

산화아연소자의 성형공정에 따른 전기적 특성과 성능평가

Electrical Characteristics and Performance Evaluation with Manufacturing Process of Zinc Oxide Varistors

조한구^{1,a}, 윤한수¹, 김석수¹, 최인혁²

(Han-Goo Cho^{1,a}, Han-Soo Yoon¹, Suk-Soo Kim¹, and In-Hyuk Choi²)

Abstract

This paper presents the electrical characteristics with manufacturing process and performance evaluation of high performance zinc oxide varistors. ZnO varistors were fabricated with typical ceramic production methods with different thickness and the structural and electrical characteristics of ZnO varistors were investigated. All varistors exhibited high density, which was in the range of 5.41~5.49 g/cm³. In the electrical properties, the reference voltage increased in the range of 4.410~5.250 kV with increasing their thickness and the residual voltage exhibited the same trends as the reference voltage. In the long duration current impulse withstand test, E-2 and F-1 samples failed at the two and four shots of impulse current, respectively, but E-1 and F-2 samples survived 18 shots during the test. Before and after this test, the variation ratio of residual voltage of E-1 and F-2 samples were -0.34 % and 0.05 %, respectively, which were in the acceptance range of 5 %. According to the results of tests, it is thought that if the fabrication process such as insulating coating, sintering condition, and soldering method is improved, these ZnO varistors would be possible to apply to the station class arresters in the near future.

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

1. 서론

전력품질의 향상 및 전력계통의 안정화를 위해 사용되는 피뢰기는 전압제한장치로서, 낙뢰 및 선로개폐에 의해 발생하는 이상 과전압으로부터 선로 및 전력기기를 보호할 목적으로 널리 사용되고 있다[1,2]. 이러한 피뢰기에 사용되는 ZnO 소자는 1960년대 말 일본에서 처음 개발된 이래 제조공정 및 첨가물에 관한 많은 연구가 행하여져 왔으며, 현재는 기존 제품의 동작개시전압 및 제한전압의 2배인 제 3세대 ZnO 소자가 개발되어 송전선로

및 GIS용 소자로 널리 사용되고 있다[3-5]. 그러나 국내의 ZnO 소자 기술은 선진국에 비해 크게 뒤떨어져 있으며, 현재 18 kV 배전선로용 피뢰기 소자의 경우 일부 업체에서 직접 제작하고 있다. 현재 세계적인 경향을 살펴보면, 소자를 직접 제작하는 업체들이 있는 반면, 소자를 제작하기 위해서는 초기의 높은 투자비와 개발의 어려움 그리고 개발 이후의 품질 관리 등의 많은 노력이 요구되기 때문에 소자를 수입하는 편이 더 경제적이다는 생각으로 소자 제작을 포기하는 업체들도 있다. 하지만 피뢰기 기술의 70~80 %가 ZnO 소자임을 고려해 볼 때, 국산 소자의 개발은 피뢰기의 국산화에 있어서 기술적 측면에서 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 중요한 과제임은 두 말할 필요가 없다.

본 논문에서는 ZnO 소자를 성형 높이를 변수로 일반적인 세라믹 공정을 통해 각각 제작하였으며, 이렇게 제작된 ZnO 소자는 공칭방전전류 10 kA,

1. 한국전기연구원 재료응용연구단

(경남 창원시 성주동 28-1)

2. 한전전력연구원 전력계통연구소

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

접수일자 : 2006. 8. 10

1차 심사 : 2006. 9. 30

심사완료 : 2006. 10. 24

선로방전등급 3등급의 소자에 적용되는 동작개시 전압, 제한전압 및 장시간 방전내량 특성 등을 조사하여 발변전소 피뢰기용 소자로의 응용 가능성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 ZnO 소자의 제작

표 1과 같은 원료 조성식에 의해 먼저 주원료 ZnO 및 Bi₂O₃, Sb₂O₃ 및 Co₃O₄ 등의 첨가물을 각각 칭량하였다. 칭량된 ZnO와 첨가물들은 각각 4시간 및 24시간 동안 불필을 행한 후, 다시 혼합하여 18시간 동안 불필하였다. 습식으로 분쇄 및 혼합된 원료 슬러리를 Spray Dryer에 의해 분무 건조하여 조립화하였다. 건조된 원료분말은 separator를 이용하여 입자 사이즈 150 μm 이하로 분급하였고, 이 후 성형압력 800 kg/cm²로, 높이를 각각 30.5~36 mm로 성형하였다. 성형된 ZnO block들은 터널 전기로에서 1차 및 2차 소성하였으며, 그 후 절연코팅, 연마 및 전극처리 과정을 통해 최종 ZnO 바리스터 소자로 제작되었다. 그림 1에 ZnO 소자의 제조공정도를 나타내었다.

