

Soil Ionization Phenomena around a Hemispherical Electrode Stressed by Impulse Voltages

임펄스전압에 의한 반구형 전극계에서 토양의 이온화 현상

Dae-min Heo†, Hoe-gu Kim, Bok-hee Lee
허대민, 김회구, 이복희

High Voltage and Power Lab, Inha University, #253 Younhyun-Dong, Nam-Gu, Incheon, 402-751, Korea
†heo_123@nate.com

Abstract

The electrical characteristics of the soil where a ground electrode is buried vary with regions, seasons and environmental factors. Electrical discharge in the vicinity of the ground electrode will occur differently and significantly affect the performance of the grounding system. It is necessary to analyze discharge and ionization characteristics of soils when the grounding system is designed. The aims of this investigation are to understand correlation between the soil ionization and the transient ground impedance. This paper presents the experimental results on the soil ionization parameters and the transient ground resistance due to the soil ionization around a hemispherical ground electrode stressed by lightning impulse voltages.

접지전극이 매설되는 토양의 전기적 특성은 지역, 계절, 환경적 요인에 따라 저항률이 다양하게 변화한다. 접지전극 주변에서의 전기적 방전현상은 매우 다르게 발생하고, 이는 접지의 성능에 큰 영향을 미친다. 접지시스템의 설계 시에 다양한 조건에서 토양의 방전 특성과 이온화 현상에 관한 분석이 필요하다. 본 연구의 목적은 토양의 이온화 현상과 과도접지임피던스의 상관관계를 파악하는데 있다. 본 논문에서는 뇌임펄스전압에 의해 접지전극 주변에서 발생하는 토양의 이온화 작용과 관련된 파라미터와 과도적인 접지저항에 관한 실험적 연구결과를 기술하였다.

Keywords: Impulse Voltage, Ground Resistance, Soil Ionization, $V-I$ curve, $Z-t$ curve

I. 서론

접지전극에 뇌전류와 같은 서지전류가 유입하게 되면 접지전극 주변의 전위가 급격하게 상승하고, 이로 인해 인체의 안전과 각종 전기·전자기기들이 위협을 받게 된다. 뇌서지나 전자계에 의한 위험요소를 억제하기 위해서는 유입된 서지전류에 의한 전위상승이 저감되도록 접지저항을 낮추어야 한다. 뇌전류의 입사에 의해 접지전극의 전위가 상승하면 접지전극의 주변에서 토양의 이온화가 진전되어 접지저항이 낮아지기도 한다. 토양의 이온화에 따른 연구가 많이 이루어져 왔으나 체계성이 부족하고 실용화를 위해서는 아직 부족한 면이 많다 [1]-[5]. 따라서 강력한 서지전류가 유입될 가능성이 있는 접지전극시스템의 설계와 시공을 할 때 접지저항을 낮출 수 있는 토양의 이온화 현상 및 방전특성의 분석이 선행적으로 이루어지면 접지전극시스템의 과도적인 전기적 성능과 보호효과를 향상시킬 수 있으므로 이에 대한 심층적인 연구가 필요하다. 본 연구는 반구형 용기에서 토양의 이온화 현상을 분석하고, 실제로 접지전극을 매설할 때 토중방전 현상까지 고려한 접지전극시스템의 전기적 성능의 분석에 목적을 두었다.

본 논문에서는 표준 뇌임펄스전압을 이용하여 전압

의 극성과 크기에 따른 토중방전 현상을 파악하기 위해 토양이 담긴 반구형 용기와 반구형 접지전극 사이에서 발생하는 토양의 이온화현상과 과도적인 접지저항을 분석하였다. 표준 뇌임펄스전압을 가했을 때 접지전극을 통하여 흐르는 전류와 전위상승의 파형을 측정하고, 이를 기초로 하여 접지전극 주위에서 토양의 이온화에 따른 전기적 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 400 kV, 20 kJ의 용량을 갖는 Marx형 임펄스전압발생장치를 이용하여 접지전극에 전압을 가하였고 접지전극과 연결된 용량성 분압기를 전압을 측정하였으며, 방전전류는 CT를 이용하여 측정하였다. 전압과 방전전류는 500 MHz의 4 채널 오실로스코프를 사용하여 측정하였으며, Matlab 프로그램을 이용하여 $V-I$ 곡선과 $Z-t$ 곡선 및 이온화 반경을 산출하였다. 본 실험의 결과를 바탕으로 토양의 이온화 현상과 관련된 접지저항의 과도적인 변화를 집중적으로 분석하였으며, 토중에서 발생하는 절연과피특성에 대해서도 분석, 비교하였다.

II. 실험계 구성 및 실험방법

A. 실험계 구성

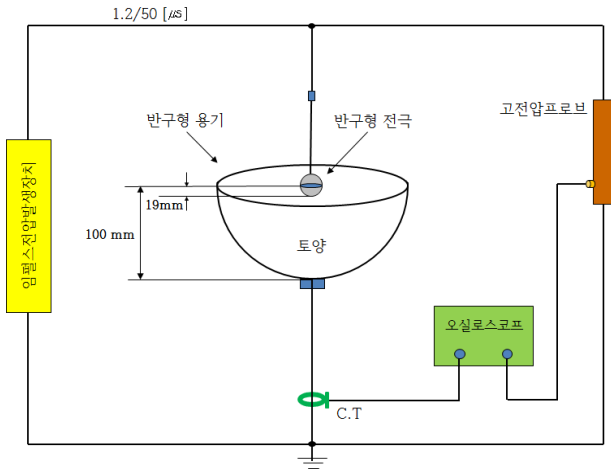
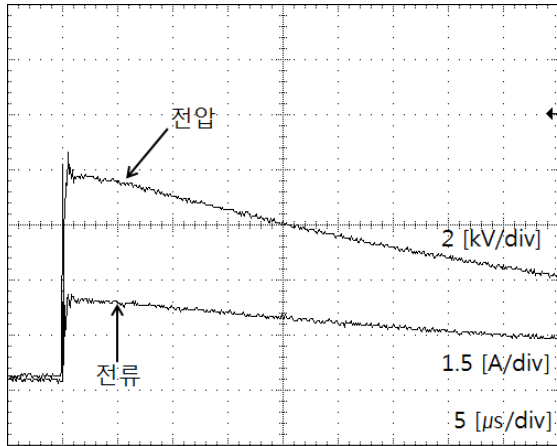
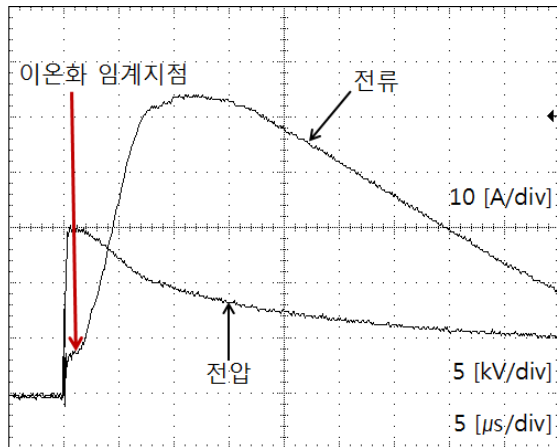


Fig. 1. 실험계의 계략도.



