

다중 뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 특성 변화

論 文
49C-12-6

Characteristic Changes of ZnO Arrester Blocks by Multiple-lightning Impulse Currents

吉 曠 碩* · 韓 柱 燮**
(Gyung-Suk Kil · Joo-Sup Han)

Abstract - Multiple-lightning impulse currents are a general feature of the lightning ground flash. It is therefore necessary for lightning arresters used in power systems to be estimated by applying not only a single-lightning impulse current but also a multiple-lightning impulse currents.

This paper presents the effects of multiple-lightning impulse currents on deterioration of ZnO arrester blocks. The multiple-lightning impulse generator which can produce quadruple 8/20 [μ s] 5 [kA] with separation time of 30~120 [ms] is designed and fabricated. The total energy applied to the arrester block at each impulse is about 1,200 [J].

In experiment, various parameters such as leakage current component, reference voltage, and temperature are measured with the number of applied impulse current. Also, micro-structure changes of the ZnO blocks after applying the single and the multiple-lightning impulse currents of 200 times are compared.

The experimental results indicate that the types of arrester blocks are more vulnerable to deterioration or damage by multiple-lightning impulse currents.

Key Words : multiple-lightning impulse currents, lightning ground flash, lightning arresters, deterioration

1. 서 론

전력계통에서 이상전압에 대한 전력기기 및 선로의 보호대책으로 피뢰기가 사용되고 있으며, 현재는 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 ZnO 소자를 적용하고 있다. ZnO 소자를 내장한 피뢰기는 과거 SiC 소자를 내장한 피뢰기보다 전기적 특성이 우수하여 이상전압에 대한 보호성능도 현저히 개선되었다. 그러나 ZnO 소자도 흡습이나 이상전압에 대해 반복되는 보호동작으로 열화가 진전되며, 이러한 열화로 인하여 피뢰기의 폭발이나 지락사고 등 2차적인 사고를 발생시킨다.

국내 특고압 배전선로의 사고 통계를 보면 표 1과 같이 절연재료와 중전기기의 성능 향상, 유지보수 기술의 발전으로 전체 사고건수는 전년도에 비하여 감소하였으나, 배전선로와 피뢰기 설치개소의 증가로 개폐기 및 배전기기류 중 피뢰기가 원인이 된 사고는 98년 44.6 [%], 99년 23.2 [%]로 상당한 비중을 차지하고 있어, 이에 대한 정확한 분석과 대책 수립이 요구된다. 따라서 피뢰기의 초기성능은 물론 사용에 따른 전기적, 물성적 특성을 파악하여 피뢰기의 성능향상과 수명을 예측하는 것은 대단히 중요한 일이며, 이에 대해 많은 연구가

발표되고 있다[1]~[4].

피뢰기의 성능은 피뢰기 소자의 특성, 제조기술, 설치조건 등에 따라 달라지며, 열화로 인한 성능저하는 흡습, 상용주파수 과전압이나 뇌과전압 등에 의해 피뢰기가 보호동작을 할 때 크게 진전되며, 현재 국내 전력계통의 전압은 안정적이므로 주로 뇌과전압이 주 요인이 되고 있다.

표 1 배전선로의 주요 사고 원인 통계 보고(단위:건)

Table 1 Statistical reports on major failure causes in power distribution lines.

구 분	자연 열화	외물 접촉	자연 현상	제작 불량	일반인 과 실	기타	합계
피뢰기	42(50)	17(22)	19(43)	0(11)	0(0)	5(4)	83(130)
I/S	6	26	2	0	0	0	34
선로용COS	9	14	4	1	1	1	30
G/S	7	8	6	11	0	1	33
R/C	5	4	4	1	5	0	19
기 타	62	49	37	3	0	8	159
합 계	131	118	72	16	6	15	358
점유율(%)	36.6 (32)	33.0 (26.8)	20.1 (25.7)	4.5 (7.9)	1.6 (2.1)	4.2 (5.5)	100

※ 1. 99년 개폐기류 고장의 36.6 [%]가 자연열화이며, 32.1[%]가 피뢰기에서 발생.

