경에 따라 다양한 등급 및 종류가 존재한다. 특히 시스템의 환경이 가혹해지고, 전압이 증가함에 따라 송전선로용 ZnO 소자 역시 높은 사양을 요구하게 되며 송전선로 특성상 피뢰기의 크기 및 무게를 경량화하기 위한 목적으로 소형화 설계가 필수적이다. 하지만 동일한 직경에서는 ZnO 소자가 고압화함에 따라 에너지 내량이 감소하는 단점도 있다. 따라서 송전선로용 피뢰기는 소형화 및 경량화를 위해 직렬 갭을 가지며, 피뢰기의 방전내량을 다소 낮게 선정하게 된다[4,5].

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

a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr
접수일자 : 2009. 6. 25
심사완료 : 2009. 7. 16

한편, 피뢰기는 전력계통에 설치되어 사용되며 주위온도의 변화와 연속적인 운전전압 등에 의해 누설전류를 야기시켜 열화를 가져온다[7]. 특히 송전용 피뢰기 소자의 경우 일반적인 전력용 피뢰기 소자와는 달리 상시인가전압에 따른 열화현상이 매우 적으므로 가속열화 등에 의한 평가는 무의미하며 온도변화에 따른 소자의 누설전류 경향을 조사하여 송전용 피뢰기 소자로서의 안정성 및 신뢰성을 확인하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 IEC 60099-4의 규격에 의거하여 설계되어진 ZnO 소자의 방전내량 특성 및 뇌임펄스 동작채무 특성을 통해 송전용 피뢰장치의 성능을 평가하였으며 이 후 온도변화에 따른 ZnO 소자의 누설전류 경향을 조사하였다.

2. 실험

2.1 ZnO 소자의 설계

송전선로용 ZnO 소자는 초고압용으로 일반적으로 사용되는 200 V/mm의 동작개시전압보다 다소 높은 300~400 V/mm로 설정하였다. 이는 피뢰기 소자부에 상시교류전압이 인가되지 않기 때문에 열화가 거의 없으므로 피뢰기의 소형화가 가능하기 때문이다. 따라서 소자의 높이를 소형화 할 수 있으며 향후 피뢰기 설계시 발생하는 피뢰기의 길이 및 하우징의 누설거리를 적절히 제어할 수 있다. 그러나 이러한 장점과 함께 동일한 직경에서는 ZnO 소자가 고압화함에 따라 에너지 내량이 감소하는 단점도 있다[6]. 이는 ZnO 소자의 체적이 작아지게 되면, 열용량이 작게되어 ZnO 소자의 에너지 내량이 감소하기 때문이다. 표 1에 본 시험에 사용된 ZnO 소자의 사양을 자세히 나타내었다.

표 1. ZnO 소자의 사양.

Table 1. Specification of ZnO block.

구분	정격
정격전압	7.0 kV
동작개시전압	9.0 kV 이상
제한전압(10kA)	19.1 kV 이하
정격주파수	60 Hz
정격방전전류	10 kA (2/20 μ s)
최대방전전류	30 kA (4/10 μ s)

2.2 동작개시전압 및 제한전압 특성

피뢰기의 동작채무시험은 실선로에서의 피뢰기 사용 상황을 모의한 시험으로, 송전선로용 피뢰기의 경우 공칭방전전류 10 kA, 방전내량 30 kA 및 선로방전등급 3으로 뇌임펄스 동작채무시험을 행해야 한다. 한편 그림 1에 뇌서지 동작채무시험 방법을 간략하게 나타내었는데 시험은 초기측정, 방전내량시험, 뇌서지 동작채무시험 및 측정과 검사의 총 4과정을 포함하고 있다. 따라서 뇌임펄스 동작채무시험 앞서 기본적인 전기적 특성을 평가하기 위해 동작개시전압 및 제한전압을 측정을 실시하여야 한다. 동작개시전압은 DC 1 mA가 흐를 때 소자에 인가되는 전압으로 측정하였으며, 제한전압의 경우 공칭방전전류(10 kA, 2/20 μ s)에서 측정하였다. 한편 IEC 및 IEEE/ANSI 등의 국제 규격에서는 제한전압에 대한 파형으로 표준 뇌임펄스는 8/20 μ s, 급준 뇌임펄스에 대해서는 1/20 μ s로 규정하고 있다[8]. 하지만 송전선로용 피뢰기에 적용되는 공극형 피뢰기에 대해서는 국제 규격에서 현재 검토하고 있으며, 일본의 경우 2/20 μ s 파형을 사용하고 있는데, 이는 철탑에 2/70 μ s의 뇌격이 침입 시 차폐가 성공적으로 이루어지면 피뢰기에는 2/20 μ s 형태의 서지가 통과하게 되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 2/20 μ s 파형과 8/20 μ s의 기존 표준 뇌임펄스 파형에서 각각 제한전압을 측정하였다.