(a)



(b)

Fig. 2. 이온화 전과 후의 전압 및 전류 파형의 대표적인 예. (a) 이온화 전, (b) 이온화 후.

본 연구에서는 임펄스전압에 의해 접지전극 주변 토양에서 발생하는 토중방전 현상을 관찰하기 위해 Fig. 1과 같이 임펄스전압 발생장치, 전극계 및 전압과 전류 측정장치 등으로 이루어진 실험계를 구성하였다.

접지전극 주변의 전기 계산이 용이하도록 하기 위해 지름이 200 mm인 반구형 용기에 지름이 38 mm인 구형 금속전극을 설치하여 81 mm의 일정한 거리를 유지시켜 고정하였다. 접지전극을 모의한 금속 구형 전극은 임

펄스전압 발생장치의 출력단과 접속하여 토양에 반만 매설하였고, 용기는 접지와 연결하여 페루프를 형성하였다. 임펄스전압 발생장치의 출력단과 접지전극을 연결한 고압전선이 주위 다른 기기에 직접적으로 접촉하는 것을 방지하였다. 접지전극을 모의한 금속전극에 1.2/50 μ s의 표준 뇌임펄스전압을 공급하기 위하여 20 kJ, 400 kVp의 Marx형 임펄스전압 발생장치를 이용하였다. 전극에 공급되는 전압과 전류는 용량성 분압기와 CT로 측정하였다. 입력전압과 방전전류의 모든 파형은 500 MHz, 2.5 GS/s의 성능을 갖는 4채널 오실로스코프로 측정하였다.

B. 실험방법

뇌임펄스전압을 접지전극을 모의한 금속전극에 공급했을 때 발생하는 토중방전 현상을 관찰하기 위해서 대지를 모의한 반구형 용기에 토양을 채웠다. 시료토양으로는 저항률이 347 $\Omega \cdot$ m인 모래를 사용하였고 수분함유량을 일정하게 유지시켰으며, 수분의 증발에 따른 오차를 최소화하기 위해 신속히 실험을 진행하였다.

Marx형 임펄스전압발생장치를 사용하여 각각의 토양에 매설된 전극에 전압 7 kV에서 25 kV까지 상승시키며 전압과 전류 파형을 측정하였다. 이 때, 토양의 이온화 현상과 절연과괴 특성을 분리하여 측정하였으며 이온화 임계전압, 절연과괴 전압, 방전지연시간 등의 파라미터를 분석하였다. 접지전극의 전위는 분압기를 이용하여 10,000:1의 비율로 축소하여 측정하였고, 방전전류는 0.1 V/A의 변류기를 사용하여 측정하였다. 측정 후 데이터의 분석은 Matlab 프로그램을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

A. 토양의 이온화 파라미터

반구형 용기에 담긴 토양에 가해지는 임펄스전압의 크기를 증가시키면서 전압 및 전류 파형을 측정할 수 있다. 낮은 전압에서는 Fig. 2(a)와 같이 전압과 전류파형의 피크점이 동일한 선형적인 관계를 관찰할 수 있다. 이온화 임계전압 이상의 높은 전압에서는 Fig. 2(b)와 같이 전압과 전류파형의 피크점이 다른 비선형적인 양상이 관찰되었다.

본 논문에서는 토양의 이온화를 전압과 전류파형을 기반으로 분류하였으며 이온화 전과 이온화 후로 나누어 분석하였다. 이온화 전에는 수분과 토양의 저항성 성분이 주로 작용하지만 이온화 후에는 저항성 성분 이외에도 이온화 성장이 발생하여 전류파형에서 두 개의 피크전류가 관찰되었다.

토양에 이온화 임계전계 이상의 전압을 가할 때 나타는 이온화 현상의 대표적인 전압과 전류 파형을 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 토양의 비선형 특성을 두 번째 피크전류가 관찰될 때 발생된다고 표현된다. 토양의 이온화 현상으로 인해 전위가 감소됨에 따라 전류가 급격하게 상승하여 결국 토양의 저항이 감소하는 현상이 나타나게 된다. 두 개의 피크전류는 열적 효과와 이온화 과정에 의해 기인된다고 판단된다 [6].

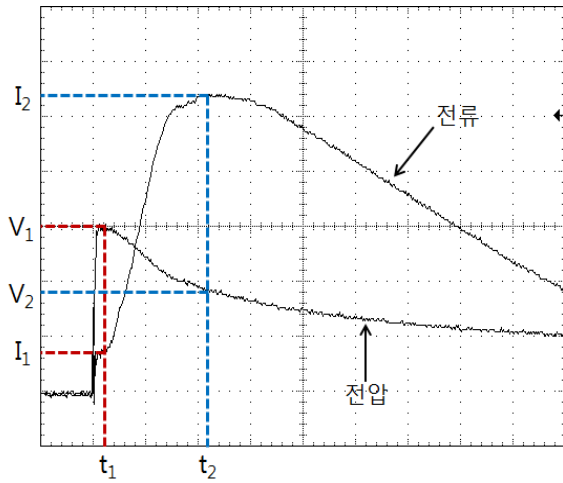


Fig. 3. 토양의 이온화에 따른 전압 및 전류 파형 파라미터의 정의.