2. ()내는 98년 통계자료

* 正 會 員 : 韓 國 海 洋 大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : 韓 國 海 洋 大 工 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

接 受 日 字 : 2000年 7月 25日

最 終 完 了 : 2000年 12月 6日

피뢰기 시험평가에는 국내·외 규정 KSC 4609, ES 153-261, ANSI/IEEE C62.11을 적용하며, 임펄스시험과 동작채무시험에는 4/10 [μs] 및 8/20 [μs]의 단일의 뇌충격전류를 일정시간 간격(≤1 (s))으로 인가하는 방법을 적용하고 있다[5]~[7].

그러나 자연현상에 발생하는 낙뢰는 1회의 방전과정에서 최대 26회까지 관측된 바 있으며, 평균 30~40 [ms]의 시간 간격으로 3~4회 발생하는 것으로 알려져 왔다[8]. 그러므로 피뢰기의 성능 분석과 열화진단, 수명예측 등에 단일 뇌충격전류는 물론, 자연현상의 낙뢰와 같은 다중 뇌충격전류를 인가하여 평가하는 것이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서도 산화아연형 ZnO 피뢰기 소자에 단일 뇌충격전류와 4회의 다중도를 가진 뇌충격전류를 인가하여 전기적, 물리적 특성을 비교·분석하였으며, 단일 뇌충격전류에 의한 실험결과와 다중 뇌충격전류에 의한 실험결과는 전기적 특성변화에 있어 큰 차이가 있음을 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 ZnO 소자의 다중 뇌충격전류에 의한 전기적 특성과 미세구조의 변화를 분석하기 위하여 단일 및 다중 뇌충격전류 발생장치를 설계·제작하였으며[9],[10], 실험에는 국내 배전계통의 피뢰기(18 [kV], 2.5 [kA])에 사용되는 ZnO 피뢰기 소자를 적용하였으며, 전기적 특성은 표 2와 같다.

표 2 ZnO 소자의 전기적 특성
Table 2 Electrical characteristics of the ZnO blocks

정격전압	6 [kV _{rms}]
정격전류	5 [kA]
동작개시전압	AC 7.2~ 8.64 [kV]
	DC 8.6~10.12 [kA]

그림 1과 그림 2에는 본 연구에서 구성한 실험장치 및 측정계를 나타내었다. 다중 뇌충격전류 발생장치는 4개의 충전용 콘덴서(100 [kV] 0.5 [μF])뱅크와 8개의 방전구갯(100 [mm])으로 구성되어 8/20 [μs], 5 [kA] 4회의 표준 뇌충격전류를 발생시킬 수 있다. 발생하는 충격전류의 크기는 콘덴서의 충전전압을 고저항(500 [MΩ])과 직류 전류계(0~3000 [μA])의 조합으로 측정하면서 조절하였다.

다중 뇌충격전류 발생장치의 뇌격시간 간격은 방전갯의 위치를 조정하여 30 [ms]~120 [ms]가 되도록 하였으며, 1분 간격으로 4회의 뇌충격전류를 발생시킬 수 있도록 하였다.

ZnO 소자의 방전전류는 교정된 분류기의 양단전압을 차동 프로브(Tek. 6015A, 20 [MHz])로 측정하여 환산하였으며, 제한전압은 고전압 프로브(Tek. 6015A, 70 [MHz], 40 [kV])를 이용하여 측정하였다.

다중 뇌충격전류의 실험결과와 비교하기 위한 단일 뇌충격전류 인가실험의 경우, ZnO 소자에 뇌충격전류를 1분 간격으로 40회 인가하고 1시간 이상 충분히 냉각시키는 실험을 반복하였으며, 다중 뇌충격전류의 인가실험에서는 4회의 뇌

충격전류를 10회 인가하고 1시간 이상 소자를 냉각시키는 방법을 적용함으로써, 측정시점에서는 단일 및 다중 뇌충격전류로 소자에 인가되는 에너지량이 동일하도록 하였다.

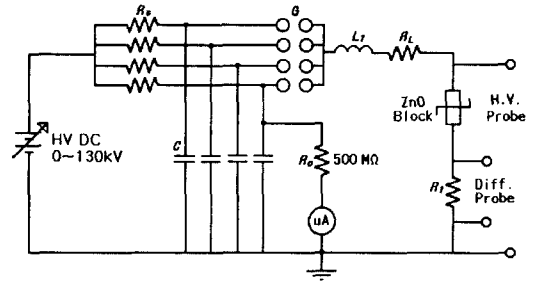


그림 1 실험장치 및 측정계의 개략 구성
Fig.1 Configuration of the experimental apparatus and the measurement system.

