

# 토양의 지중방전에 따른 소형 침봉전극의 과도접지임피던스

(Transient Ground Impedance of Small-sized Needle-rod Electrodes due to Underground Soil Discharge)

이태형 · 조성철 · 임주홍 · 이복희

(Tae-Hyung Lee · Sung-Chul Cho · Ju-hong Eom · Bok-Hee Lee)

## Abstract

This paper deals with the transient ground impedance of small-sized needle-rod installed in a test field. Impulse voltage generator was used to inject lightning impulse on a ground electrode and modified fall-of-potential method was proposed to measure the high ground potential rise. Transient ground impedance was analysed with impedance curve and I-V curve as respects the resistivity of soil. Soil ionization near the ground electrode is activated in high resistivity soil and have an effect on the reduction of transient ground impedance significantly.

## 1. 서론

침봉전극은 일반적으로 지중방전을 촉진시켜 과도접지임피던스 특성을 개선하기 위한 형상을 가지고 있으며 국내의 여러 접지시공업체에서 고유의 전극구조를 설계하고 제작하여 판매하고 있다. 일반 봉전극도 전극의 끝단이 침예하여 전극 주위의 토양에 임계전계강도 이상이 되면 방전이 발생하나 침봉전극은 다수의 침예한 침들을 추가로 부착하여 지중방전을 보다 활성화 하려는 목적으로 제작되고 있다. 특히 전력회사나 피뢰용 접지를 시공하는 기업에서 오지나 산악지역의 전선로, 통신기지, 기타 낙뢰로부터 보호가 필요한 구조물에 이와 같은 침봉 또는 특수형 침부 접지봉을 사용하고 있기 때문에 본 논문에서는 침봉전극에 대하여 보다 세부적인 방전특성을 분석하기 위해 다양한 토양 조건을 설정하여 실험하였다.

## 2. 실험계 및 실험방법

### 2.1 실험계 구성

방전영역에서의 과도접지임피던스 측정을 위해 그림 1과 같이 실험계를 구성하였다. 과도접지임피던스 측정을 위한 전원장치로는 충전전압이 100 kV인 콘덴서 8개로 구성된 800 kV 급 임펄스 전압발생기를 사용하였다. 임펄스 전압발생기는 표준 뇌임펄스 파형인 1.2/50  $\mu$ s의 전압을 발생시키며 최대 충전에너지량은 60 kJ이다. 8단 구성은 토양의 종류에 따라 방전이 발생하는 임계전압에 따라 3~8단으로 구성이 가능하여 다양한

크기의 전압을 인가하기에 적합하다. 과도접지임피던스 분석을 위해서는 접지전극의 전위상승과 접지전극을 통하여 방류되는 전류를 측정하여야 하므로 800 kV 급 임펄스 측정에 적합한 분압기와 션트저항을 사용하였다. 분압기는 용량성 분압기이며 1.2/50  $\mu$ s의 뇌임펄스 전압에 대하여 1057.4:1의 분압비를 가진다. 또한 션트의 경우는 0.019  $\Omega$ 의 저항을 가지며 최대 측정전류는 25 kA이다.

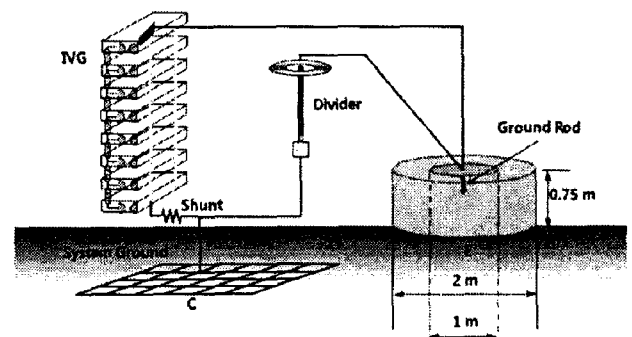


그림 1. 실험계 구성  
Fig. 1. Configuration of test set-up

또한 지중에 매설된 접지전극 주위의 방전특성 및 방전영역에서의 과도접지임피던스 분석을 위해 치환용 토양과 토양을 담을 수 있는 콘크리트 블럭조 시험장을 옥외에 구축하였다. 방전시험장은 직경 2 m 크기로 제작하였으며 외부 기상조건에 따라 원활한 배수가 이루어지도록 하였다.