Fig. 3의 파형은 전압이 가해져 이온화가 일어나기 이전까지의 첫 번째 구간과 이온화가 일어난 이후의 두 번째 구간으로 나눌 수 있다. 이온화 임계전압 이상의 임펄스전압이 접지전극에 가해질 때, 스트리머는 반구형 접지전극의 표면에서 시작하여 토양 매질을 통과해 반구형 시험 용기를 향해 진전해간다. 두 번째 피크전류는 이러한 스트리머의 발생으로 인해 형성된다. 전류 파형에서 변곡점 t_1 을 기준으로 t_1 은 이온화 개시시간, t_2 는 이온화전류 피크시간으로 정의하였다. 이온화 전 토양의 전기저항 R_1 은 시간 t_1 에서의 저항으로 정의하며, 이온화 후 토양의 전기저항 R_2 는 시간 t_2 에서의 저항으로 정의하였다. t_1 에서의 I_1 과 V_1 을 이용하여 이온화 전 토양의 전기저항 R_1 과 t_2 에서의 I_2 와 V_2 를 이용하여 이온화 후 토양의 전기저항 R_2 를 산출하였다.

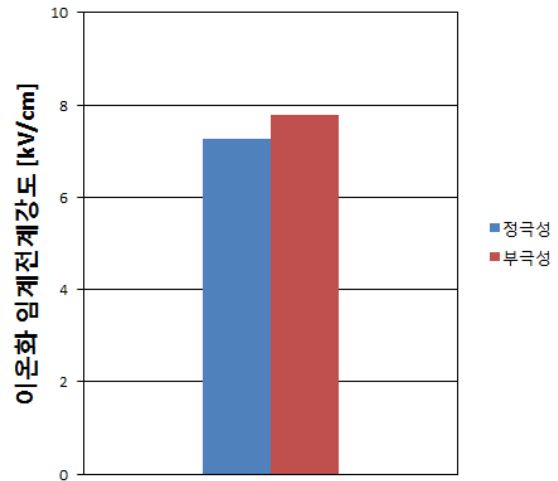
임펄스전압을 가하여 접지전극에 전류가 흐르면 접지전극 주변에 전계가 형성된다. 만약, 접지전극 표면의 전계가 절연파괴 임계전계보다 더 크면 접지전극 주변의 토양에 방전현상이 발생하게 된다. 방전현상은 Eq. 1과 같이 전류밀도 J_c A/m²가 가장 큰 표면으로부터 시작되어 전류밀도가 임계값보다 작은 범위까지 연속적으로 도달하였다가 사라진다.

$$E_c = \rho \cdot J_c \quad [v/m] \quad (1)$$

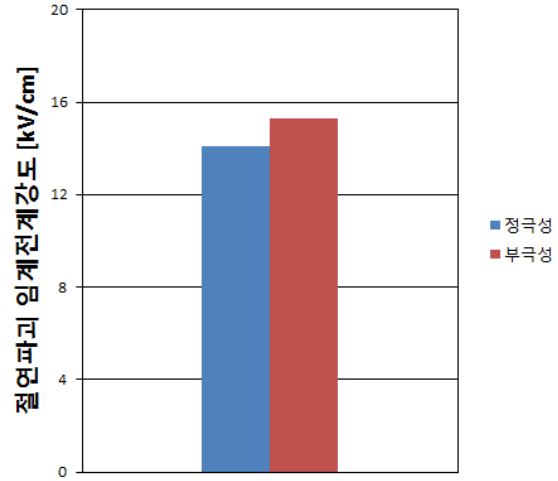
토양의 절연파괴가 일어나는 임계전계의 크기를 구하기 위해서 KS C IEC 60060을 기반으로 입력전압을 1 kV씩 바꾸어가며 승강법을 이용하여 임펄스전압을 10회씩 가하여 절연파괴전압을 측정하였다 [7]. 또한 이온화 임계전계강도 E_c 는 반구형 실험 장치에서 다음과 같이 전극 표면에서 전계강도의 산출식을 이용하여 계산하였다 [8][9].

$$E(r_1) = \frac{V_c}{r_1^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad [V/m] \quad (2)$$

- r_1 : 반구형 접지전극의 반경 [m]
- r_2 : 반구형 실험용기의 반경 [m]
- V_c : 이온화 임계전압 [V]



(a)



(b)

Fig. 4. 토양의 이온화 및 절연파괴 임계전계강도(E_c). (a) 이온화 임계전계강도. (b) 절연파괴 임계전계강도

을 나타낸다. 토양 내부에서 이온화 반경을 측정하기가 어렵기 때문에 이온화 영역을 반구형 접지전극으로 가정하여 이온화 반경을 계산하였다.

B. 토양의 이온화 특성

1) 이온화 임계전계강도

Fig. 4는 정극성과 부극성에서 토양의 이온화 및 절연파괴 임계전계강도를 나타낸다. 임계전압은 측정된 전압과 전류 파형을 이용하여 결정하였다. 정극성에서 토양의 이온화 임계전계강도는 7.27 kV/cm이고, 부극성에서 토양의 이온화 임계전계강도는 7.79 kV/cm이다. 토양의 절연파괴 임계전계강도는 정극성에서 14.11 kV/cm이고, 부극성에서 15.28 kV/cm로 나타났다. 이온화 및 절연파괴의 임계전계강도는 부극성에 비해 정극성에서 더 낮게 관찰되었다.

