

임펄스전압에 의한 토양의 이온화에 따른 접지성능의 향상

Improvements of Grounding Performances Associated with Soil Ionization under Impulse Voltages

김 회 구* · 이 복 희*

(Hoe-Gu Kim · Bok-Hee Lee)

Abstract - In this paper, electrical and physical characteristics associated with the ionization growth of soil under impulse voltages in a coaxial cylindrical electrode system to simulate a horizontally-buried ground electrode were experimentally investigated. The results were summarized as follows: Transient ground resistances decreased significantly by soil ionization. The voltage-current ($V-I$) curves for non-ionization in soil lined up in a straight line with the nearly same slope that is the ground resistance, but they showed a 'cross-closed loop' of ∞ -shape under ionization. The conventional ground resistance and equivalent soil resistivity were inversely proportional to the peak value of injected impulse currents. On the other hand, the equivalent ionization radius and time-lag to the maximum value of ionization radius were increased with increasing the incident impulse voltages. An analysis method for the transient ground resistances of the ground electrode based on the ionization phenomena was proposed. The proposed method can be applied to analyze the transient performances of grounding systems for lightning protection in power system installations.

Key Words : Impulse voltages, Grounding resistance, Soil ionization, $R-t$ curve, $V-I$ curve, Ionization development

1. 서 론

접지시스템의 성능지표인 정상상태 접지저항은 저주파수의 전류가 접지전극에 입사될 때 발생하는 전위상승을 측정하여 산출한다. 뇌전류 또는 개폐서지와 같이 고주파수를 포함하는 서지전류가 입사하는 접지시스템의 성능도 접지저항으로 평가하고 있다. 전력계통의 내뢰설계에 있어 접지저항은 중요한 파라미터 중 하나이며, 접지시스템의 성능지표로 정상상태 접지저항보다는 과도적 성능을 고려하고 있다. 접지극에 뇌전류와 같은 서지전류가 유입하게 되면 접지극 주변의 전위가 상승하고, 이로 인해 인체의 안전과 각종 전기-전자기기들이 위협을 받게 된다. 뇌서지나 전자계에 의한 위협요소를 억제하기 위해서는 유입된 서지전류에 의한 전위상승이 저감되도록 접지저항을 낮추어야 한다[1-3].

뇌전류의 입사에 의해 접지극의 전위가 상승하면 접지극의 주변에서 토양의 이온화가 진전되어 접지저항이 낮아지기도 한다. 따라서 서지전류가 유입될 가능성이 있는 접지극시스템의 설계와 시공을 할 때 접지저항을 낮출 수 있는 토양의 이온화 현상 및 방전특성의 분석이 선행적으로 이루어지면 접지극시스템의 과도적인 전기적 성능과 보호효과를 향상시킬 수 있으므로 이에 대한 심층적인 연구가 필요하다. 임펄스전류가 입사된 경우 접지극에

나타나는 과도적인 전기적 현상은 이온화가 발생하기 이전의 비방전영역과 이온화가 발생한 이후의 방전영역으로 나눌 수 있다. 토양의 이온화가 일어나지 않는 경우 접지시스템의 성능은 접지극의 저항, 인덕턴스와 커패시턴스 등의 회로적인 요소 및 서지전류의 고유특성에 의해 지배된다. 접지극에 뇌임펄스전압이나 서지전류가 입사되었을 때는 임계전계의 세기이상에서 접지극 주변의 토양에서 이온화가 발생하여 과도적인 전기적 현상으로 나타난다[4-6].

본 논문에서는 뇌임펄스전압에 의해 접지극 주변에서 발생하는 토양의 이온화 현상이 접지시스템의 과도적인 물리적/전기적 특성에 미치는 영향을 분석할 목적으로 동축 원통형 접지극시스템에 대하여 수행한 연구결과를 기술하였다. 시료 토양으로 중량함수비 8%인 모래를 적용하였으며, 1.2/50 μ s 뇌임펄스전압을 가하였을 때 접지극에 흐르는 전류와 전위상승의 파형을 측정하고, 이를 기초로 하여 접지극 주변에서 토양의 이온화에 따른 전압-전류특성곡선($V-I$ 곡선), 과도접지저항-시간곡선($R-t$ 곡선) 등을 평가하였다. 또한 뇌임펄스전압에 의한 접지극 주변에서 토양의 이온화 확장 및 진전속도와 같은 물리적 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

뇌임펄스전압에 의해 접지극 주변에서 발생하는 토양의 이온

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea.
E-mail: bhlee@inha.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea.
Received : April 29, 2016; Accepted : November 22, 2016

화에 관련된 특성을 분석하기 위해 그림 1과 같은 실험계를 구성하였다. 동축원통 전극계를 사용하였으며, 접지극에서 방사상의 방향으로 진전하는 토양의 이온화 현상을 기반으로 하는 전기적/물리적 특성의 분석을 주안점으로 하는 실험적 연구를 수행하였다.