## 2.2 실험에 사용된 전극 및 토양의 종류

실험에 사용된 토양의 종류는 총 3종이며 그림 2와 같다. 저항률이 낮은 경우에 대한 대표토양으로 갯벌토를 사용하였으며 실험에 사용된 갯벌토의 저항률은  $12 \Omega \cdot m$ 이다. 갯벌토는 입자가 매우 작아서 접지전극과의 접촉이 우수하고 수분을 포함하게 되면 점성이 있으며 저항률이 매우 낮은 특성을 보인다. 사토의 경우는 저항률은  $140 \Omega \cdot m$ 로 중간크기 정도이며 갯벌토에 비해 입자가 굵고 경질이며 접지전극과의 접촉성은 보통이다. 실험에 사용된 마사토의 경우는 비교적 굵은 풍화암석 부스러기로 이루어져 있어서 저항률이  $770 \Omega \cdot m$ 로 매우 크다. 일반적으로 국내 야산에서 흔히 볼 수 있는 토양의 종류로 접지전극과의 접촉도가 낮아서 소규모 접지전극의 경우에는 접지저항값이 매우 크게 측정되는 특성을 가진다.

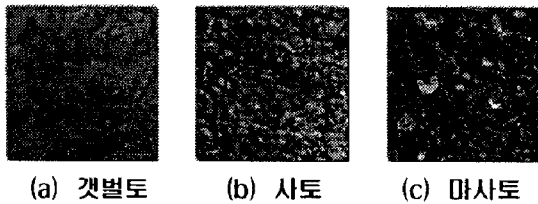


그림 2. 실험에 사용된 토양  
Fig. 2. Soil used in this research

실험에 사용된 침봉 접지전극은 지중방전 실험장의 크기를 고려하여 지름 12 mm, 길이 300 mm의 크기의 봉형 전극의 상부와 하부에 각각 4개의 침이 접속된 형태의 전극을 사용하였다. 봉전극에 침이 부착된 전극은 파괴설비용 접지전극에서 지중방전을 의도적으로 활성화시켜 방전 시 접지전위상승을 저감시키고자 적용한 전극으로 현재 국내의 파괴설비 시장에 유통되는 접지전극에서 규모만 축소된 형태이다.

## 2.3 실험방법

본 논문에서는 과도접지임피던스의 영역을 방전영역까지 확대하여 실험을 진행하기 때문에 간단하고 안정적인 측정계를 고안하였으며 그림 3에 나타내었다. 방전영역을 고려한 과도접지임피던스의 측정에는 높은 전압의 임펄스가 사용되게 되며 E극과 C극의 접지저항에 의해 인가전압이 분압된다. 높은 전압을 측정하는 분압기의 경우 대부분이 접지식 구조로 되어 있으며 임펄스 발생기와 같은 전위기준점을 가지도록 본딩되어 사용된다. 따라서 P극을 기준전위점으로 삼게 되면 P극의 기준전위와 임펄스 발생기의 기준전위인 C극의 전위가 서로 차이를 나타내어 측정시스템에 오류 또는 고장을 유발하게 된다. 이러한 이유로 비교적 측정전압이 낮은 임펄스 발생기는 비접지 방식으로 설계하여 사용하며 전위측정에서는 절연기능이 있는 차동프로브를 사용하