2) 이온화 전과 후의 전기저항

접지시스템의 과도 접지저항은 과도 전압에 의해 발생하는 토양의 이온화 과정과 관련되어 있다. Fig. 3에

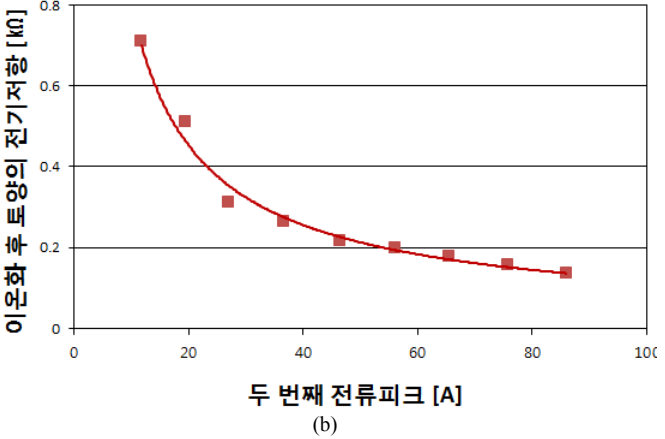
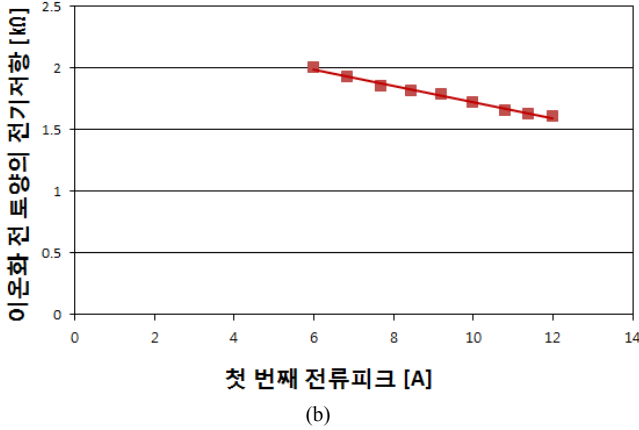
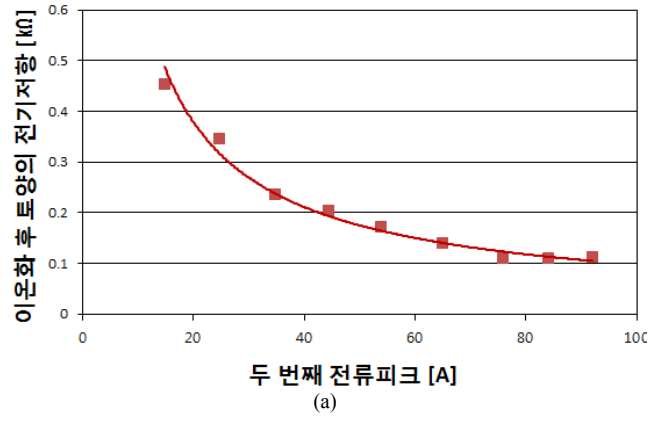
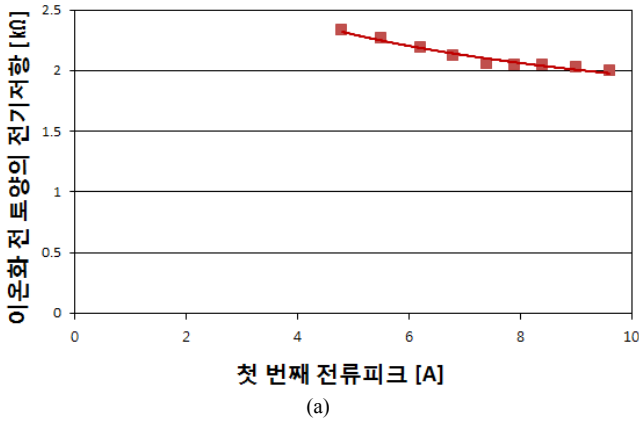


Fig. 5. 전류크기에 따른 이온화 전 토양의 전기저항. (a) 정극성. (b) 부극성

Fig. 6. 전류크기에 따른 이온화 후 토양의 전기저항. (a) 정극성. (b) 부극성

서 토양이온화에 의해 두 개의 피크전류가 발생함을 확인할 수 있다. 두 개의 피크전류의 존재는 이온화 전 전기저항 R_1 과 이온화 후 전기저항 R_2 로 구별되는 두 저항을 나타낼 수 있다. 이온화 전 전기저항 R_1 은 첫 번째 피크전류와 이온화 후 전기저항 R_2 는 두 번째 피크전류와 관련이 있다. 이 두 저항은 전류가 피크일 때의 전압과 피크전류를 이용하여 다음과 같이 산출된다.[8]

$$R_1 = \frac{V(I_{peak1})}{I_{peak1}} \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{V(I_{peak2})}{I_{peak2}} \quad [\Omega] \quad (4)$$

I_{peak1} : 첫 번째 피크전류 [A]

I_{peak2} : 두 번째 피크전류 [A]

V : 피크전류에 상응하는 순간의 전압 [V]

을 나타낸다. 피크전류에는 $di/dt=0$ 이기 때문에 이 수식에서 유도효과는 무시할 수 있다.

토양에 절연파괴가 일어나기 전까지의 전압을 공급하여 피크전류에 따른 이온화 전 전기저항 R_1 과 이온화 후 전기저항 R_2 가 관찰되었다. Fig. 5는 정극성과 부극성에서의 피크전류에 따른 이온화 전 전기저항 R_1 을 나타낸다. 이온화 전 전기저항 R_1 은 토양이온화가 나타나지

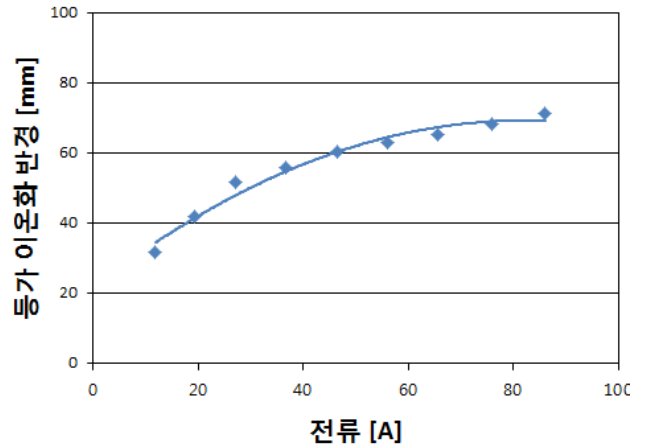


Fig. 7. 전류크기에 따른 등가이온화반경.