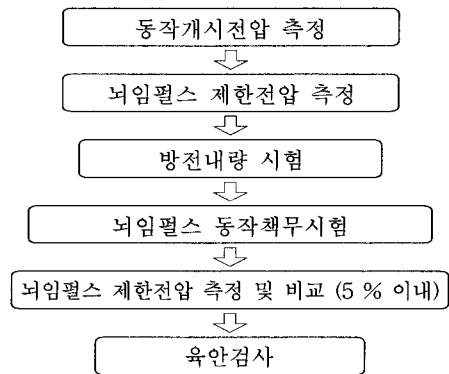


그림 1. 뇌임펄스 동작채무시험.

Fig. 1. Lightning impulse operating duty test.

2.3 방전내량시험

송전선로에 사용되는 ZnO 소자는 단위면적당 동작개시전압의 증가로 소자의 높이를 소형화 할

수 있다는 장점을 가지고 있으나 에너지 내량이 감소하는 단점을 가지고 있다. 따라서 ZnO 소자의 에너지 흡수 능력은 피뢰기의 보호성능 평가에 중요한 평가요인이 되므로 매우 중요하다. 방전내량 시험의 경우 5분 사이에 2번의 최대 뇌임펄스전류 ($4/10 \mu\text{s}$ 30 kA)를 인가 방전하고 시험 전과 후에 정격방전전류인 $2/20 \mu\text{s}$ 10 kA의 전류 방전시 피뢰기의 잔류전압을 측정하는 것으로 IEC 60099-4에 제시되어 있다[8]. 시험 전후에 잔류전압이 5% 이상 다르지 않아야 하며 관통, 섬락, 균열 등의 심각한 손상이 없어야 한다. 한편 본 시험의 경우 동일정격을 가지는 공칭방전전류 10 kA 이상의 전력용 피뢰기 소자와는 다소 다른 방식으로 시험이 진행되는데 기존의 갭리스(gapless)형 피뢰기의 경우 개폐충격제한전압을 측정한 후 산화아연소자에 유입되는 에너지를 계산한 후 36회 6군 총 18회 인가하도록 되어 있다. 이는 갭(gap)형의 피뢰기와는 달리 상시 과전되어 있어 뇌과전압과 함께 개폐과전압에도 견디는 구조로 소자 자체가 큰 정격전류와 에너지 내량이 있어야 한다.

2.4 뇌임펄스 동작채무시험

뇌임펄스 동작시험의 경우 그림 2와 같이 정격전압을 인가 후 공칭방전전류에 상당하는 뇌임펄스 전류를 정·부 양극성에 각각 5회씩(2 groups of 5 impulses) 총 10회 인가하였으며 뇌임펄스간의 간격은 1분이며, 정극성과 부극성의 그룹간에는 5분 간격으로 실시하였다. 시험이 끝난 후에는 ZnO 소자의 외관에 섬락 및 파괴흔적 등의 손상 유무와 시험 전·후의 제한전압 변화율을 5% 미만으로 규정하고 있다.

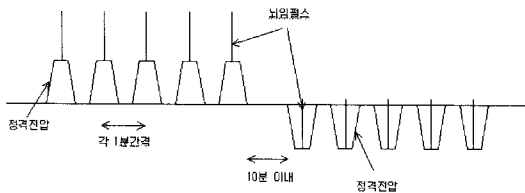


그림 2. 동작채무시험 패턴.
Fig. 2. Pattern of operating duty test.

2.5 ZnO 소자의 온도의존성 시험

일반적으로 ZnO 소자는 저전계 영역에서 온도 변화에 민감하게 반응하며 주위온도의 증가에 의해 피뢰기에 흐르는 전류는 크게 증가하게 된다.