여야 정확한 측정과 측정시스템의 안전을 보장할 수 있다. 하지만 본 연구에 적용한 임펄스 발생기는 800 kV 급 접지방식으로 설계가 되어 있으며, 모든 측정시스템이 동일한 접지 상에서 등전위를 이루도록 본딩되어 있으므로 그림 3과 같이 2전극법을 적용하였다. 2전극법에서는 C극과 P극을 동일전극으로 사용하므로 전위측정용 분압기와 임펄스 발생기의 접지가 동일한 전위기준점에 접속되어 임펄스 고전압 측정이 매우 안정적으로 이루어진다. 단지 C극의 접지저항이 E극의 접지저항에 비해 충분히 작다는 조건을 만족하여야 하며 E극과 C극의 합성저항에 대한 C극의 접지저항 비에 해당하는 만큼의 오차를 항상 포함한다는 단점도 나타난다. 본 연구에서 적용한 접지전극 중 마사토 토양에 시설한 침봉전극의 경우 접지저항은  $4.3 k\Omega$ 이며, C극으로 사용된 시스템 접지저항은  $0.5 \Omega$ 이다. 이러한 조건에서는 2전극법의 적용에서 C극의 접지저항에 의한 오차요소는 거의 무시할 수 있는 수준이다.

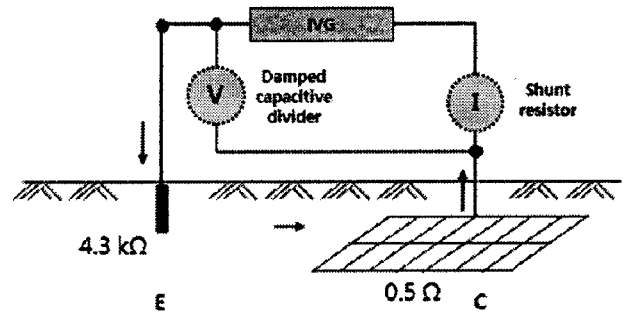


그림 3. 접지임피던스 측정방법  
Fig. 3. Measurement method of ground impedance

고전압 분압기 및 션트저항에서 측정된 전압과 전류 파형은 100 MS/s의 A/D 변환장치를 거쳐 PC 기반의 측정용 소프트웨어에 전송되며, 전압과 전류의 크기, 상승시간(rise time), 반치도달시간(time to half value) 등의 파라미터 분석이 이루어진다. 이후 데이터 파일로 저장되어 엑셀 등에서 세부적인 데이터 프로세스를 거친 후 Labview에서 작성한 전용 데이터 분석틀로 과도접지임피던스, I-V 곡선 등의 분석이 이루어진다.

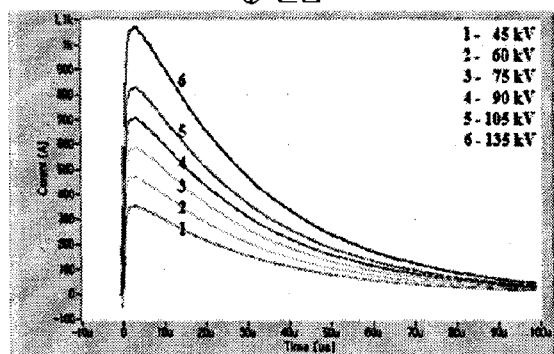
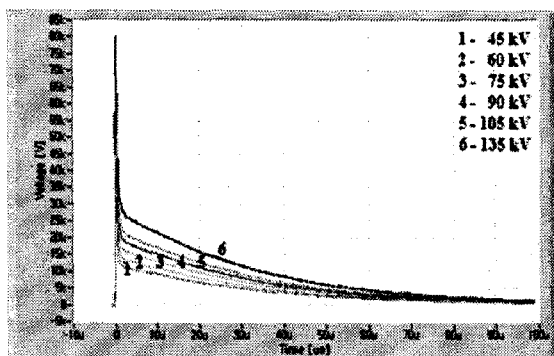
## 3. 결과 및 검토