않기 때문에 전류크기에 따라 미세한 감소가 있지만 거의 변화가 나타나지 않는다고 볼 수 있다. 이온화 전에는 수분에 의한 저항성 전도전류만이 가장 큰 영향을 미치기 때문에 전류의 크기가 정상상태의 접지저항에 영향을 끼치지 못했다. 전압의 증가에 따라 전기저항은 선형적으로 약간 감소하는 양상을 나타내었다. 이는 수분의 증발이 없다고 가정한다면, 공급되는 전압이 증가함에 따라 이온의 증가된 이동성으로 인해 저항률을 감

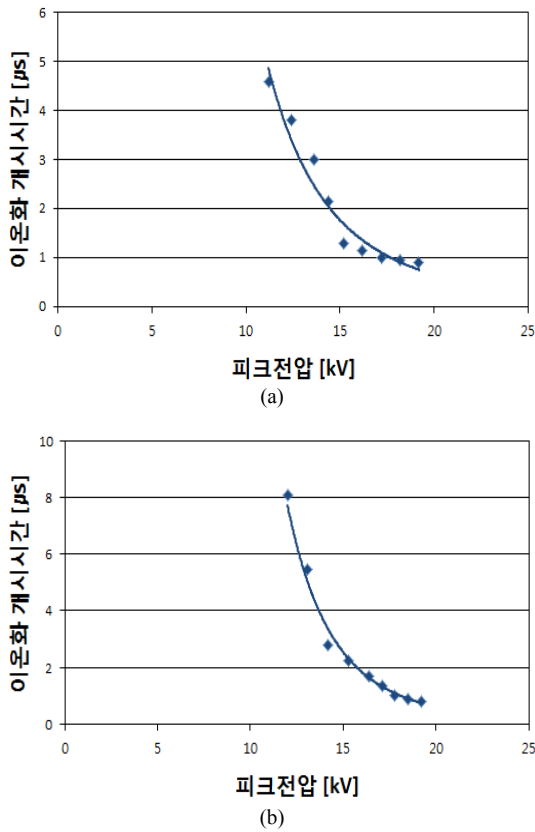


Fig. 8. 입력전압에 따른 이온화 개시시간. (a) 정극성. (b) 부극성.

소시키는 원인으로 판단된다.

이온화 전 토양의 전기저항과는 달리 이온화 후 토양의 전기저항은 Fig. 6와 같이 전류크기가 증가함에 따라 전기저항이 급격하게 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 전류 크기가 증가함에 따라 저항이 감소하는 대표적인 이유는 토양의 이온화 현상 때문이라고 할 수 있다. 토양이온화로 인해 수분에 의한 저항성 전도전류 이외에도 임계전계강도 이상의 전계가 가해지면 토양입자 내부 공극의 이온화로 인해 이온화전류가 흐르게 된다. 입력전압이 증가할수록 이온화전류가 급격하게 증가되므로 전기저항이 감소하게 된다. 사실상 토양의 이온화에 의해 유효 접지전극의 반경이 확장되고, 그 결과 접지전극 주변 토양의 전기저항이 감소하게 된다. 전류크기가 증가함에 따라 이온화 후의 저항이 감소하다가 어느 정도의 최대 전류크기에 도달하면 포화되어 더 이상의 저항의 감소폭이 둔화되는 것을 확인할 수 있다. 이온화 후의 저항은 부극성에서도 정극성과 마찬가지로 거의 비슷한 경향으로 관찰되었고, 저항의 크기도 비슷하게 나타났다. 두 극성 모두 R_2 의 값이 R_1 의 값보다 항상 작게 나타났다.

반구형 접지전극에서의 접지저항은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [\Omega] \quad (5)$$

r_1 : 반구형 접지전극의 반경 [m]

r_2 : 반구형 용기의 반경 [m]

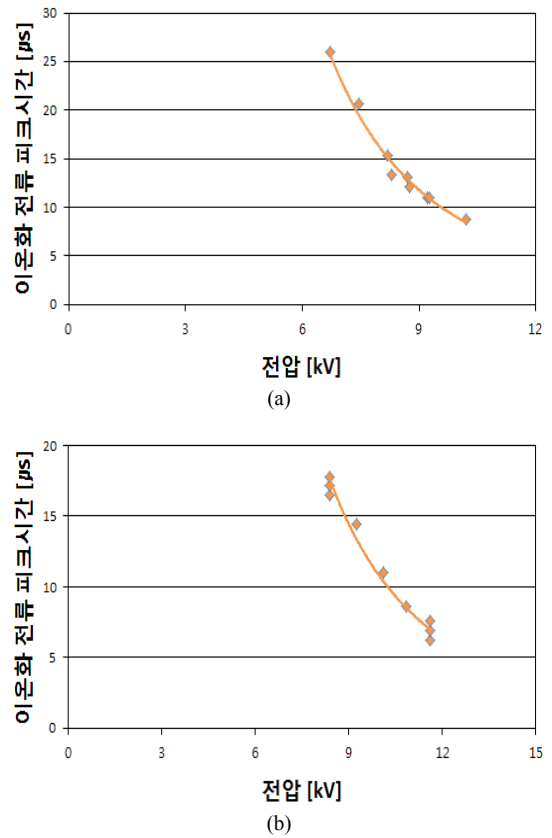


Fig. 9. 입력전압에 따른 이온화 전류피크까지의 시간. (a) 정극성. (b) 부극성.

ρ : 정상상태의 토양저항률 [$\Omega \cdot m$]

을 나타낸다. 이 조건에서 토양저항률은 이온화 전 전기저항을 이용하여 산출하였다.

$$\rho = 2\pi R_1 \left(\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \right) \quad [\Omega \cdot m] \quad (6)$$

이온화 후 전기저항 R_2 는 토양이온화 영역의 증가와 이온화 영역의 저항률의 변화와 밀접하게 관련된다. 두 번째 피크전류는 접지전극의 표면에서 스트리머의 발생으로 생기게 되고, 스트리머가 발생하는 영역의 토양 저항률은 거의 0까지 떨어지게 된다. 이온화 후 전기저항 R_2 는 토양 이온화 영역의 확장에 의해 설명될 수 있다. 이온화 영역이 균등하게 확장된다고 가정하면 등가이온화 반경은 다음 수식과 같이 이온화 후 전기저항 R_2 를 이용하여 계산할 수 있다.

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [\Omega] \quad (7)$$

r_i : 등가이온화 반경 [m]

을 나타낸다. 이 조건에서 등가이온화 반경은 이온화 후 저항을 이용하여 산출하였다.