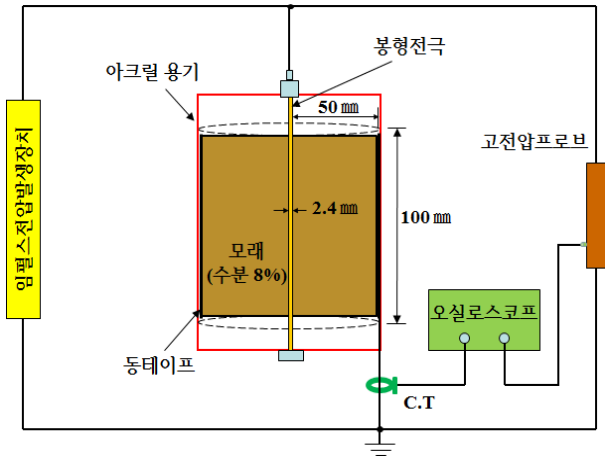


그림 1 실험계의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

인펄스전압 발생장치, 전극계 및 전압과 전류의 측정 장치 등으로 실험계를 구성하였으며, 비교적 낮은 전압에서도 토양의 이온화 현상을 면밀하게 분석할 수 있도록 소형의 용기로 제작하여 실험을 수행하였다. 실험 용기는 내경 100[mm]인 아크릴 원통의 내측에 동 테이프를 부착하여 제작하였으며, 접지극으로 직경 2.4[mm]인 원주형 스테인리스봉을 실험용기 중앙에 축 방향으로 배치하였다. 접지극의 상단에는 인펄스시험전압을 공급하며, 반대 방향 끝단은 전계 집중에 의한 이온화의 발생을 방지하기 위하여 용기 밖에 배치하였다. 접지극의 일부분에서 전계가 국부적으로 집중되지 않아야 접지극에서 방사상으로 진전하는 토양의 이온화 현상과 과도접지저항을 적절하게 산출할 수 있다. 접지극을 모의한 원주형 전극을 인펄스전압발생장치에 접속하고, 외측에 위치한 접지극의 하단을 접지하였다. 오실로스코프의 전원은 절연 변압기와 선로용 필터를 적용한 안정화 전원회로로 공급하였으며, 전도/유도 노이즈의 영향을 배제하기 위해 차폐함 내에 배치하였다.

2.2 실험방법

토양 시료로는 수분함유량의 조절이 용이하고 입자의 크기를 쉽게 분류할 수 있는 모래로 선정하였으며, 시료 토양을 원주형 용기에 채우고 인펄스전압에 대한 토양의 이온화 개시전압과 과도적인 전기적/물리적 특성 및 이온화의 진전메커니즘의 분석을 위한 실험을 수행하였다. 모래 입자 사이의 공극에 의한 영향이 일어나지 않도록 시료에 5[kPa]의 압력장치를 이용하여 토양의 조밀도를 조정 한 후 실험하였다. 수분의 함유량은 저항률이 70

[$\Omega \cdot m$]인 수돗물로 조절하였으며, 통상의 대지 상태를 고려하여 수분함유량은 중량함수비 8[%]로 선정하였다.

실험전압은 최대 10[kV], 5[kA]의 1.2/50[μs] 표준 뇌임펄스 전압을 발생시킬 수 있는 조합과 서지시뮬레이터로 공급하였으며, 접지극의 단자전압은 대역폭 75[MHz], 최대 검출전압 20[kV]인 수동성 고전압프로브로 측정하였다. 시료 토양을 통과하는 전류는 응답감도 0.1[V/A]인 변류기로 검출하였다. 뇌임펄스전압과 전류의 파형은 4채널, 500[MHz](2.5 [GS/s])의 축적형 오실로스코프로 관측하고 분석하였다. 또한 축적형 오실로스코프의 자체 기능을 이용하여 전압-전류곡선을 도출하고, Matlab프로 그램을 이용하여 과도접지저항곡선을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양의 이온화에 따른 접지극의 전위상승과 전류의 파형

실험용 전극으로 사용한 원주형 접지극의 표면에서 방사상의 방향으로 진전되는 방전특성에 대한 분석을 위해 토양의 이온화 전과 후의 전압과 전류를 서로 비교/분석하여 토양의 이온화에 따른 과도적인 전기전도특성을 파악하였다. 인펄스전압발생기를 사용하여 입사전압을 200[V]에서 11[kV]까지 점진적으로 증가시키면서 접지극에서 측정된 인펄스전압과 전류의 파형을 그림 2에 나타내었으며, 그림 내의 번호는 전위상승에 전류 파형이다.

그림 2(a)와 (b)에서 전압과 전류가 비슷한 비례적인 관계를 나타내어 토양의 이온화가 매우 미약하거나 발생하지 않았음을 알 수 있다. 접지극의 전위상승이 약 1[kV] 이하에서 전류와 전위상승 파형은 거의 선형성이 유지되었다.