따라서 본 시험에서는 뇌충격 동작채무시험이 끝난 후 온도에 따른 전기적 특성을 평가하였다. 시험조건은 일정온도의 항온조에서 1시간 동안 유지한 후 상용주파 교류전압을 인가하여 동작개시전압, AC 전진류 및 고조파 전류를 측정하여 온도조건에 따른 전압-전류 특성을 조사하였다. 항온조의 온도범위는 20 °C에서 최대 140 °C까지 상승시켰다.

3. 결과 및 고찰

표 2는 송전선로용 ZnO 소자의 동작개시전압 특성을 나타낸 것으로 각각의 시료들의 동작개시전압 측정치를 나타내었다. 표에서도 알 수 있듯이 각 시료들의 동작개시전압은 9.51~9.61 kV의 범위로 소자간의 편차가 거의 없는 균일한 전압을 나타내고 있다. 또한 단위 두께의 증가로 높은 동작개시전압을 가지고 있으며 이로 인해 피뢰기의 과전특성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

표 2. ZnO 소자의 동작개시전압.

Table 2. Reference voltage of ZnO block.

시료	시험전류	시험결과
1	1 mA d.c.	9.61 kV d.c.
2		9.51 kV d.c.
3		9.56 kV d.c.

그림 3은 표준 뇌임펄스($8/20 \mu\text{s}$)와 급준 뇌임펄스($2/20 \mu\text{s}$)에서 각각의 제한전압을 특성 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 20 kA의 뇌충격전류에서의 제한전압은 약 19.4 kV로 공칭 방전전류 10 kA에서의 17.5 kV에 비해 약 2 kV 정도 높은 것을 알 수 있었다. 한편 급준 뇌임펄스의 제한전압의 경우 표준 뇌임펄스보다 3% 정도 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 관련해 문헌 등에서는 대략 5% 정도의 상승률을 가지는 것으로 나타나 있으며, 그 원인으로서는 급준파의 파두장이 길이가 짧아졌기 때문인 것으로 확인되었다. 한편 송전용 ZnO 소자의 제한전압비는 1.79~2.09 사이로 다소 양호한 특성을 나타내었으며, 이러한 특성으로부터 피뢰기의 에너지 레벨 상승 및 서지 차단능력, 과전열화 특성을 향상시킬 수 있다.

ZnO 소자는 이상전압에 대해 제한전압 이하로 억제하여 일정한 뇌임펄스 전류가 흐르는 것을 확

인할 수 있다. 한편, 일본의 송전선로용 ZnO 소자의 경우 2/20 μ s 파형을 가지는 피뢰기의 최대방전 전류를 2회 인가하는 것으로 규정하고 있지만 본 시험에서는 IEC 60099-4의 규격에 따라 4/10 μ s 파형에서 2회 인가하는 방법으로 시험을 실시하였다.

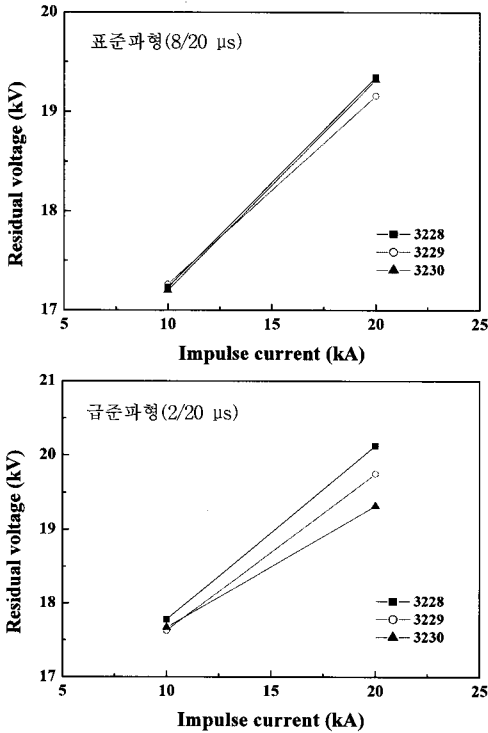
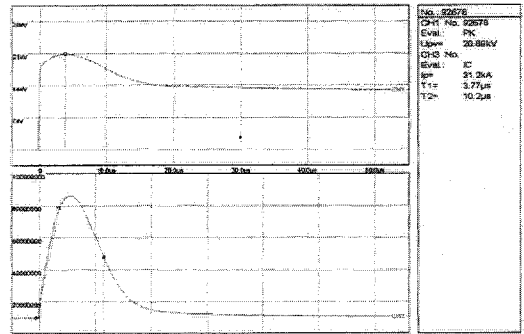