### 3.1 측정전류와 접지전위상승 파형

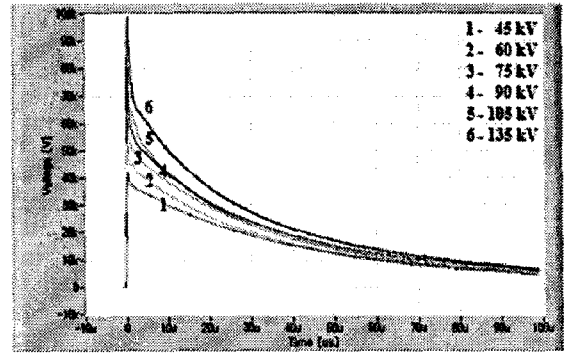
갯벌토 단일층에서는 전압파형의 피크가 135 kV의 인가전압에 대하여 약 80 kV로 측정되었으며, 이때의 방전전류는 1 070 A로 측정되었다. 2층 구조의 토양에서는 토양의 수분함량에 따라 상부 사토층의 저항률이  $140 \Omega \cdot m$  인 경우 135 kV의 인가전압에 대하여 접지전위 파형의 피크값은 약 100 kV로 측정되었으며, 전류는 약 730 A로 나타났다. 이 경우의 인가전압에 따른 전압과 전류파형을 분석한 그림 4 (b)의 전압파형을 분

석하면 인가전압이 105 kV 일 때 전압파형의 피크점 이후 값이 90 kV의 값 보다 더 작게 급감하는 구간이 발생하기 시작하였다. 이러한 현상은 지중에서 이온화 정도가 강해짐에 따라 저항률이 높은 사토의 영역에서 저항률이 낮은 갯벌토 영역으로 절연파괴가 발생하여 나타나는 것으로 분석할 수 있으며 전류파형에서도 피크값 이후 굴곡점을 가지고 감쇄함을 알 수 있다.

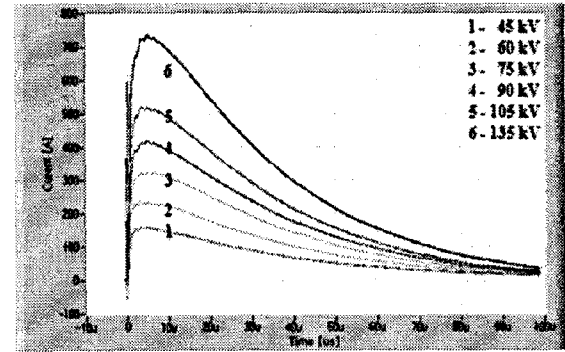
토양의 이온화에 의한 전압파형의 이상감소와 이에 따른 전류의 이상증가 현상은 2층 구조의 토양의 실험에서 대지의 저항률이 증가함에 따라 보다 뚜렷하게 나타났다. 이에 대하여 매우 높은 저항률을 가지는 토양에서의 방전특성에 대한 분석을 위해 수분함량이 3 %로 약 770  $\Omega \cdot m$ 의 저항률을 가지는 마사토 토양에서 인가전압을 520 kV까지 상승시키면서 전압과 전류파형을 측정된 결과를 그림 4 (c)에 나타내었다. 토양의 저항률이 커지면서 이온화가 발생하는 전압의 범위도 약 150 kV 이상으로 측정되었으며, 인가전압이 440, 520 kV에서 피크 이후 전압파형이 서로 다른 비율로 감소하는 구간이 나타남을 확인하였다. 전압파형의 변곡점은 지중에서 절연파괴 현상이 나타남으로 인하여 이온화 영역이 일순간에 확장되어 비방전 상태와는 다른 저항률 구간을 형성하는 현상으로 전류파형에서도 2차 피크를 확인할 수 있게 된다. 실제로 절연파괴가 발생하는 임계전압은 약 300 kV 내외이며 실험계의 높이를 고려하면 절연파괴 길이는 약 75 cm로 임계전계강도는 약 400 kV/m 정도로 추정할 수 있다.