접지극의 전위상승이 2[kV] 이상에서 접지전류의 크기가 급격히 증가하였으며, 피크까지의 시간이 길게 나타났다. 이와 같이 접지전류와 전위상승이 비례적인 관계를 벗어나 급격히 변동하는 원인은 토양의 이온화에 기인된 것으로 판단하는 것이 일반적이다[4]. 토양에서 방전이 활발하게 일어난 경우 인펄스전압에 의해 접지극에 흐르는 전류와 전위상승의 파형을 보아도 쉽게 이온화가 진전됨을 판단할 수 있다.

3.2 전류피크까지의 지연시간

토양의 이온화 특성과 직접적으로 관련성이 있을 것으로 추정되는 접지극에 흐르는 인펄스전류의 크기에 따른 전류피크까지의 지연시간에 대한 측정결과를 그림 3에 나타내었다. 토양의 이온화가 일어나지 않는 경우 전류의 증가에 따라 피크에 도달하기까지 지연되는 시간의 변화는 거의 없었으며, 토양의 이온화가 발생한 2[kV] 이상의 전위상승에서 전류가 급격히 증가하는 양상을 확인할 수 있다. 이와 같이 접지극의 전위상승이 높아짐에 따라 이온화 전류가 증가하여 피크까지의 지연시간이 점차 늦어지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 입사전압이 높아질수록 토양의 이온화 반경이 확장되어 전류피크까지의 시간 또한 길어지는 것으로 판단된다.

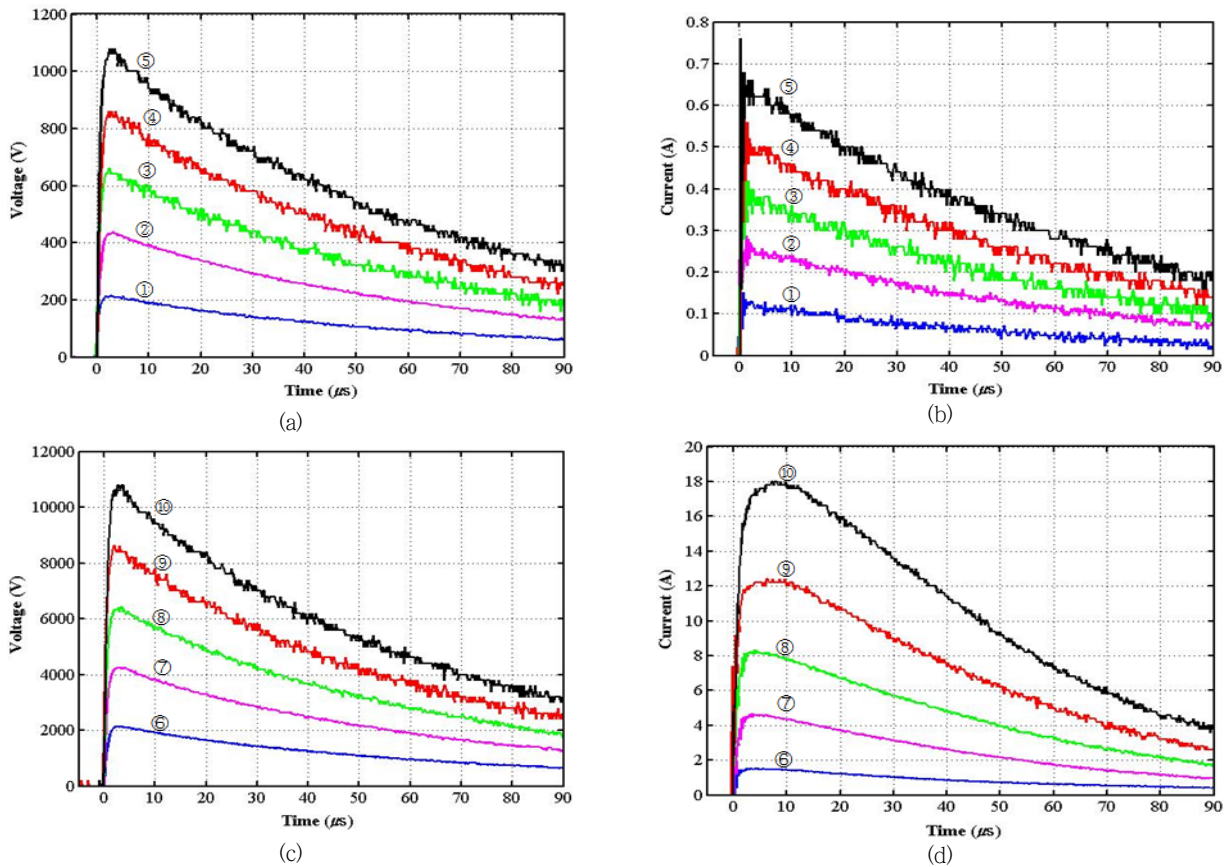


그림 2 접지극에서 측정된 임펄스전압과 전류 파형
 Fig. 2 Oscilloscope traces of impulse voltages and currents measured at the ground electrode