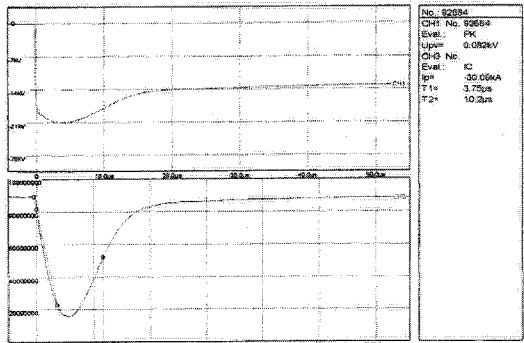
그림 3. 충격전류에 따른 제한전압.
Fig. 3. Residual voltage with impulse current.

그림 4는 뇌임펄스 전류 30 kA, 4/10 μ s를 인가한 파형을 나타내는 것으로 이 두 파형에 대해서는 4/10 μ s의 파형은 성공적으로 차폐되었을 때, 2/20 μ s의 파형은 차폐 실패시의 뇌격을 대표한 값을 나타낸다. 일반적으로 소형화된 피뢰기가 일반 피뢰기에 비해 다소 낮은 방전내량에도 불구하고 뇌격의 차폐시나 실패시에도 피뢰기의 실패율이 극히 적은 것으로 미루어볼 때 성공적으로 차폐되었을 때를 대표하는 뇌격인 4/10 μ s 파형에서의 에너지내량시험이 적당한 것으로 판단된다. 먼저 30 kA의 충격전류를 정·부의 양극성에 각각 2회씩 인가한 후 시험 전·후의 뇌충격 제한전압 변화율을 확인하였으며, 시료들의 제한전압은 표 3과 같이 0.6~3.1 %의 변화로 5 % 이내의 변화량으로 규정을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 피뢰기 소

자의 섬락, 관통 및 균열 등의 손상 또한 없는 것으로 나타났다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 4. 방전내량시험 파형.
Fig. 4. Wave shape of discharge withstand test.

표 3. 시험 전·후의 제한전압 변화.
Table 3. Variation of residual voltage before and after discharge withstand test.

시료	제한전압(kV)		변화율(%)
	시험전	시험후	
1	17.58	18.13	+3.1
2	17.85	18.39	+3.0
3	18.34	18.45	+0.6

그림 5는 뇌임펄스 동작채우시험에 따른 제한전압 변화를 나타내는 것으로 시험 소자의 경우 총 10회의 충격전류에도 불구하고 제한전압은 +2.3 %의 변화를, 시험 후에는 소자 외관에 섬락 흔적은 확인할 수 없었다. 따라서 5 % 미만의 값으로 소

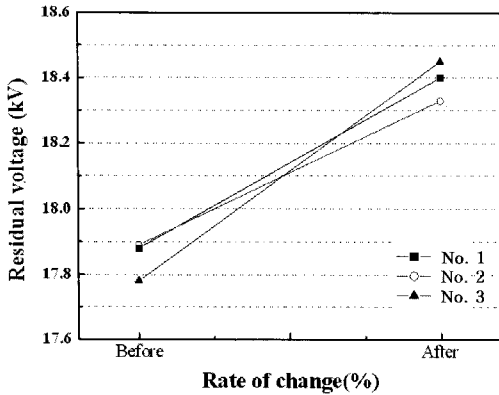
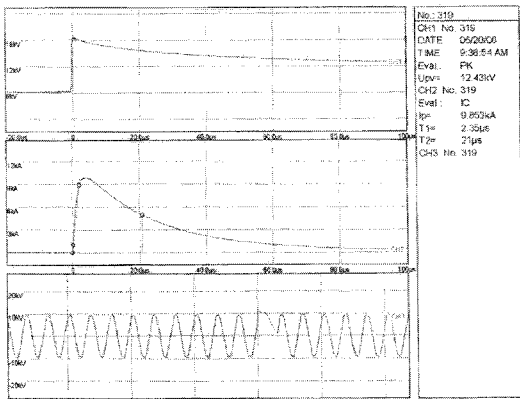
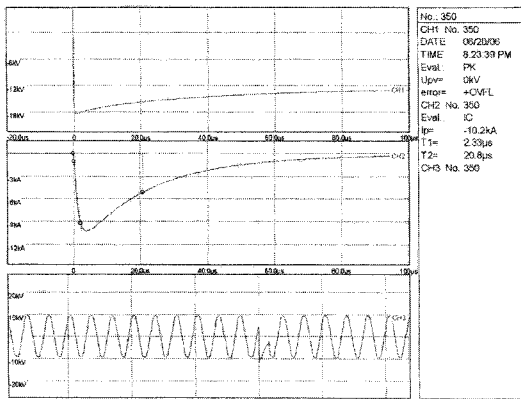