2.2 ZnO 소자의 전기적 특성 시험

제작된 ZnO 소자의 전기적 특성을 평가하기 위해 동작개시전압, 제한전압 및 장시간 방전내량 시험을 시행하였다. 먼저 동작개시전압은 DC 1mA가 흐를 때 소자에 인가되는 전압으로 측정하였으며, 제한전압은 공칭방전전류인 10 kA에서 8/20 μs의 파형에서 측정하였다. 한편 장시간 방전내량 시험은 일반적으로 공칭방전전류 2.5 kA 및 5 kA인 ZnO 소자의 경우는 시험전류 및 인가시간이 규격에 규정되어 있으나, 공칭방전전류 10 kA 이상의 중책무용 소자에 대해서는 ZnO 소자에 유입되는 에너지를 식 (1)에 의해서 계산한 후 계산된 에너지 이상을 소자에 3회 6군으로 총 18회 인가하도록 규정하고 있다.

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

여기서, U_{res}는 낮은 전류에서 측정한 개폐충격제한 전압 측정치이며, 그 외 파라미터들은 표 2와 같이 규격에 명시되어 있다[6]. 한편 전기적 특성 시험을 위해 시험기에 장착된 ZnO 소자의 사진을 그림 2에 나타내었다.

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 |

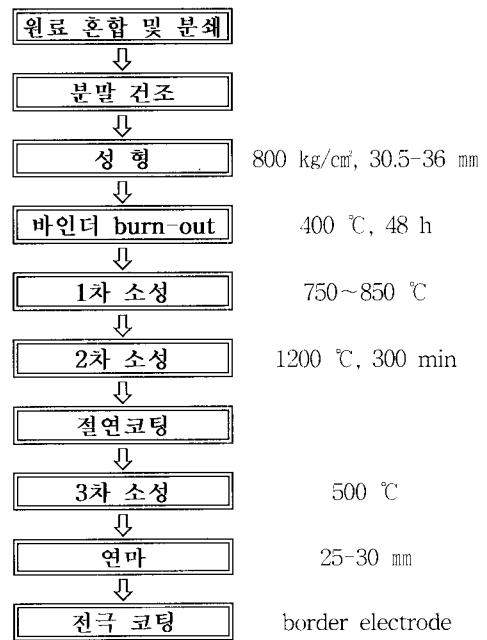


그림 1. ZnO 소자의 제조공정도.

Fig. 1. Manufacturing process of ZnO blocks.

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 파고 지속 시간 T(μs) | 2400 |
| 충전전압 U _i (kV _{ac}) | 2.8 U _r |

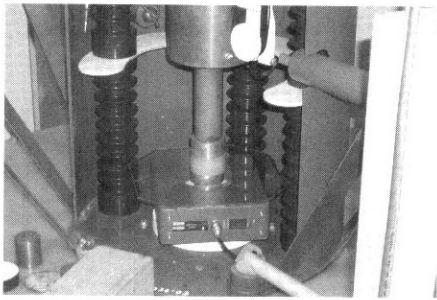


그림 2. 제한전압 시험 중의 ZnO 소자 사진.
Fig. 2. Photograph of ZnO block during test.