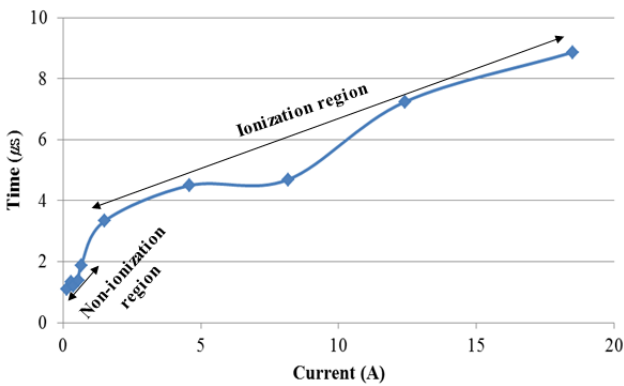


그림 3 전류피크까지의 지연시간
 Fig. 3 Time-lags to peak current

3.3 이온화에 따른 과도접지저항

낙뢰에 의해 큰 서지전류가 접지극에 입사하게 되면 접지극 주변에 형성된 강한 전계로 인해 접지극에서 대지를 향해 진행되는 스트리머(streamer)가 발생하여 전도도가 양호한 이온화 영역

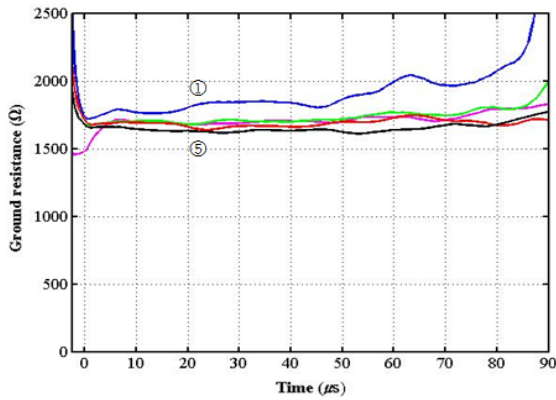
을 형성하게 된다. 접지극에 임계값 이상의 서지전류가 주입되면 접지극 중앙의 표면에서 토양의 이온화가 시작되고 이러한 이온화 영역은 확장하여 진행된다.

3.3.1 R-t곡선

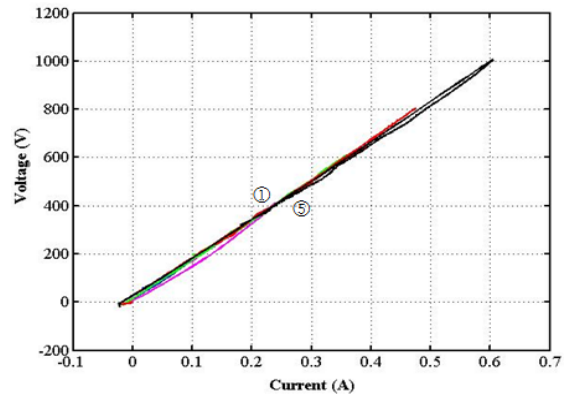
뇌임펄스전압에 의한 접지극 표면의 주위에서 토양의 이온화 현상을 R-t곡선으로 분석하였다. 실험용기 안에 수분 8[%]를 함유한 모래를 채우고 임펄스전압을 입사시켜 전압과 전류의 파형을 측정하고 Matlab프로그램을 이용하여 R-t곡선을 산출하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 토양의 이온화 영역은 전도도가 매우 높기 때문에 영역 자체가 도체와 같은 도전통로의 역할을 하게 되어 확장된 접지극으로 작용하여 순간적인 접지저항의 감소를 가져온다. 일정시간 이후 접지극을 통과하는 전류의 양이 작아지게 되면, 전류값에 따라 이온화 영역은 감소하며 접지저항 또한 원래의 값으로 돌아오게 된다[7-9].

접지극의 전위상승이 2[kV]인 경우 접지극을 통하여 흐르는 전류와 전위상승의 파형만으로는 토양의 이온화를 명확히 판단할 수 없었다.