(a) 갯벌토 ( $\rho = 12 \Omega \cdot m$ ,  $R = 29 \Omega$ )

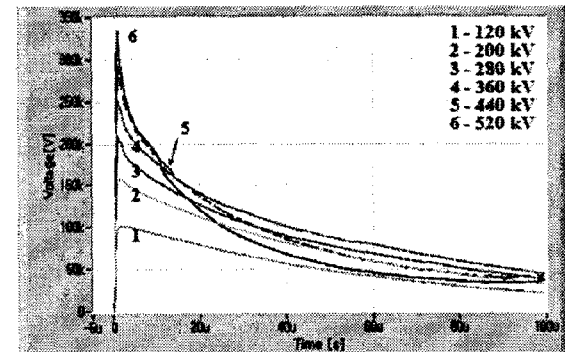


① 전압

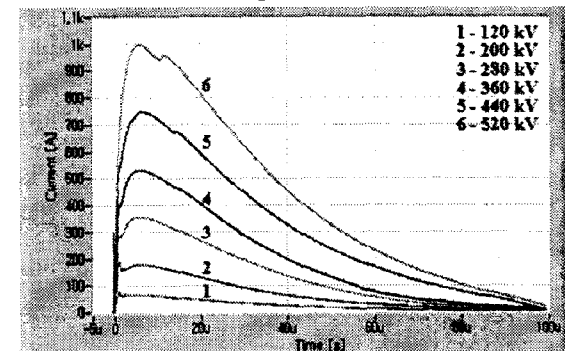


② 전류

(b) 갯벌토 ( $\rho = 12 \Omega \cdot m$ )와 사토 ( $\rho = 140 \Omega \cdot m$ )의 2층 구조 ( $R = 340 \Omega$ )



① 전압



② 전류

(c) 마사토 ( $\rho=770 \Omega \cdot m$ ,  $R=4.3 k\Omega$ )

그림 4. 측정된 침봉전극의 전압과 전류 파형  
Fig. 4. Voltage and current waveforms measured on the needle-rod electrode

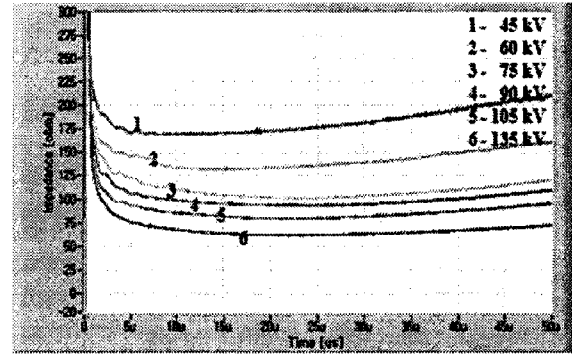
대지저항률에 따른 전압파형과 전류파형의 분석은 과도점지임피던스의 특성을 분석하는 주요 요소이며 특히 점지전위상승 파형에서의 큰 변곡점 구간은 지중에서

불꽃방전을 수반하는 절연파괴 현상이 수반되고 있음을 짐작할 수 있는 근거자료가 된다. 특히 전압과형의 급격한 감소는 동시에 전류파형의 제 2차 피크를 유발하게 되며 과도점지임피던스의 변동, 즉, 감소에 직접적인 영향을 줄 것으로 예상된다.

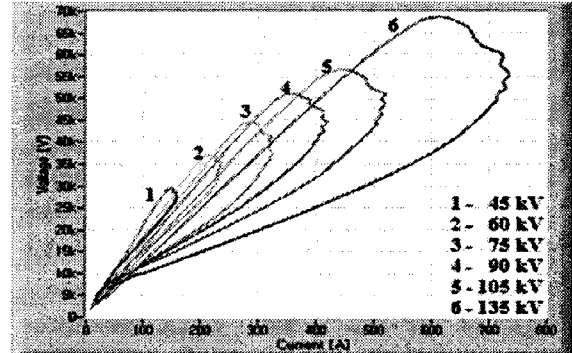
### 3.2 임피던스 곡선 및 I-V 곡선을 이용한 방전현상 분석

침봉전극에서 방전을 수반한 과도점지임피던스 분석을 위해 임피던스 곡선 및 I-V 곡선을 토양 종류에 따라 그림 5에 나타내었다. 저항률이 낮은 12 Ω·m의 갯벌토의 임피던스 곡선과 I-V 곡선은 저항률이 매우 낮아 전도전류가 크게 흐르는 조건에서는 침봉전극 주변에서 이온화 또는 지중 방전에 의한 추가적인 과도점지임피던스의 저감이 활발히 일어나지 않음을 보여주고 있다. 즉, 낮은 저항률 토양에서 토양의 이온화는 낮은 전압에서부터 진행되며 이온화 이전에 이미 큰 전도성 전류가 토양을 통해 방류되기 때문에 침봉전극의 효과가 임피던스 곡선이나 I-V 곡선에서 확연하게 드러나지 않는다.