3. 결과 및 고찰

제작된 ZnO 소자의 전기적 특성을 관찰하기에 앞서, ZnO 소자의 소성전과 전극 처리후의 직경과 높이 변화 및 밀도를 표 3에 나타내었다. 성형공정에서 각각 30.5~36 mm로 제작된 ZnO block들은 전극처리 후 각각 25~30 mm로 1 mm간격으로 5종류가 제작되었다. 일반적으로 발변전용 피뢰기와 같이 고압 피뢰기에 사용되는 ZnO 소자는 전기적인 측면에서 보다 가혹한 규격시험이 적용된다. 이와 같은 시험을 만족하기 위해서는 ZnO 소자의 직경을 증가시켜 에너지 내량을 증대하는 것이 일반적인 방법이다. 이처럼 ZnO 소자의 직경이 증가함에 따라 제조공정에 보다 영향 받기 쉬운 상태가 되기 때문에 공정상에 세심한 주의가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 성형높이에 따른 소자의 특성변화를 살펴보기 위해 각기 다른 성형높이로 소자를 제작하였다. 표 3과 같이 A 소자를 제외하고는 소자의 높이에 관계없이 소성후의 직경은 모두 일치하였다. 또한 제작된 ZnO 소자의 밀도는 대체로 5.4이상으로 이론밀도가 5.6~5.8인 것을 고려해 보면, 우수한 치밀성을 나타내었으며, 27 mm 소자에서 5.49의 가장 높은 밀도를 나타내었다. 한편 그림 3에는 A-1 및 A-2 소자의 전극면을 나타내었는데, 본 연구에서 제작된 ZnO 소자들은 임의로 제작된 전극 증착층에서 전극 처리 공정을 시행함으로써 인해 균일하지 못한 전극형상을 나타내었다. 일반적으로 전극의 역할은 ZnO 소자에 유입되는 전류를 표면에서 균일한 전류 밀도를 가지게 하는 것으로, 전극면의 형상에 따라 크게 full-face 전극과 border 전극으로 나눌 수 있는데, 전자의 경우는 소자의 전면에 전극처리를 한 것으로, 전극 edge와

표 3. ZnO 소자의 구조적 특성 변화.

Table 3. Structural characteristics of ZnO blocks.

| | | 소성 전 | | 전극처리 후 | | |
|---|---|------|------|--------|----|-------------------|
| | | 직경 | 높이 | 직경 | 높이 | 밀도 |
| | | mm | mm | mm | mm | g/cm ³ |
| A | 1 | 76.8 | 30.5 | 64.5 | 25 | 5.46 |
| | 2 | 76.8 | 30.5 | 64.5 | 25 | 5.45 |
| B | 1 | 76.8 | 31.5 | 65.0 | 26 | 5.48 |
| | 2 | 76.8 | 31.5 | 65.0 | 26 | 5.46 |
| C | 1 | 76.8 | 32.5 | 65.0 | 27 | 5.49 |
| | 2 | 76.8 | 32.5 | 65.0 | 27 | 5.49 |
| D | 1 | 76.8 | 33.6 | 65.0 | 28 | 5.42 |
| | 2 | 76.8 | 33.6 | 65.0 | 28 | 5.41 |
| E | 1 | 76.8 | 35 | 65.0 | 29 | 5.42 |
| | 2 | 76.8 | 35 | 65.0 | 29 | 5.42 |
| F | 1 | 76.8 | 36 | 65.0 | 30 | 5.46 |
| | 2 | 76.8 | 36 | 65.0 | 30 | 5.45 |

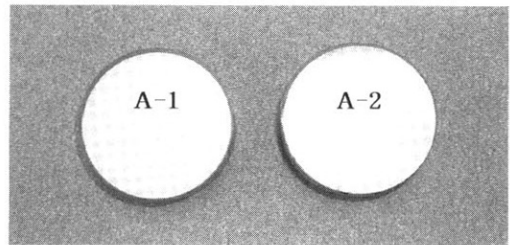


그림 3. 제작된 ZnO 소자의 전극 형상.

Fig. 3. Appearance of electrode of ZnO blocks.

소자의 edge 사이에 여유가 없는 것이며, 후자는 각각의 edge 사이에 수mm의 여유를 가지는 것이다. 전극 edge에 관한 Steven Boggs[7] 등의 연구논문에서 의하면, 전극 여유 제어는 재료 전체를 통해 더욱 균일한 전력 손실을 만듦으로서 재료내의 hot region을 감소시키는 것과 재료의 균일성을 향상시키는 것과 함께 ZnO 소자의 에너지 흡수 능력을 향상시키는 중요한 요소 가운데 하나임을 강조하고 있다. 또한 이 논문에서 의하면, 0.6 mm 이상의 여유에서는 전극 edge에서의 온도상승은 ZnO에서 과도한 온도상승을 유발하여 에너지 흡수 능력을

표 4. ZnO 소자의 전기적 특성.