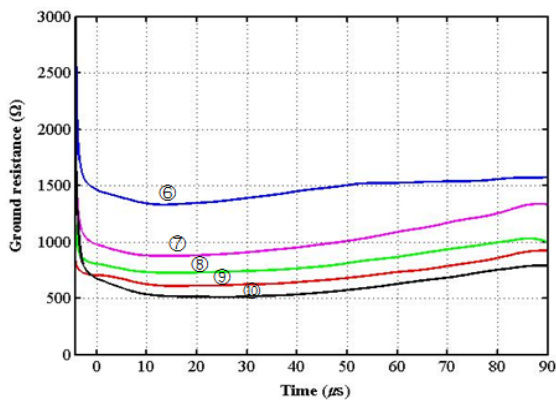
토양에서 이온화가 발생하면 전도성 전류뿐만 아니라 이온화



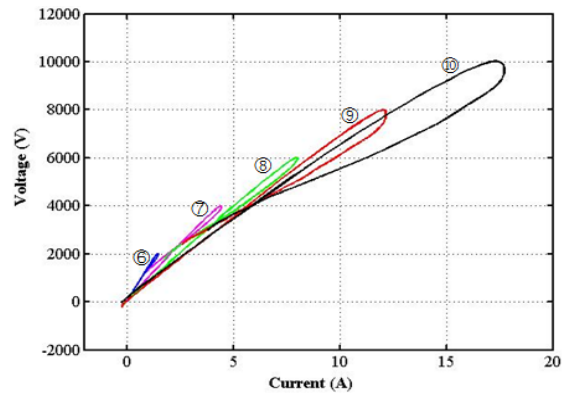
(a) 토양의 이온화가 거의 없는 경우



(a) 비이온화 영역



(b) 토양의 이온화가 발생한 경우



(b) 이온화 영역

그림 4 R-t 곡선

Fig. 4 R-t curves

전류가 함께 흐르기 때문에 접지저항은 급격히 감소한다. 이온화 전류가 최대 크기에 도달한 이후 접지저항은 최소로 감소하고, 그 이후에는 전위가 낮아지므로 이온들이 재결합하여 발생하는 탈이온화 현상으로 인해 접지저항이 다시 처음의 크기로 회귀한다[10].

그림 4의 과도접지저항곡선에서 알 수 있는 바와 같이 접지극의 전위상승이 1[kV] 이하에서는 모두 약 1600[Ω] 이상의 접지저항을 나타내고 있으며, 접지저항은 거의 일정하고 최저점이 없으므로 이온화와의 구별할 필요가 있다. 즉, 그림 4(a)의 결과는 토양의 이온화는 거의 없는 것으로 토양과 접지극의 접촉에 의한 과도적인 접지저항으로 볼 수 있다. 그림 4(b)는 그림 2(c)와 (d)의 전위상승과 전류 파형에 대한 과도접지저항으로 토양의 이온화가 발생한 것으로 보이며, 접지극의 전위상승이 2[kV]인 경우 과도접지저항의 최소값은 약 1400[Ω] 정도로 감소하였으며, 접지극의 전위상승이 높아질수록 접지저항이 낮아지는 것으로 나타났다.

접지극의 전위상승이 11[kV]일 때 과도접지저항의 최소값은 이온화가 발생하지 않은 것의 약 30[%]이하로 저감되었다. 접지 전류가 증가함에 따라 접지저항이 저감되는 비율은 낮아졌으며,

그림 5 V-I 곡선

Fig. 5 V-I curves

토양의 이온화가 진전되는 영역의 제한 때문에 대전류에서 과도 접지저항이 저감되는 폭이 작아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향으로부터 토양의 이온화에 따른 과도접지저항의 저감은 점차 포화될 것으로 예상할 수 있다.

3.3.2. V-I 곡선

전압-전류곡선의 기울기가 접지저항을 나타내므로 접지극 표면의 주위에서 토양의 이온화 현상은 R-t 곡선뿐만 아니라 V-I 곡선을 통해서도 분석할 수 있으며, 그림 2에 나타난 전위상승과 전류에 대하여 산출한 V-I 곡선을 그림 5에 나타내었다.

토양의 이온화가 발생하지 않는 경우와 이온화가 발생하는 경우의 V-I 곡선도 명확한 차이를 보였으며, 접지극의 전위상승이 1[kV] 이하의 V-I 곡선의 기울기는 거의 일정하여 접지저항이 변하지 않음을 확인할 수 있다. 접지극의 전위상승이 낮아 토양의 이온화가 발생하지 않았거나 매우 미약한 경우 전위상승과 전류 사이는 거의 비례적인 관계인 일직선으로 나타났다. 반면 토양의 이온화가 발생하는 2[kV] 이상의 전위상승에서는 회귀형 리본모양의 패루프로 나타났다. 토양의 이온화가 발생하면 그림

5(b)와 같이 입사전압이 높을수록 $V-I$ 곡선은 회귀형 페루프의 면적이 증가하며 시계방향으로 조금씩 회전하는 것으로 나타났다. $V-I$ 곡선이 시계방향으로 회전하는 것은 접지저항의 감소를 나타내며 입사전압이 높아질수록 접지저항의 감소가 큰 것으로 분석된다. 또한 $V-I$ 곡선의 페루프 면적은 접지극의 전위가 높아 이온화가 확대될수록 크게 나타났다.