저항률이 140 Ω·m의 상부 사토층과 12 Ω·m의 하부 갯벌토 2층 구조에서는 상부 사토층의 저항률이 커질수록 임피던스 곡선에서 초기 피크 이후에 시간의 흐름에 따라 안정화 되는 정도가 인가전압에 따라 점점 더 큰 차이를 보였으며, I-V 곡선에서도 전압과 전류의 상승부에서 기울기와 피크점을 지나 시계방향으로 회전 후 하강하는 부분의 기울기가 점점 더 크게 나타났다.

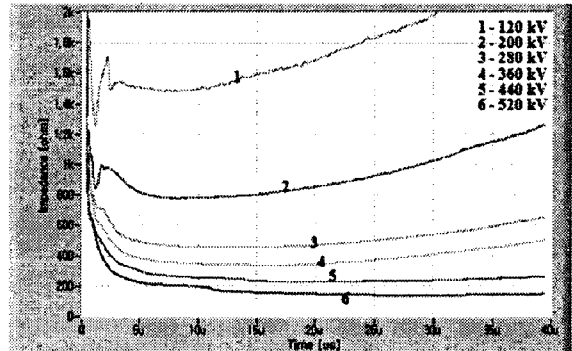


① 임피던스

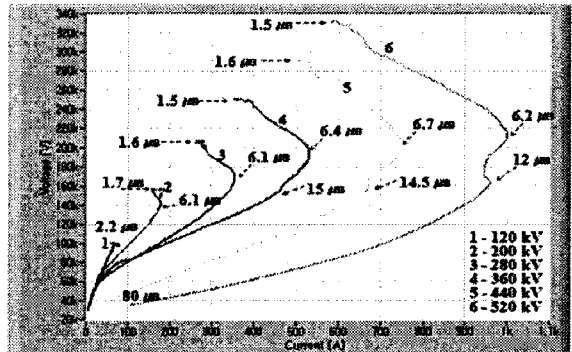


② I-V 곡선

(b) 갯벌토 ( $\rho = 12 \Omega \cdot m$ )와 사토 ( $\rho = 140 \Omega \cdot m$ )의 2층 구조 ( $R = 340 \Omega$ )

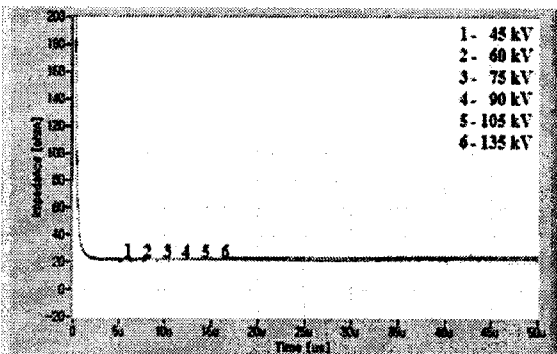


① 임피던스

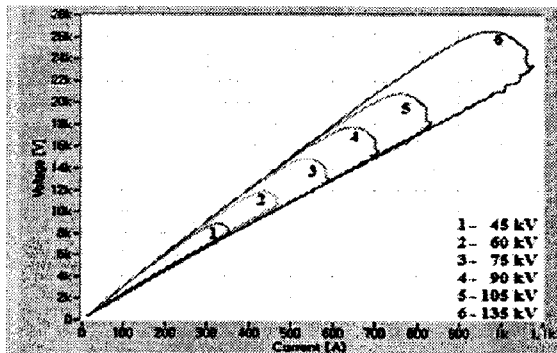


② I-V 곡선

(c) 마사토 ( $\rho=770 \Omega \cdot m$ ,  $R=4.3 k\Omega$ )