Table 4. Electrical characteristics of ZnO blocks.

| | | V_{1kV} | V_{10kV} | $V_{1kV/mm}$ | $V_{10kV/mm}$ | 제한 전압비 |
|---|---|-----------|------------|--------------|---------------|--------|
| | | kV | kV | V | V | |
| A | 1 | 4.410 | 7.873 | 176.4 | 314.9 | 1.785 |
| | 2 | 4.450 | 연면섬락 | 178.0 | - | - |
| B | 1 | 4.520 | 7.385 | 173.8 | 284.0 | 1.634 |
| | 2 | 4.560 | 7.409 | 175.4 | 285.0 | 1.625 |
| C | 1 | 4.770 | 7.764 | 176.7 | 287.6 | 1.628 |
| | 2 | 4.760 | 7.889 | 176.3 | 292.2 | 1.657 |
| D | 1 | 4.940 | 8.022 | 176.4 | 286.5 | 1.624 |
| | 2 | 4.940 | 8.029 | 176.4 | 286.8 | 1.625 |
| E | 1 | 5.110 | 8.314 | 176.2 | 286.7 | 1.627 |
| | 2 | 5.120 | 8.338 | 176.6 | 278.5 | 1.629 |
| F | 1 | 5.220 | 8.474 | 174.0 | 282.5 | 1.623 |
| | 2 | 5.250 | 8.523 | 175.0 | 284.1 | 1.623 |

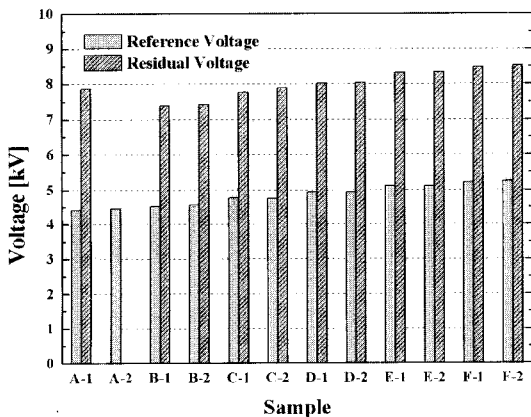


그림 4. ZnO 소자의 동작개시전압 및 제한전압.
Fig. 4. Reference and residual voltage of ZnO blocks.

저하시키고, 0.3 mm 이하에서는 외부표면을 가로지르는 breakdown의 가능성이 증가하므로, 0.3-0.6 mm가 최적상태라는 실험결과를 제시하였다. A-1 소자의 전극 edge 여유는 0.5-2.0 mm로 전극 형상은 물론 전극의 위치 또한 불균일하여 공정의 개선이 요구되었다.

한편 표 4에 제작된 ZnO 소자의 동작개시전압 및 제한전압 등의 전기적 특성을 나타내었으며, 그림 4에 소자 특성의 변화 경향을 쉽게 확인할 수 있도록 그래프로 나타내었다. 동작개시전압은 ZnO 소자의 높이에 의존하므로 소자의 높이가 25~30 mm로 증가함에 따라 4.410~5.250 kV로 증가하는 경향을 나타내었으며, 제한전압도 동일한 경향을 나타내었다. 보다 정확한 소자의 특성을 조사하기 위해 단위 두께당 동작개시전압과 제한전압을 조사하였으며, 이 값들은 제조사간의 소자의 특성을 비교하는데 중요한 자료가 된다.