그림 5. 동작책무시험 전·후의 제한전압 변화.
 Fig. 5. Variation of residual voltage before and after operating duty test.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 6. 뇌임펄스 동작책무시험 파형.
 Fig. 6. Wave shape of operating duty test.

자의 열화는 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 다만 시험 후 제한전압이 증가경향을 보인 것은 ZnO 소자의 열적인 특성으로 쇼트키장벽의 일시적인 변형에서 기인하는 결과로 사료되며 이는 소자의 열화와는 무관하다 할 수 있다. 결과적으로 본 시험에 사용된 ZnO 소자의 경우 시험이 종료된 후에도 전기적 특성을 유지하고 있으며 초고압 소자로서의 에너지 흡수능력 또한 상당히 우수한 것을 확인할 수 있다. 한편 방전내량 시험 소자의 경우 뇌임펄스시험 소자보다 제한전압 변화가 다소 큰 것으로 나타났는데, 이는 뇌임펄스 전류에 의한 열화는 파두장의 크기 즉 1회 인가되는 에너지량과 파피장의 길이가 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그림 6에 동작책무시험에 따른 전류파형을 나타내었다.

그림 7은 온도변화에 따른 전압-전류 특성을 나타낸 것으로 최대 140 °C까지 온도가 증가함에 따라 동작개시전압은 9.53~8.95 kV 까지 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 소자의 열화가 통상적으로 10 % 이내로 규정하고 있음을 고려할 때 6 % 이내의 값으로 열화의 정도를 평가하기는 다소 어려움이 있다. AC 누설전류의 경우 온도가 증가함에 따라 순차적으로 증가하는 것으로 나타났으며 초기 0.24 mA에서 최대 0.7 mA까지 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 온도 변화에 따른 전류 크기를 확인한 결과 온도가 증가할수록 저항분 전류의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있으며 이는 FFT 기법을 이용하여 정확히 분석한 결과 초기 저항분 전류보다 200배 이상 증가한 것을 알 수 있었다.

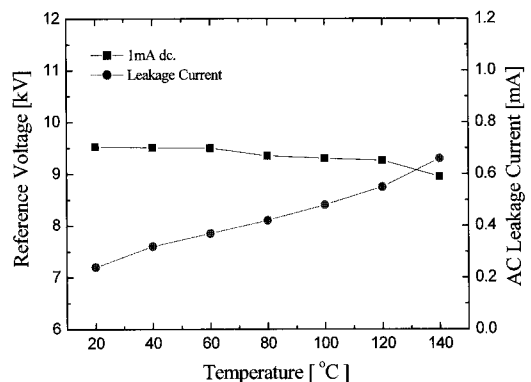


그림 7. 온도변화에 따른 전압-전류 특성.
 Fig. 7. V-I characteristics according to the temperature variation.