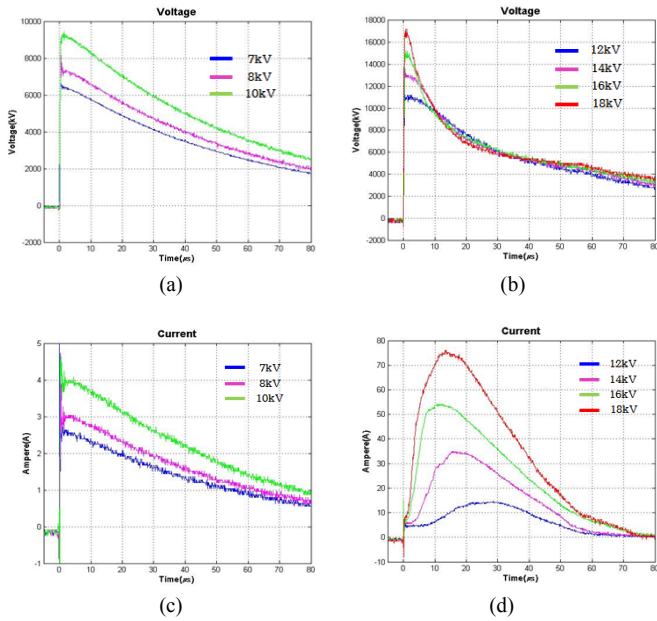


Fig. 10. 입력전압에 따른 전압과 전류 파형. (a) 이온화 전 전압파형. (b) 이온화 후 전압파형. (c) 이온화 전 전류파. (d) 이온화 후 전류파형.

$$r_i = \frac{\rho r_2}{2\pi r_2 R_2 + \rho} \quad [m] \quad (8)$$

측정된 토양의 등가이온화 반경을 Fig. 7에 나타내었다. 이 분석에서는 토양의 이온화가 반구형 접지전극 표면에서 균등하게 발생된다고 가정하였다. 그러나 전계는 매설된 반구형 접지전극 표면과 입자 사이의 공간에 집중되며, 그곳에서 이온화가 시작되어 반대편 전극으로 향하게 된다. 전류 크기가 증가할수록 이온화 반경이 확장됨을 알 수 있다. 또한 반구형 용기의 반지름이 100 mm인데, 이온화반경이 약 71 mm까지 확장되는 것을 볼 수 있다. 이는 실험용기에 비해 상대적으로 큰 접지전극 (지름 38 mm)이 사용되었기에 나타난 현상으로 판단된다. 접지전극에 비해 큰 용기가 사용된다면 이온화 반경이 용기의 크기만큼이나 확장되는 않을 것이다.

3) 이온화 개시시간

토양의 이온화 현상으로 인해 Fig. 3와 같이 두 개의 피크전류가 나타남에 따라 전압을 증가시키면서 토양의 전압과 전류 파형을 이용하여 이온화 개시시간(지연시간) t_1 과 이온화전류 피크시간 t_2 를 분석하였다. Fig. 8은 전압의 크기에 따른 이온화 개시시간 t_1 을 나타내었다. 정극성에서 전압크기가 증가함에 따라 이온화 개시시간은 빠르게 감소하다가 일정한 전압크기가 되면 약 1 μ s에서 더 이상 감소되지 않았다. 부극성에서도 정극성과 마찬가지로 공급전압이 증가함에 따라 이온화 개시시간이 감소하였다. 동일한 낮은 전압에서 부극성의 이온화 개시시간이 정극성에 비해 훨씬 더 지연되었으나 높은 전압에서는 정극성의 이온화 개시시간과 비슷하게 나타났다.

이온화가 시작되어 전류가 최고점에 도달하는 이온화 전류피크까지의 시간 t_2 는 Fig. 9과 같이 전압이 증가

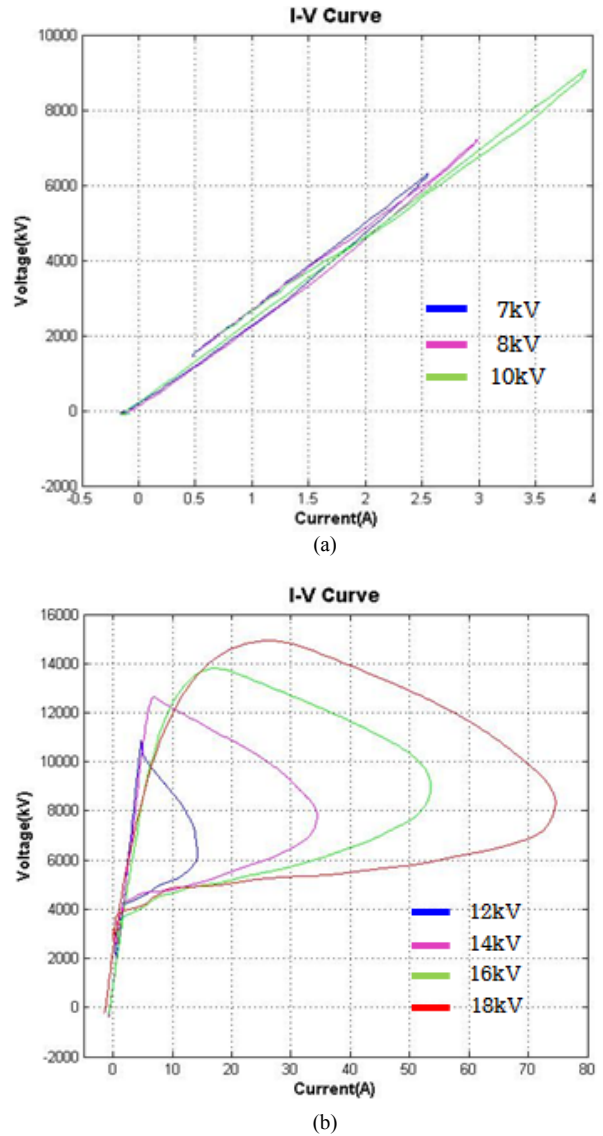
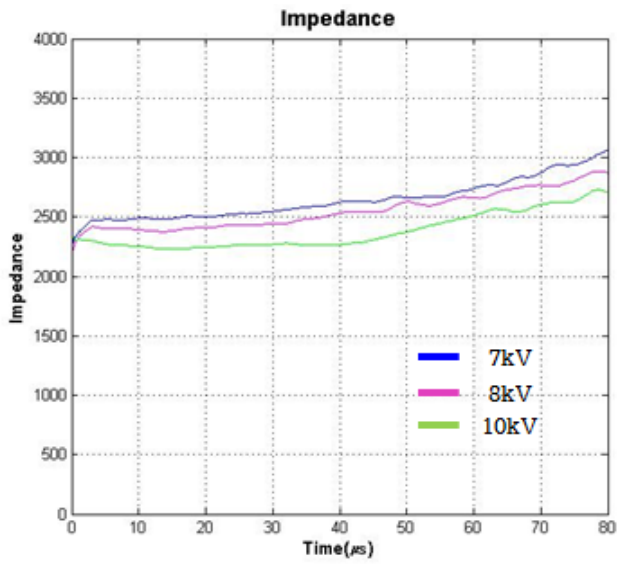


Fig. 11. 입력전압에 따른 I-V 곡선. (a) 이온화 전 I-V 곡선. (b) 이온화 후 I-V 곡선.