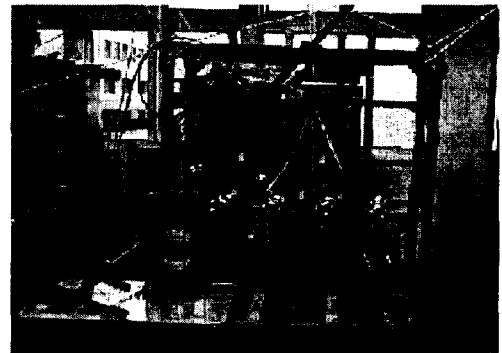


그림 2 뇌충격전류 발생장치의 사진
Fig. 2 Photograph of the multiple-lightning impulse current generator

그림 3은 다중 뇌충격전류를 소자에 인가할 때, 소자에 흐르는 방전전류와 소자 양단의 제한전압을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 수평축 시간 간격을 5 [μs]로 하여 4개의 다중뇌격이 발생할 때, 그 중 1개의 방전전류와 제한전압을 나타낸 것으로 매회 피뢰기 소자에 인가되는 파형의 특성을 알 수 있다.

8/20 [μs], 5 [kA] 단일의 뇌충격전류로 ZnO 소자에 인가되는 에너지는 식 (1)과 같이 산출할 수 있으며, 본 실험파형의 경우, 1,217 [J]의 에너지가 인가된다.

$$w = \int vi dt [J] \tag{1}$$

그림 3(b)는 수평축 시간 간격을 20 [ms]로 설정하여 1회의 방전에 발생하는 4중 뇌충격전류의 시간 간격을 나타낸 것으로, 약 55 [ms]마다 뇌충격전류가 ZnO 소자에 인가됨을 알 수 있다.

다중 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 전기적 특성변화는 상기의 조건으로 실험을 반복하면서 정상운전전압에서 누설전류의 최대값 및 실효값과 동작개시전압을 측정하여 비교·분석하였다.

교류전압이 ZnO 소자 양단에 인가되었을 때, 소자에 흐르는 누설전류는 용량분 전류와 저항분 전류의 합으로 나타나

게 되며, 정상운전전압에서 측정된 누설전류의 파형 예를 그림 4에 나타내었다. 검출된 누설전류는 전력분석장치(최대값, 실효값 및 평균값)를 통해 출력된다.

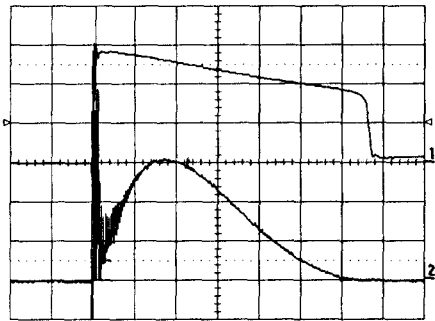
사형 전자현미경(SEM)으로 미세구조 변화를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

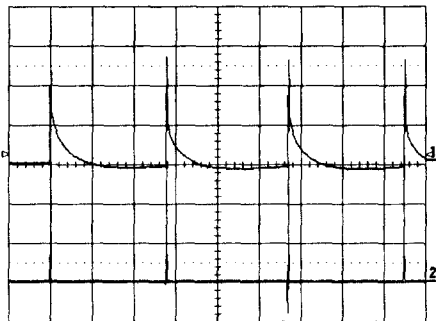
3.1 누설전류 및 동작개시전압의 변화

ZnO 소자에 단일 뇌충격전류와 다중 뇌충격전류로 동일한 에너지를 인가한 후, 뇌충격전류 발생장치로부터 소자를 분리하여 소자 양단에 직류 또는 교류 전압을 인가하고 상승시켜 가면서 정상운전전압(4.4 [kV])에서 누설전류의 최대값과 실효값의 변화와, 소자에 흐르는 누설전류가 1 [mA]로 되었을 때의 동작개시전압을 비교하여 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5(a)를 예로 들면 뇌충격전류의 80 회 인가는 단일 뇌충격전류를 1 분 간격으로 1 회씩 인가한 경우와 4 회씩 다중 뇌충격전류를 20 회(단일과 비교하면 80 회로 동일한 에너지량이 인가된 경우에 해당)인가하였을 때, 누설전류를 측정하는 것이다.