3.4 규약접지저항의 전류 의존성

임펄스전류에 의한 접지극의 과도접지저항은 시간에 따라 변화하기 때문에 특정한 값으로 평가하기가 곤란하다. 접지극의 주변에서 토양의 이온화가 발생하면 전류와 전위상승 파형의 피크에 도달되는 시간이 일치하지 않는다. 따라서 임펄스전류에 대한 접지시스템의 성능으로 평가하는 과도접지저항의 정량적인 지표로는 식 (1)에 나타난 바와 같이 접지극의 전위상승의 피크값을 전류의 피크값으로 나눈 규약접지저항으로 나타낸다[11-13].

$$R = \frac{V_p}{I_p} \tag{1}$$

접지극 주변에서 토양의 이온화가 발생하는 경우 접지전류의 크기에 따른 규약접지저항의 변동특성에 대한 측정결과를 그림 6에 나타내었다.

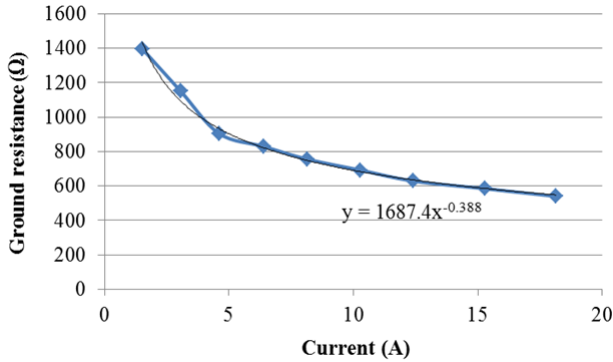


그림 6 임펄스전류의 크기에 따른 규약접지저항
 Fig. 6 Conventional ground resistances as a function of impulse current magnitude

임펄스전류의 크기에 따른 규약접지저항의 측정결과는 지수함수적으로 감소하는 경향으로 다음의 식 (2)과 같이 근사적 실험식으로 표현할 수 있다[14-15].

$$R = kI_p^\alpha \tag{2}$$

토양의 종류와 입자의 크기, 조밀도, 저항률, 습도 등 토양의 고유특성 및 접지극의 기하학적 형상과 임펄스전류의 파형 등 실

험적 파라미터에 따른 이온화가 진전되는 범위와 관련이 있는 것으로 판단된다.[15]

3.5 토양의 등가저항률의 변화

원주형 실험용기의 중심축에 봉형 접지극을 수직으로 설치한 경우 접지저항은 식 (3)과 같이 산출할 수 있다[16-17].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_0}{r_i} \tag{3}$$

여기서,

- l : 접지극의 길이
- r_0 : 원주형 용기의 반경
- r_i : 접지극의 반경
- ρ : 토양의 저항률

이다.

본 연구에 채용된 접지극에 1.2/50[μs] 뇌임펄스전압을 가하여 측정된 규약접지저항으로부터 접지전류의 크기에 따른 토양의 등가저항률을 식 (4)으로 산출하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

$$\rho_e = \frac{2\pi l R}{\ln \left(\frac{r_0}{r_i} \right)} \tag{4}$$

0.6[A] 이하의 접지전류에서는 토양의 저항률의 감소가 나타나지 않지만 접지전류 1[A] 이상의 전류에서부터 토양의 저항률이 급격히 감소되는 것을 알 수 있다.

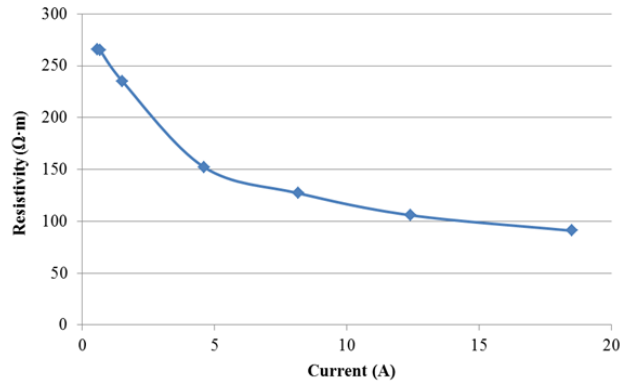


그림 7 접지전류의 크기에 따른 토양의 등가저항률의 변동
 Fig. 7 Variation of equivalent resistivity of soil as a function of ground current magnitude

토양의 이온화가 발생하지 않은 것으로 보여 지는 접지전류가 0.56[A]일 때 토양의 저항률은 약 270[Ω·m]이며, 전류의 크기

가 18.5[A]일 때 토양의 저항률은 약 91[Ω·m]로 감소하였다. 즉, 접지극을 통해 흐르는 전류가 18.5[A]일 때 토양의 이온화로 등가저항률은 약 1/3이하로 감소하였다. 접지극의 전위상승에 따른 토양의 저항률의 감소는 전위가 상승할수록 접지극 주위에 강한 전계가 형성되어 이온화가 발생하고, 이온화 전류의 증가가 커져 규약접지저항과 토양의 저항률이 점차 작아지는 것으로 분석된다.