표 4의 단위 두께당 동작개시전압과 제한전압을 조사한 결과에서는 동작개시전압은 176 V/mm 내외로 비슷한 값을 나타내었으나, 제한전압의 경우 전체적으로 큰 값의 변화는 없었지만, A-1 소자의 경우 다른 소자들에 비해 30 V 정도 높았으며 이로 인해 제한전압비가 가장 높은 1.785를 나타내었다. 이러한 결과는 앞서 살펴본 구조적 특성 경향과 일치하는 것으로 A 소자의 경우 높이가 낮아짐에 따라 동일한 소결공정에서도 전기적 특성의 저하를 나타내었다. 한편 일반적으로 피뢰기에 적용되는 ZnO 소자의 동작개시전압이 200 V/mm 내외인 것을 감안하면 제작된 소자의 단위 두께당 동작개시전압은 조금 낮은 것으로 생각되었으며, 제한전압비의 경우에는 1.6 정도로 상당히 우수한 특성을 나타내어 피뢰기에 적용시 보호레벨 저감이 가능할 것으로 판단되었다. 단위 두께당 제한전압 역시 단위 두께당 동작개시전압과 마찬가지로 A-1 소자를 제외한 모든 소자가 285 V/mm 정도의 값을 나타내었는데, 일반적으로 피뢰기에 소자를 적용할 때 소자의 단위 두께당 제한전압이 300~330 V/mm 정도 일 때가 피뢰기 하우징의 누설거리 등을 설계할 때 가장 알맞은 값을 고려해 보면, 단위 두께당 동작개시전압과 마찬가지로 약간의 상승이 요구되었다. 한편 A-2 소자의 경우에는 제한전압 시험 시 연면섬락 발생으로 파괴되었는데, 제한전압 시험은 대전류 충격 시험이나 장시간 방전내량 시험에 비해 소자에 투입되는 에너지량이 낮은 시험임에도 불구하고 이러한 현상이 나타난 것은 절연코팅 과정에서 결함이 발생했던 것으로 판단되었다. 일반적으로 동작개시전압과 제한전압 시험은 소자 제작업체에서는 전수 시험으로 시행되고 있으며, 이러한 초기 불량 소자들은 최종 제품에서 제외되게 된다.

제한전압시험이 완료된 ZnO 소자들 가운데에 상대적으로 응용 가능성이 높은 E와 F 소자에 한

표 5. ZnO 소자의 개폐서지 제한전압 및 유입되는 에너지.

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

| 시험 시료 | 250 A | 1000 A | 유입에너지 |
|-------|-------|--------|--------|
| | kV | kV | |
| E-1 | 6.593 | 7.037 | 11.790 |
| E-2 | 6.618 | 7.081 | 11.750 |
| F-1 | 6.718 | 7.195 | 11.583 |
| F-2 | 6.773 | 7.244 | 11.486 |

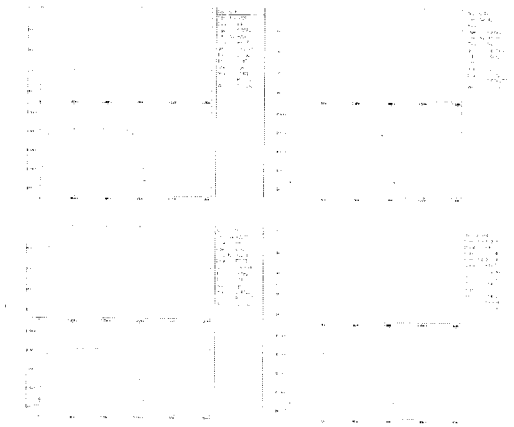


그림 5. 시간 방전내량 시험 파형.

Fig. 5. Wave shape of long duration current impulse withstand test.

해서 장시간 방전내량 시험을 시행하였다. 먼저 장시간 방전내량 시험에 앞서 소자에 유입되는 에너지를 계산하기 위해 40/100 μ s의 시험파형으로 250 A 및 1000 A에서 개폐서지 제한전압을 측정하였다. 이렇게 측정된 제한전압 값을 식 (1)에 대입하여 유입되는 에너지를 계산한 후, 계산된 에너지 이상인 12 kJ 정도의 에너지를 소자에 인가하였다. 표 5에 각각의 전류에서의 개폐서지 제한전압과 계산된 유입에너지를 나타내었으며, 그림 5에 시험 파형을 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 일반적으로 배전용 5 kA 피뢰기에 적용되는 전류가 과고전류 75 A, 지속시간 1,000 μ s인 비해 과고전류 600 A, 지속시간 2,400 μ s로 훨씬 높은 에너지가 적용된 것을 알 수 있다.

표 6. 장시간 방전내량 시험 전·후의 제한전압 변화.

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

| 시험 시료 | 시험전 | 시험후 | 변화량 | 비고 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | kV | kV | | |
| E-1 | 8.322 | 8.294 | -0.34 | 합격 |
| E-2 | 8.352 | - | - | 2회 파괴 |
| F-1 | 8.477 | - | - | 4회 파괴 |
| F-2 | 8.518 | 8.522 | 0.05 | 합격 |



그림 6. 장시간 방전내량 시험후의 파괴사진.

Fig. 6. Photograph of ZnO blocks after long duration current impulse withstand test.