전기적 정격이 같은 2 개사 ZnO 소자에 대해 뇌충격전류를 인가하고 누설전류의 변화를 측정한 결과, 전체누설전류의 실효값은 변화가 거의 없었으나, 최대값은 단일 뇌충격전류 인가실험에서와 마찬가지로 다중 뇌충격전류 인가방법에서도 증가하는 경향을 나타내었다. 누설전류의 최대값은 ZnO 소자의 종류에 따라 차이가 있으나, 본 실험에 사용한 A 사 및 B 사의 경우 200 회의 뇌충격전류 인가시 초기 누설전류에 비해 현저하게 증가하였다.



(a) 방전전류 및 제한전압



(b) 다중 뇌충격전류의 발생

그림 3 다중 뇌충격전류 발생장치에 의해 발생된 파형 예
Fig. 3 Typical waveforms produced by the multiple-lightning impulse current generator

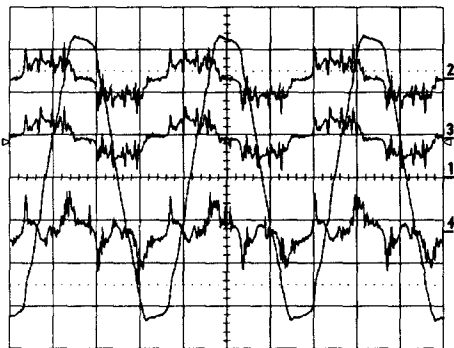
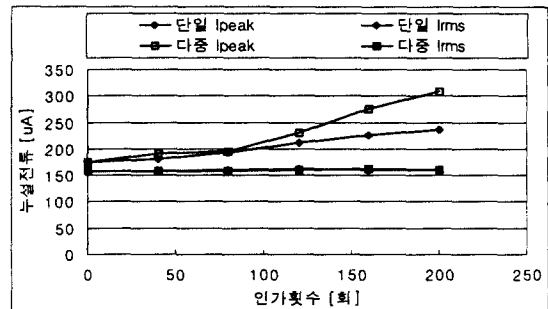
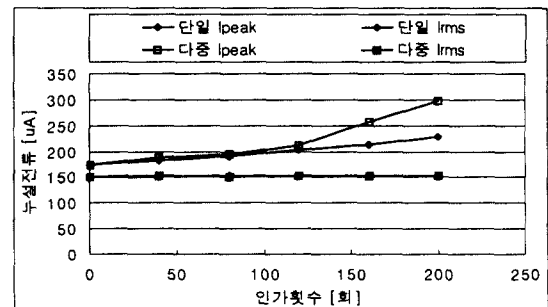


그림 4 누설전류 파형
Fig. 4 A leakage current waveform

단일과 다중 뇌충격전류로 ZnO 소자에 동일한 에너지를 인가한 경우 온도변화를 분석하기 위하여 ZnO 소자의 절연부(glass coating) 표면에 열전대를 설치하였으며, 뇌충격전류를 200 회 인가하여 실험을 마친 시료에 대해서는 분쇄후 주



(a) A 사



(b) B 사

그림 5 정상운전전압에서 뇌충격전류에 의한 누설전류의 변화

Fig. 5 Changes of leakage currents by the lightning impulse current in normal operating voltage

ZnO 소자에 동일한 뇌충격전류를 인가하였지만, 다중 뇌충격전류를 인가한 경우에 더 빠른 누설전류의 증가를 나타내었다. 이것은 입계층 쇼트키 장벽의 변형에 기인하는 것으로 동일한 소자에 대해 온도가 높은 경우 열화가 가속화되며, 이것에 의해 누설전류가 증가한다. 특히 다중 뇌충격전류 인가시는 충격전류에 의해 소자내의 ZnO 입자가 국부적으로 가열된 상태에서 수 십[ms] 이내에 계속하여 계면에 전계가 집중되고, 연속적인 뇌충격전류가 인가되기 때문에 단일 뇌충격전류의 인가시보다 빠르게 열화가 진행되어 누설전류도 빠르게 증가하는 것으로 생각된다^[11]. 또한 뇌충격전류의 인가에 의해 누설전류의 최대값은 현저한 증가를 나타내지만, ZnO 소자의 동작개시전압은 그림 6에 나타낸 바와 같이 변화가 없었다.