3.6. 토양 이온화의 진전

접지전류의 증가에 따른 접지저항의 측정값으로부터 접지극 주위에서 토양 이온화의 진전에 따른 접지극의 등가반경을 산출할 수 있다. 토양의 이온화에 의해서 변동하는 접지극의 등가반경은 식 (5)으로부터 계산할 수 있다[4, 17].

$$r_i = \frac{r_o}{\frac{2\pi l R}{e \rho_c}} \quad (5)$$

임펄스전압을 가하여 측정된 규약접지저항 R 을 적용하여 그림 2(c)와 (d)의 전위상승과 전류 파형에 대하여 Matlab프로그램으로 산출한 이온화에 따른 접지전극의 등가 반경의 시간적 변동 특성을 그림 8에 나타내었다.

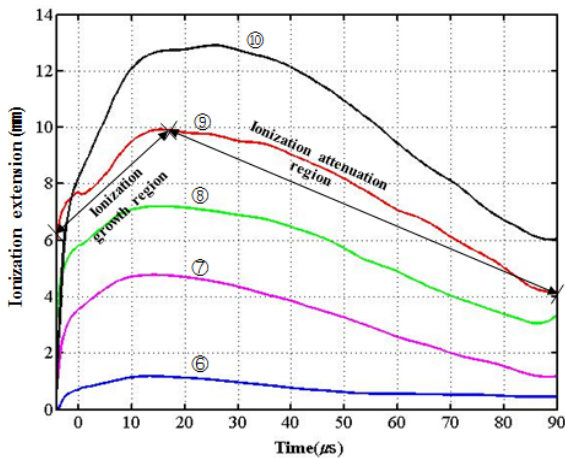


그림 8 토양의 이온화에 따른 접지전극의 등가반경
 Fig. 8 Equivalent radius of ground electrode associated with soil ionization

토양의 이온화가 진전되는 영역은 접지전류가 최대값을 지나 감소해도 이온화의 진전이 계속되는 범위로 이온화 진전거리가 최대가 되는 점까지를 이온화 진전영역으로 정의하였다. 토양의 이온화 반경은 전위상승이 높아짐에 따라 증가하였으며, 피크점을 경과한 후 다시 이온화 반경이 줄어드는 양상을 보였다. 접지극의 기하학적 반경 1.2[mm]에 비하여 2.2[kV]의 전위상승

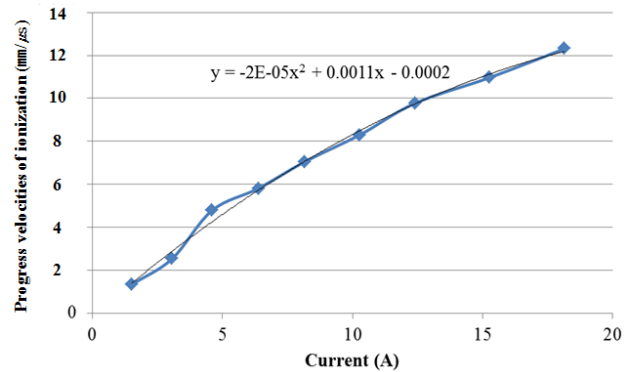


그림 9 이온화 진전 평균속도
 Fig. 9 Average velocity of ionization growth

에서 이온화 등가반경은 최대 1.33[mm], 그리고 10.8[kV]의 전위상승에서는 최대 12.4[mm]까지 크게 확장된 것을 확인할 수 있다.

3.7 이온화의 진전속도

접지극 표면 주위에서 토양의 이온화가 진전되기 시작한 점에서 이온화의 진전거리가 최대까지의 기울기를 평균 이온화속도라고 정의하고, 접지전류의 크기에 따른 이온화의 진전속도에 대하여 산출한 결과를 그림 9에 나타내었다.

토양 이온화의 진전속도는 전류의 크기에 비례적으로 증가하였으며, 접지전류의 크기의 2차 함수로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$v = \alpha I_p^2 + \beta I_p + \gamma \quad (6)$$

여기서,
 v : 이온화 진전속도 [m/s]
 I_p : 임펄스전류의 피크값 [A]
 α, β, γ : 속도와 마찰에 관련된 계수[m/sA²], [m/sA], [m/s]

식 (6)으로 산출한 추세선과 측정결과는 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 동축원통 전극계를 이용하여 표준 뇌임펄스전압에 의한 토양의 이온화에 따른 접지시스템의 성능분석에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전력계통의 피뢰설비용 접지시스템의 설계 및 성능은 정상 상태 접지저항을 지표로 토양의 이온화를 고려하여 과도접지저항으로 평가하는 것이 바람직함을 확인하였다.

(2) 토양의 이온화에 의해 $V-I$ 곡선은 회귀형 리본모양의 페루프의 형상으로 나타났으며, 접지전류가 증가할수록 시계방향으로 회전하고 페루프의 면적은 증가하였다.