① 임피던스



② I-V 곡선

(a) 갯벌토 ( $\rho = 12 \Omega \cdot m$ ,  $R = 29 \Omega$ )

그림 5. 침봉전극의 임피던스와 I-V 곡선  
Fig. 5. Impedance and I-V curve of the needle-rod electrode

저항률이 커질수록 I-V 곡선에서 상승부의 기울기와 하강부의 기울기가 커지는 것은 토양에서 방전이 발생하는 정도와 인가전압이 상승함에 따라 불꽃방전이 수

반되어 불안정성이 커지기 때문이다. 불꽃방전을 수반한 토양의 이온화는 인가전압이 높아짐에 따라 점차 크게 임피던스 곡선의 하강에 영향을 주며 결과적으로 과도접지임피던스의 저감에 기여할 것으로 예상된다.

그림 5 (c)에 나타낸 저항률이 매우 큰 마사토 단일 구조 토양의 임피던스 곡선과 I-V 곡선은 접지전극 주위의 토양에서 발생하는 방전이 과도접지임피던스에 매우 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 임피던스 곡선에서 인가전압이 120 kV일 때와 인가전압이 점차 증가하여 520 kV가 되었을 때의 결과와는 매우 큰 차이를 보인다. 즉, 저항률이 매우 커서 단위 길이당 인가되는 전계장도가 매우 높아지게 되고 수분함량이 매우 작은 토양에서 큰 불꽃방전을 수반하는 토양의 이온화는 과도접지임피던스의 저감에 매우 큰 기여를 하고 있음을 알 수 있다. I-V 곡선에서도 초기 상승부에서 전압의 피크까지 상승하는 정도와 이후 전압의 피크에서 전류의 피크까지 시계방향으로 회전 후 감소하는 부분의 기울기 등이 매우 큰 차이를 보이며, 토양에서 불꽃방전을 수반하는 영역이 존재함에 따라 불꽃방전의 정도에 따라 전류를 기준으로 할 때 2차 피크를 형성하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 지중방전을 촉진시키기 위해 사용하는 침봉전극에 대해 실제 토양을 모의한 실험계에서 토양의 저항률에 따른 과도접지임피던스를 분석하였다. 실험결과 낮은 대지저항률을 가지는 토양에 비하여 높은 저항률을 가지는 토양이 이온화나 지중방전이 활발하게 나타났다. 상부층의 저항률이 높고 하부층이 낮은 2층 구조 토양에서는 접지전극 주위에서 발생하는 지중방전에 의해 과도접지임피던스가 상당부분 저감되었으며, 마사토와 같이 저항률이 큰 토양에서는 지중방전에 의한 저감효과가 매우 큼을 확인하였다. 침봉 전극은 이온화에 크게 기여하지 못하였으나 높은 대지저항률을 갖는 토양에서는 접지전극 주위에서 발생하는 방전으로 과도접지임피던스에 영향을 주는 것을 확인하였다.

본 연구는 지식경제부 자원에 의하여 한국전기안전공사(과제번호 : R-2007-1-014) 주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

[1] Meliopoulos AP, Moharam MG, Transient analysis of grounding systems. IEEE Trans Power Apparatus Syst 1983;102:389-399  
 [2] Grcev L, Dawalibi F, An electromagnetic model for transients in grounding systems, IEEE Trans Power Delivery 1990;5:1773-1781

[3] N. Fujimoto, E. P. Dick, S. A. Boggs and G. L. Ford, "Transient Ground Potential Rise in Gas-Insulated Substations-Experimental Studies", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-101, No.10, pp.3603~3609.  
 [4] S. Karaki, et al, "Transient Impedance of GIS Grounding Grid", IEEE Trans., Vol.PD-10, No.2, pp.723~738, 1995.  
 [5] Shozo Sekioka, et. al, "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp. 194~198, Jan. 2006  
 [6] J. H. Bogensperger, J. Frei and S. Pack, "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behavior", Proc. 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.6715-1~4, 1995.9.