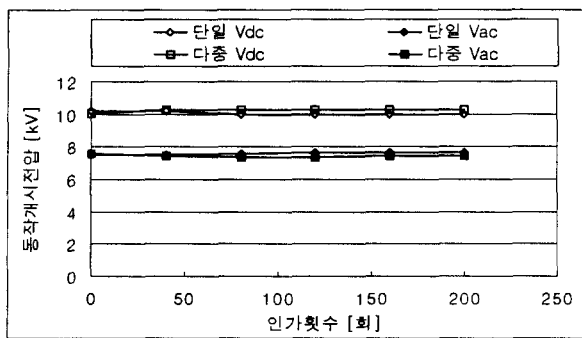


그림 6 정상운전전압에서 뇌충격전류에 의한 동작개시전압의 변화
Fig. 6 Changes of reference voltages by the lightning impulse current in normal operating voltage

여러 가지 실험에서 나타난 바와 같이 동작개시전압은 ZnO 소자의 심각한 국부적인 손상 또는 파괴, 뇌충격전류에 의한 핀홀(pin-hole) 생성 등의 경우에 현저한 저하를 나타낼 뿐 어느 정도 열화가 진행되어도 거의 변화가 없음을 본 실험에서도 알 수 있었다^[12].

3.2 온도 특성

전류의 파괴값이 크고 주기가 짧은 뇌충격전류는 ZnO 소자의 국부적인 가열로 인해 소자의 기능을 저하시키며, 이러한 국부적인 열적 팽창에 의한 기계적 스트레스는 구조적 손상을 발생시키게 된다. 또한 충격전류가 인가될 때, 소자의 도전율은 온도에 거의 독립적이지만, 상용주파수 정상운전전압이 인가된 상태의 저전계 영역에서의 누설전류는 온도에 강한 의존성을 나타낸다. 결국 저전계 영역에서 누설전류가 크게 되면 일정 시간내에 소자는 열폭주에 도달하여 파괴된다^[4].

따라서 뇌충격전류에 대한 보호동작으로 소자가 국부적으로 가열되어 있는 상태에서는 뇌충격전류가 소멸되어 소자 양단에 정상운전전압이 인가되어 있는 저전계 영역에 있더라도, 이 영역에서 누설전류는 온도에 강한 의존성 때문에 짧은 시간내에 열폭주에 도달하므로 소자의 충격전류에 의한 온도 변화를 비교할 필요가 있다.

그림 7은 ZnO 소자에 뇌충격전류를 인가하면서 소자의 표면에서 측정된 온도를 나타낸 것이다. 뇌충격전류의 인가에 의해 소자의 표면 온도는 급격히 상승하는 경향을 나타내었

으며, 매 40 회의 뇌충격전류 인가 후 소자를 주위온도까지 충분한 냉각시켰기 때문에 군단위의 초기 온도는 최초 충격전류 인가할 때와 마찬가지로 소자의 표면온도는 주위온도 (27 [°C])를 나타낸다. 또한 단일 뇌충격전류를 인가한 경우보다 다중 뇌충격전류를 인가하였을 때가 급격한 온도상승을 나타내었으며, 약 100 회 이상에서의 최종온도는 124~127 [°C]로 더 이상 상승하지 않았다.

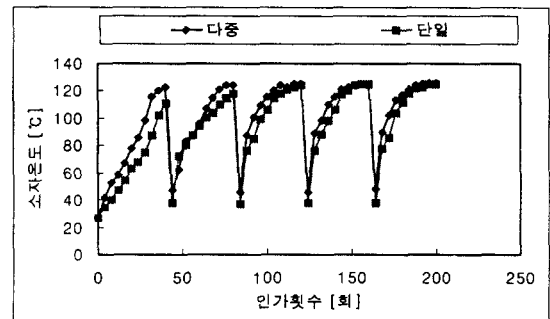


그림 7 뇌충격전류 인가에 의한 소자의 표면 온도 변화
Fig. 7 Changes of the surface temperature of the block by the lightning impulse currents