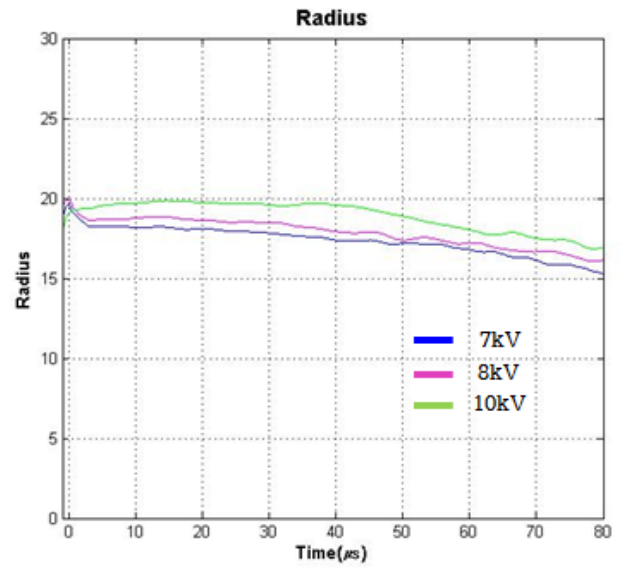
함에 따라 감소하게 나타났다. 이온화 전류피크까지의 시간도 이온화 개시시간처럼 부극성이 정극성에 비해 시간이 더 지연되는 것을 확인할 수 있다. 이는 부극성과 정극성의 방전 메커니즘이 다르기 때문에 차이가 나타난 것으로 판단된다. 결과적으로 이온화에 의한 두 지연시간과 진전과정이 전압크기에 의해 영향을 받는 것을 확인하였다.

4) 전압의 크기에 따른 전기적 특성 분석

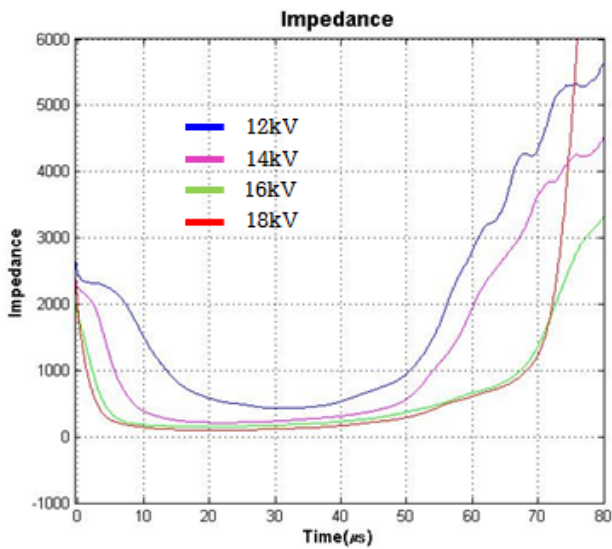
임펄스전압 발생장치를 이용하여 7kV에서 절연과파가 일어나기 전까지 전압을 접지전극에 공급한 때, 오실로스코프를 이용하여 전압과 전류 파형을 측정하였다. 측정된 파형으로 Matlab 프로그램을 이용하여 이온화 특성을 분석하였다. Fig. 10은 입력전압의 크기에 따른 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 이온화가 발생하는 평균 임계전압은 12 kV이고, 절연과파가 발생하는 평균 임계전압은 21.7 kV로 나타났다. 10 kV의 입력전압에서는 이온화 임계전압 이하의 전압이므로 토양의 이온화가 발생하지



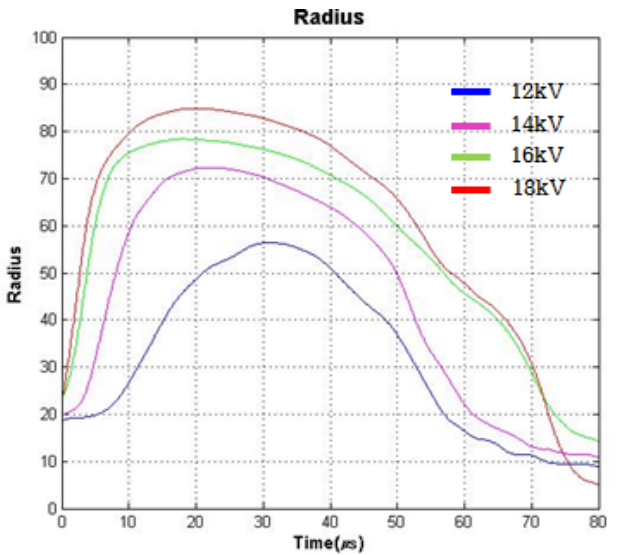
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 12. 입력전압에 따른 Z-t 곡선. (a) 이온화 전 Z-t 곡선. (b) 이온화 후 Z-t 곡선.

Fig. 13. 입력전압에 따른 토양의 등가이온화 반경. (a) 이온화 전 이온화 반경. (b) 이온화 후 이온화 반경.

않아 전압 및 전류 파형이 선형적인 모습을 관찰할 수 있다. 그러나 12 kV 이상의 입력전압에서는 토양에 이온화가 발생하여 전류 파형에 두 개의 피크전류가 발생하였고, 전압파형에서도 전위가 급격하게 감소하여 비선형적인 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10의 전압 및 전류파형을 이용하여 Fig. 11과 같이 전압-전류(V-I) 곡선과 임피던스-시간(Z-t) 곡선을 분석하였다 [8][10][11]. Fig. 11(a)의 V-I 곡선에서 10 kV의 전압을 가한 경우에는 선형적인 특성이 나타났지만 그 이상의 전압에서는 페루프 곡선이 형성됨으로서 비선형적인 특성이 나타났다. (Fig. 11(b)) 또한 입력전압의 크기가 증가할수록 페루프의 면적이 증가하였다. 페루프의 원점과 페루프 곡선의 한 점을 잇는 직선의 기울기는 저항을 나타내므로 모든 전압에서 이온화가 일어나기 전의 기울기는 비슷하였으나 이온화가 일어난 후에는 18kV의 기울기가 가장 작게 나타났다. Fig. 12의 Z-t 곡선

은 곡선의 시작부분인 전도성 구간, 임피던스가 감소하는 이온화 구간, 임피던스가 처음크기로 다시 돌아오는 탈이온화 구간으로 나눌 수 있다. Fig. 12(a)에서 토양의 이온화가 발생하지 않은 10 kV의 입력전압에서는 임피던스 변화가 거의 나타나지 않았다. 하지만 이온화가 발생한 12 kV ~ 18 kV에서는 임피던스가 급격히 감소하였다가 다시 원래 크기로 돌아오는 현상이 나타났다.