한편 표 6에는 총 18회의 장시간 방전내량 시험 전·후의 제한전압 및 변화율을 나타내었는데, 변화율이 5 % 이하일 때 합격하게 된다. 본 연구에서 시험된 총 4개의 ZnO 소자 가운데 E-2와 F-1은 각각 2회와 4회에서 파괴되었으나, E-1과 F-2의 경우에는 시험 후에도 제한전압의 변화율이 0.5 % 이내로 양호한 특성을 나타내었다. 한편 장시간 방전내량 시험 후 파괴된 E-2 및 F-1의 외형사진을 그림 6에 나타내었는데, 사진에서와 같이 극부적인 과도한 열발생에 의해 puncture 현상이 발생하였으며, 소자는 결국 파괴되었다. 일반적으로 발전소 피뢰기에 적용되는 중책무용 ZnO 소자의 경우에는 배전선로용 피뢰기 소자에 비해 요구되는 사양이 보다 엄격하고 가혹하다[8]. 따라서 소자 제작업체에서는 낮은 사양 ZnO 소자의 제작방

범과 차별화를 두는게 일반적인데, 원료조성식조차도 차이를 두는 업체도 있지만, 일반적으로 제조공정에 보다 엄격한 관리를 하고 있다. 본 연구의 A 소자의 특성 저하 및 장시간 방전내량 시험에서도 나타났지만, 비록 같은 조건으로 제작된 소자라 할지라도 제작공정상의 미묘한 차이에 의해 양호한 특성을 나타내는 소자가 있는 반면, 특성이 미흡한 소자도 존재함으로 제조공정에서 그 편차를 줄여나가는 것이 무엇보다도 중요하다고 판단되었다. 이 후의 ZnO 소자 제작에 있어서는 높은 에너지 내량을 위해 보다 균일한 미세구조를 가지기 위한 제조공정의 개선이 필요할 것으로 생각되었으며, 전극처리 방법 또한 개선되어야 할 것으로 사료되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 고성능 산화아연소자를 제작하고, 그 성능을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- [1] ZnO 소자는 25~30 mm 두께로 각각 제작되었으며, 제작된 모든 소자의 밀도는 5.41~5.49 g/cm³으로 대체로 양호한 치밀성을 나타내었다.
- [2] 제작된 ZnO 소자는 두께가 증가함에 따라 동작개시전압은 4.410~5.250 kV로 증가하였으며, 제한전압은 A 소자를 제외한 모든 소자가 동작개시전압과 동일한 결과를 나타내었으며, 제한전압비는 1.6 정도로 우수한 특성을 나타내었다.
- [3] 단위 두께당 동작개시전압은 모든 소자에서 176 V 정도를 나타내었으며, 단위 두께당 제한전압은 A 소자를 제외하고는 모두 287 V 내외의 값을 나타내었다.
- [4] 장시간 방전내량 시험에서는 E-2 및 F-1 소자는 각각 2회와 4회에서 소자가 파괴되었으나, E-1과 F-2 소자는 시험 후에도 제한전압의 변화량이 0.5 % 이내로 양호한 특성을 나타내었다.

- [5] 본 연구에서 제작된 ZnO 소자의 성능을 조사한 결과에 의하면, ZnO 소자의 단위 두께당 동작개시전압을 25 V 정도 상승시키고, 전극처리 및 절연 코팅 공정을 개선하여 에너지 내량을 향상시킨다면 발변전소 피뢰기용 ZnO 소자로서 응용 가능성이 높을 것으로 판단되었다.

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] S. Shirakawa and S. Kojima, "Review of surge arresters for power systems and transition of their standards", T.IEEE Japan, Vol. 124-A, No. 8, p. 561, 2004.
- [4] T. Imai, T. Udagawa, H. Ando, Y. Tanno, Y. Kayano, and M. Kan, "Development of high gradient zinc oxide nonlinear resistors and their application to surge arresters", IEEE Trans. PWRD, Vol. 13, No. 4, p. 1182, 1998.
- [5] 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.
- [6] IEC 60099-4, Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 1998.
- [7] 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.
- [8] 조한구, 윤한수, 김석수, "초고압 피뢰기용 ZnO 소자의 장시간 방전내량 특성 평가", 전기전자 재료학회논문지, 19권, 4호, p. 398, 2006.