3.3 미세구조변화

ZnO 소자는 그림 8의 미세구조에 나타난 바와 같이 세라믹 다결정체로 ZnO 입자(grain), 입계층(grain boundary), 스피넬(spinel)의 3가지 결정상으로 구성되어 있다. 전형적인 입자(grain)의 크기는 10~20 [μm] 정도로 쌍을 이루고 있으며, 스피넬상은 ZnO 입자와 입자사이에 존재하고, ZnO 입자를 둘러싸고 있는 입계층은 Bi₂O₃ 중심의 첨가물로써 절연성을 가지는 부분으로 ZnO 소자의 비선형 저항특성과 누설전류의 크기에 영향을 준다^[13].

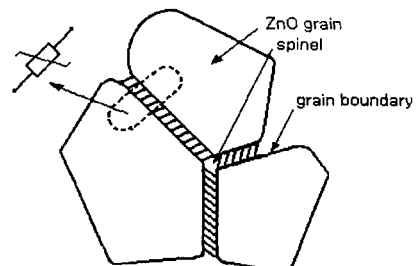
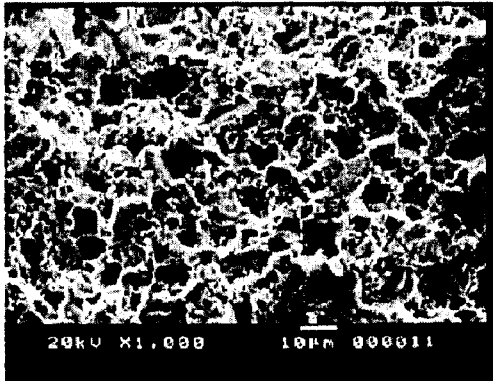


그림 8 ZnO 소자의 미세구조
Fig. 8 Micro-structure of a ZnO block

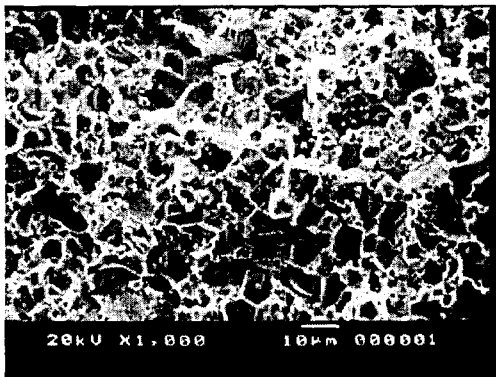
ZnO 소자의 파괴 형태는 핀홀, 크랙, 표면 절연파괴 등 다양하게 나타나지만, 열화의 정도는 소자 표면상태로는 판별할 수 없다. 그러나 열화상태이든 손상상태이든 소자의 미세구조는 초기상태와 비교하여 입자가 성장하여 입자 크기가 불균일해지며, 입계층이 감소하는 형태로 나타나는 것이 일반적이다

본 연구에서는 뇌충격전류 인가에 따른 ZnO 소자의 미세구조 변화를 분석하기 위하여 뇌충격전류를 단일 및 다중의 2가지 방법으로 200 회 인가후 소자를 기계적으로 파괴하여 각각 5개의 시편을 채취하고 주사형 전자현미경으로 촬영하

였으며, 그 예를 그림 9에 나타내었다. 신품의 미세구조는 일반적으로 ZnO 입자의 크기가 10 [μm] 정도로 균일하게 배열되어 있으나, 뇌충격전류로 열화가 진전되면 입계층이 좁아지고 입계가 성장하여 불균일하게 되는 부분이 나타난다.



(a) 단일 뇌충격전류 인가 후



(b) 다중 뇌충격전류 인가 후

그림 9 뇌충격전류에 의한 ZnO 소자의 미세구조변화
Fig. 9 Changes of micro-structure of the ZnO blocks by the lightning impulse current

그림 9(a)와 그림 9(b)를 비교하면, 전체적으로 입자의 크기가 다소 불균일해지고 입자의 크기도 12~17 [μm]로 성장한 것을 알 수 있는데, 이는 뇌충격전류의 흡수시 고전계와 열누적으로 인하여 입계층이 감소하고 ZnO 입자가 성장한 것이다. 또한 동일한 에너지량을 인가하였을 때 단일 뇌충격전류를 인가한 경우의 평균 입자 직경이 12.7 [μm]이지만, 다중 뇌충격전류를 인가한 경우의 평균 입자의 직경은 13.6 [μm]로 현저한 차이는 아니지만 입자의 크기가 조금 더 크게 성장한 것을 알 수 있으며, 이것이 원인이 되어 누설전류의 최대값도 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