(3) 토양의 이온화에 의한 과도접지저항은 접지전류가 증가할수록 감소하였으며, 또한 임펄스전류의 크기가 증가할수록 규약 접지저항은 지수 함수적으로 감소하였다.

(4) 토양의 이온화 등가반경은 입사전압의 크기에 따라 증가했고, 피크점을 경과한 후 다시 이온화 등가반경이 줄어드는 현상을 보였으며, 토양의 이온화가 진전되는 속도는 입사전류의 2차 함수로 됨을 확인하였다.

본 연구의 결과는 전력계통의 뇌방호를 위한 접지시스템의 설계와 시공기술의 개발을 위한 유용한 자료로 활용될 것으로 기대되며, 실용화를 위한 지속적인 연구가 요망된다.

감사의 글

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

References

- [1] A. M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents Into Concentrated Electrodes", IEEE Trans. Power Deli., Vol. 9, No. 3, pp. 1669-1677, 1994.
- [2] P. Espel, R. R. D. A Bonamy, and J. N. Silva, A. Wetz, "Electrical Parameters Associated with Discharges in Resistive Soils", IEEE Trans, Power Deli., Vol. 19, No. 3, pp. 1174-1182, 2004.
- [3] S. Visacro, R. Rafael, M. H. M. Vale, and C. Pereira, "The Response of Grounding Electrodes to Impulse Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity" IEEE Trans. on EMC, Vol. 53, No. 2, pp. 401-406, 2011.
- [4] N. M. Nor and A. Ramli "Effects of Moisture content, impulse polarity and earth electrode's dimension on dry and wet sand under high voltage conditions", John Wiley & Sons, Ltd, DOI: 10.1002, 2007.
- [5] N. Mohamad Nor, S Srisakot, A. Haddad, H. Griffiths, "Characterization of soil ionization under fsat impulse", 25th ICLP, pp. 417-422, 2000.
- [6] Y. Liu, N. Theethayi, R. M. Gonzalez and R. thottappillil, "The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results", 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 2, pp. 794-799, 2003.
- [7] I. F. Gonos and I. A. Stathothopulos, "Soil ionization under lightning impulse voltages", IEE Proc. Sci.- Meas. Tech., Vol. 151, No. 5, pp. 343-346, 2004.
- [8] J. Wang, A. C. Liew, and M. Darveniza. "Extension of Dynamic Model of Impulse Behavior of Concentrated Grounds and High Currents" IEEE Trans. PD, Vol. 20, No. 3, pp. 2160-2165, 2005.
- [9] 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.
- [10] S. Sekioka, M. I. Lorentzou, M. P. Philppakou, and J. M..P. rousalidis. "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp. 194-201, 2006.
- [11] S. B. Lee B. Li, S. J. Lee, B. W. Jeon, and B. H. Lee, "Transient Grounding Impedance Behaviors of Deeply-driven Ground Rods According to the Injection Point of Impulse Currents" J. KIEE, Vol. 22, No. 9, pp. 62-68, 2008.
- [12] L. Grcev, "Impulse Efficiency of Ground Electrodes" IEEE Trans. on PD, Vol.24, No.1, pp.441-451, 2009.
- [13] J. H. Choi and B. H. Lee, "An anlysis of conventional grounding impedance based on the impulsive current distribution of a horizontal electrode", Electric Power Systems Research, Vol.85, pp.30-37, 2012.
- [14] Y. Chen and P. Chowdhuri, "Correlation Between Laboratory and Field Tests on the Impulse Impedance of Rod-type Ground Electrodes" IEE Proc. on Gener. Transm. Distri., Vol. 150, No. 4, pp. 420-426, 2003.
- [15] Y. W. Yoo, J. H. Eom, S. C. Cho, T. H. Lee, and B. H. Lee, "Transient Impedance of Small-sized Ground Electrode Considering Ionization Region", Proc. 6th Asia Lightning Protection Forum, pp. 210-214, 2009.
- [16] P. Chowdhuri, "Impulse impedance tests on laboratory model ground electrodes" IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 150, No. 4, pp. 427-433, 2003.
- [17] B. H. Lee, H. G. Kim, G. H. Park and Y. H Baek, "Ionization Behaviors in various Soils Subjected to Impulse Currents", J. KIEE, Vol. 22, No. 12, pp. 87-94, 2008.
- [18] Y. Asaoka, H. Motoyama, H. Matsubara, H. Sugimoto, "Development of Grounding Resistance Analysis Model of Rod Electrode Considering the Effect of Large-Current Characteristic for Distribution Lines" IEEEJ, Vol. 125, No. 10, pp. 979-987, 2006.

저 자 소 개



김희구 (Hoe-Gu Kim)

1983년 7월 27일생. 2007년 2월 한국교육개발원 전기공학과 졸업(학사). 2010년 2월 인하대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학.



이복희 (Bok-Hee Lee)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~11년 한국조명전기설비학회 회장. 현재 인하대 IT공대 전기공학과 교수.