토양의 이온화로 인해 접지전극 주변 토양의 전기 저항이 감소하고 유효 접지전극의 반경이 증가하게 된다. 이러한 토양의 이온화 반경을 구하기 위해 이온화가 일어나기 전의 토양저항률을 Eq. 6을 이용하여 계산하였다. 계산 결과 이온화가 일어나기 전 정상상태의 토양 저항률은 약 $347 \Omega \cdot m$ 로 나타났다. 정상상태의 토양 저항률을 가지고 Eq. 8을 이용하여 이온화 반경을 산출하였다. Matlab 분석프로그램을 이용하여 Fig. 13과 같이 입력 전압에 따른 토양의 이온화 등가반경을 나타내었다. 접

지전극의 반경이 19 mm이기 때문에 이온화가 발생하지 않은 10 kV에서는 Fig. 13(a)와 같이 이온화 반경이 거의 19 mm로 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 12 kV에서는 이온화 반경이 최대 57 mm까지 확장되고, 18 kV에서는 84 mm까지 확장된 것을 알 수 있다. 이온화 영역 내에서는 전기저항이 매우 작기 때문에 접지전극의 유효 반경이 확장된 것으로 판단할 수 있다 [12][13]. 또한 높은 전압에서는 이온화 영역이 반구형 용기의 크기에 가깝게 확장되는 것으로 나타났다. 이는 반구형 용기에 비해 접지전극의 크기가 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 논문은 반구형 전극계에서 표준뇌임펄스전압을 공급하여 입력전압의 극성과 크기에 따른 접지전극의 주변에서 발생하는 이온화현상을 고려한 토양의 전기적 특성을 분석하였어 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 낮은 전압에서는 전압과 전류 파형이 모두 선형적으로 관찰되었으나, 임계전압 이상에서 비선형 특성은 전류파형에서 두 번째 피크전류의 발생으로 확인할 수 있고, $V-I$ 곡선 및 $Z-t$ 곡선을 통해 이온화가 발생하였음을 확인하였다.

(2) 토양의 이온화 전의 전기저항은 거의 일정하게 나타났고, 이온화 후의 전기저항은 두 번째 이온화 전류의 크기에 따라 크게 감소하였다.

(3) 토양의 이온화 개시시간 및 이온화 전류피크까지의 시간은 전압이 상승함에 따라 빨라졌고 높은 전압에서는 이온화가 파두 부근에서 발생하였으며, 정극성보다 부극성에서의 시간지연이 길게 나타났다.

(4) 토양의 등가이온화 반경으로 평가한 이온화 영역이 반구형 용기의 크기만큼이나 확장되는 것으로 나타났다. 이는 반구형 용기에 비해 접지전극의 크기가 상대적으로 크기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

(5) 최적의 접지시스템의 설계를 위해서는 위험전압의 저감 측면에서 토양의 이온화 현상과 과도접지저항을 고려해야 함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Electric Power

Corporation through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. (grant number : R15XA03-31)

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R15XA03-31)

REFERENCES

- [1] 이복희, 이강수, 김희구, “임펄스전류에 의한 토양의 절연과 피복성”, 조명전기설비학회논문지, v.24, no.4, pp.103-109, 2010.
- [2] 이규선, 박건훈, 김희구, 이복희, “반구형 전극계에서 뇌임펄스전압에 의한 토양의 종류별 이온화 특성”, 전기학회논문지, v.58, no.1, pp.119-125, 2009.
- [3] 이복희, 김희구, 박건훈, 백영환, “임펄스전류에 의한 토양의 종류별 이온화 특성”, 조명전기설비학회논문지, v.22, no.12, pp.87-94, 2008.
- [4] 김희구, 박건훈, 이복희, “임펄스전압에 의한 동심원통형 전극계에서 토양 이온화특성 분석”, 조명전기설비학회논문지, v.22, no.9, pp.32-39, 2008.
- [5] 박건훈, 김희구, 김정철, 김기복, 이복희, “토양종류에 따른 임펄스전압에 의한 이온화 현상”, 대한전기학회:학술대회 논문집, 대한전기학회 2008년도 제39회 하계학술대회, pp.1301-1302, 2008.
- [6] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H Griffiths, "Performance of Earthing Systems of Low Resistivity Soils", IEEE Trans. Power Delivery, vol.21, No.4, pp.2039-2047, 2006.
- [7] KS C IEC 60060 Std, Part1 - Guide on High-Voltage Testing Techniques, pp.23-26, 2002.
- [8] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H Griffiths, "Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses", IEEE Trans. Power Delivery, vol.21, pp.353-361, 2006.
- [9] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H Griffiths, "Determination of Threshold Electric Field E_c of Soil Under High Impulse Currents", IEEE Trans. Power Delivery, vol.20, pp.2108-2113, July. 2005.
- [10] Abdul M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents Into Concentrated Electrodes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.3, pp.1669-1677, 1994.
- [11] R.Kozstaluk, M.Loboda, D.Mukhedkar, "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No.11, pp.4653-4660, 1981.
- [12] Shozo Sekioka, Maria I. Lorentzou, Maria p. Philppakou, and Jojn M.P rousalidis, "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.21, No.1, pp.194-201, 2006.
- [13] Yoshinobu Asaoka, Hideki Motoyama, Hiroji Matsubara, "Development of Calculation Model for Grounding Resistance of Rod Electrodes exposed to Large Lightning Impulse Current", 28th International Conference on Lightning Protection, pp.692-697, Aug. 2006.