자연현상의 낙뢰는 1 회의 방전에 평균 4 회의 뇌격을 포함하므로, ZnO 소자의 성능도 다중 뇌충격전류에 의해 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류와 다중 뇌충격전류를 인가하여 소자를 가속 열화시키고,

이에 대한 ZnO 소자의 전기적, 광학적 특성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1분 간격으로 단일 뇌충격전류와 4중의 다중 뇌충격전류를 인가하는 방법으로 ZnO 소자에 동일한 에너지를 가하였을 때, 다중 뇌충격전류를 인가한 경우가 누설전류의 최대값이 더 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 다중 뇌충격전류 인가시 뇌충격전류에 의해 ZnO 입자가 국부적으로 가열되어 있고, 계면에 전계가 집중되어 있는 상태에서 연속적인 충격전류가 인가되기 때문에 단일 뇌충격전류의 인가시보다 빠르게 열화가 진행되어 나타나는 현상으로 판단된다.

2. 상기 2가지 실험방법으로 뇌충격전류를 인가하였을 때 ZnO 소자의 미세구조는 동일한 에너지를 인가하였지만, 다중 뇌충격전류를 인가하였을 때가 입자의 크기가 조금 더 크게 성장한 것이 확인되었다.

이와 같이 피뢰기 및 ZnO 소자의 성능은 현재 시행되고 있는 단일 뇌충격전류 인가에 의한 시험방법은 물론, 다중 뇌충격전류에 의한 시험평가가 병행되어야 전력계통에서 피뢰기의 보호성능을 정확히 평가할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Bartkowiak et al., "Failure Modes and Energy Absorption Capability of ZnO Varistors", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 152~162, 1999.
- [2] W. G. Carlson, T. K. Gupta, A. Sweetana, "A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 1, No. 2, pp. 67~74, 1986.
- [3] O. Nigol, "Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1256~1262, 1992.
- [4] Jinbo Kuang et al., "Temperature Distribution in a ZnO Arrester Subjected to Multiple Current Impulses", Proceeding of the 1996 International Symp. on Electrical Insulation, pp. 494~497, 1996. 7.
- [5] 한국공업표준협회, "산화아연형 갭리스 피뢰기", KSC 4609, 1987.
- [6] 한국전력공사, "전력용 피뢰기", ES 153-261, 1984.
- [7] The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., "IEEE Std. for Metal-Oxide Surge Arresters for AC power Circuits", ANSI/IEEE C62.11, 1987.
- [8] Martin A. Uman, The Lightning Discharge, Academic Press Inc., pp. 1~36, 1987.
- [9] 길경석 외, "다중 뇌충격전류에 의한 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화", 대한전기학회 하계종합학술대회는문집, C권, pp. 2035~2037, 2000. 7.
- [10] 길경석 외, 피뢰기 누설전류 분석장치의 설계 및 제작, 대한전기학회 방전 및 고전압 연구회 춘계학술대회는문집, pp. 65~68, 1999.
- [11] S. Tominaga, Y. Shibuya et al., "Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters",

- IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1548~1556, 1980.
- [12] 길경석, 한주섭, 박영호, "뇌충격 전류에 의한 산화아연형 피뢰기소자의 전기적 특성변화, 대한전기학회 논문지, Vol.48, No.7, pp. 550-555, 1999.7.
- [13] S. S. Kershaw, G. L. Gaibrois, K. B. Stump, "Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.1, pp. 301~307, 1989.

저 자 소 개



길 경 석 (吉 曠 碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 한국해양대학교 공과대학 전기공학과 조교수

Tel : 051-410-4414

E-mail : kilgs@hanara.kmartime.ac.kr



한 주 섭 (韓 柱 燮)

1972년 1월 13일생. 1997년 2월 부경대학교 제어계측공학과 졸업. 1999년 2월 한국해양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 3월~동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 051-410-4893

E-mail : 997059@hanbada.kmaritime.ac.kr