그림 8은 온도의 변화에 따른 각 고조파 성분에 대한 변화율을 비교한 결과로 저항분 전류, 5 고조파,

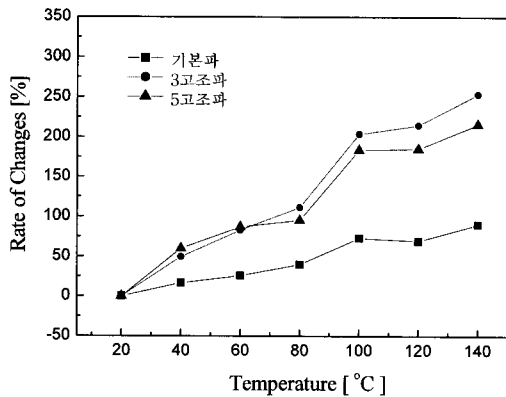


그림 8. 온도변화에 따른 저항분 누설전류.
 Fig. 8. Resistive leakage current according to the temperature variation.

기본과 순으로 제 3고조파 전류에서 가장 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 ZnO 소자의 저전계 영역에서의 고유저항특성으로 인해 온도 증가에 따라 전류 캐리어밀도가 큰 폭으로 증가하여 강한 온도의존성을 보이는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 송전선로용 ZnO 소자의 방전내량 특성 및 뇌임펄스 동작채무 성능을 평가하였으며 이 후 온도변화에 따른 소자의 누설전류 경향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 송전선로용 ZnO 소자의 동작개시전압은 9.51 ~ 9.61 kV의 범위로 소자간의 편차가 거의 없는 균일한 전압을 나타내었다.
- 2) 급준 뇌임펄스의 제한전압의 경우 표준 뇌임펄스보다 3 % 정도 높게 나타났으며 제한전압비는 1.79 ~ 2.09 범위로 서지 차단능력, 과전열화 특성 또한 우수한 것으로 확인되었다.
- 3) 송전선로용 ZnO 소자의 방전내량 시험을 실시한 결과 소자의 섬락이나 파괴는 발생되지 않았으며 제한전압은 0.6 ~ 3.1 %의 변화로 5 % 이내의 변화량으로 IEC 60099-4 규격을 만족하였다.
- 4) 뇌임펄스 동작채무시험을 실시한 결과 열적 안정성은 우수하였으며 +2.3 %의 제한전압변화로 열화는 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 또한 시험 후에도 소자 외관에 섬락흔적은 확인할 수 없었다.
- 5) 뇌임펄스 전류에 의한 열화는 파두장의 크기 즉 1회 인가되는 에너지량과 파두장의 길이가 큰

영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

- 6) 온도변화에 따른 전압-전류 특성을 확인한 결과 온도가 증가함에 따라 동작개시전압은 9.53 ~ 8.95 kV 범위로 감소하였으나 6 % 이내의 변화량으로 열화가 발생하지 않은 것으로 확인되었다.
- 7) AC 누설전류의 경우 온도가 증가함에 초기 0.24 mA에서 최대 0.7 mA까지 증가하는 경향을 나타내었으며 저항분 전류의 경우 초기치의 200 배 이상 증가한 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] L. M. Levinson and H. R. Philipp, "Zinc oxide varistors—a review", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 65, p. 639, 1986.
- [2] T. K. Gupta, "Application of zinc oxide varistors", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, p. 1817, 1990.
- [3] K. Lahti, B. Richter, K. Kannus, and K. Nousiainen, "Internal Degradation of Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters in Very Humid Ambient Conditions", IEEE High Voltage Engineering Symposium, 1999.
- [4] K. Lahti, K. Kannus, and K. Nousiainen, "A comparison between the DC leakage currents of polymer housed metal oxide surge arresters in very humid ambient conditions and in water immersion tests", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, p. 163, 1999.
- [5] J. He, S. Chen, R. Zeng, J. Hu, and C. Deng, "Development and application effect of polymeric surge ZnO arresters for 500 kV compact transmission line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, p. 113, 2006.
- [6] S. Shirakawa, S. Yamada, S. Tanaka, I. Ejiri, S. Watahiki, and S. Kondo, "Improved zinc oxide surge arresters using high voltage gradient 300 V/mm, 400 V/mm ZnO elements", IEEE Trans. PWRD, Vol. 15, No. 2, p. 569, 2000.
- [7] J. Kuang, Jeffrey A. Bennett, Ram C. Bommakanti, and Steven A. Boggs, "Temperature Distribution in a ZnO Arrester Subjected to Multiple Current Impulses", Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1996.
- [8] IEC 60099-4 "Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for a.c. System", 2001.