

습한 토양의 임펄스방전특성

Characteristics of Impulse Discharges in Wet Soil

김 회 구* · 이 복 희†

(Hoe-Gu Kim · Bok-Hee Lee)

Abstract - This paper presents the experimental results related to soil ionization and electrical breakdown in a concentric hemispherical electrode system under lightning impulse voltages. Dynamic voltage-current and impedance-time characteristics of soil ionization were measured and analyzed. Also the electrical breakdowns of the soil gap were investigated. The time-lag to the peak current corresponds to the soil ionization propagation. The time of ionization propagation in wet sand is found to decrease with increasing the impulse currents. A drastic decrease in ground resistance was observed during the impulse current spreading in sand. The electrical breakdown appears at the wave tail of impulse voltage and results in a wide scatter in $V-t$ curves. The voltage-current curves have a fan-like shape attributed to ionization processes which result in increasing current and decreasing voltage.

Key Words : Impulse voltages, Ground resistance, Soil ionization, $Z-t$ curves, $V-I$ curve, Breakdown voltage

1. 서 론

접지전극의 주위에서 발생하는 토양의 이온화와 절연파괴특성은 전기설비의 안전성 측면에서 관심을 끌고 있으며, 접지전극의 전위상승으로 지중방전이 일어나는 경우 접지시스템의 성능이 과도적으로 변동하게 된다. 접지전극이 매설되는 토양은 고체와 액체 또는 고체와 기체가 혼합된 복합유전체의 특성을 가지므로 토양의 전기적 특성은 입자의 종류, 크기, 분포를 비롯하여 불순물, 수분, 압력, 온도 등 2차적 요인의 영향을 받기 쉬우며, 특히 기중과 수중의 방전현상처럼 광학적 관찰이 용이하지 않기 때문에 토양에서 진전하는 방전메커니즘을 설명하는 이론이 정확하게 정립되어 있지 않고 있다. 또한, 현재까지 임펄스전압에 의해 접지전극 주위에서 발생한 지중방전에 관련된 많은 연구가 수행되었지만 지중방전이 진전되는 과정이나 메커니즘에 대한 명확한 해석은 이루어지지 못한 실정이다[1-4].

통상 토양이 이온화 성장을 일으키는 임계전계의 세기 이상으로 되는 뇌전류가 접지전극에 흐르게 되면 토양의 이온화의 시작과 진전으로 과도접지저항이 감소되는 것으로 알려져 있다. 뇌서지전류에 대한 접지시스템의 과도적인 특성의 이해를 위해서는 토양의 이온화 현상과 방전특성에 대한 기초자료가 필요하다. 접지전극에 임펄스전류가 입사된 경우 과도적인 전기적 현상은 크게 이온화가 발생하기 이전의 비방전영역과 이온화가 발생한 이후의 방전영역으로 나눌 수 있다. 토양의 이온화가 일어나지 않는 경우 접지시스템의 성능은 접지극 자체의 저항, 인덕턴스와

커패시턴스 등의 회로적인 요소 및 서지전류의 고유특성에 의해 지배된다. 그러나 접지전극에 높은 임펄스전압이나 서지전류가 입사되어 토양의 이온화가 일어나는 경우 과도적인 전기적 현상으로 나타난다[5-7].

본 논문에서는 뇌임펄스전압에 의해 접지전극 주위에서 발생하는 토양의 이온화 현상 및 접지시스템의 전기적 성능이 과도적으로 변동하는 특성을 분석할 목적으로 반구형 모의 접지전극에 뇌임펄스전압을 가하였을 때 전리성장 및 절연파괴에 대한 실험을 수행하였다. 시료 토양으로는 입자의 균일도가 양호하고 취급이 용이한 모래를 사용하였으며, 표준 뇌임펄스전압을 가하였을 때 접지전극을 통하여 흐르는 전류와 전위상승의 파형을 측정하고, 이들 파형을 기초로 하여 토양의 이온화의 진전과정과 접지전극의 전기적 성능인 접지저항을 검토하였다. 토양의 절연파괴 특성으로 절연파괴를 일으킨 전계의 세기와 절연파괴전압-시간특성($V-t$ 곡선)을 측정하고, 절연파괴과정을 임피던스-시간곡선($Z-t$ 곡선)과 전압-전류특성곡선($V-I$ 곡선)으로 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

임펄스전압에 의해 접지전극 주위에서 발생하는 토양의 이온화의 진전에 관련된 전기적 특성을 분석하기 위해 그림 1과 같은 실험계를 구성하였다. 접지전극 주위의 전계 계산이 용이한 반구형 전극계를 사용하였으며, 임펄스절연파괴전압과 방전전류를 측정하여 토양의 이온화 및 절연파괴과정의 분석을 주요점으로 하는 실험적 연구를 수행하였다.

실험 용기는 내경 200 [mm]인 아크릴 반구형의 내측에 동 테

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

* Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea.
Received : October 26, 2016; Accepted : January 11, 2017

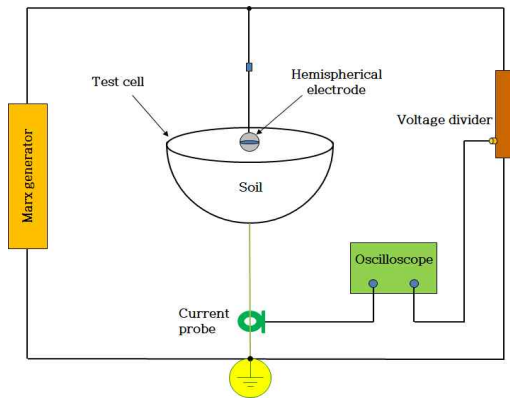


그림 1 실험계의 개략도
 Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

이프를 부착하여 제작하였으며, 동심 반구형 전극계가 되도록 실험용기의 중앙에 직경 24 [mm]인 구형 전극의 1/2을 토양에 매입시켜 전극 간 거리를 76 [mm]의 유지시켰다. 접지전극을 모의한 금속 구형 전극의 상단에 임펄스시험전압을 공급하며, 용기는 접지와 연결하여 페루프를 형성하였다. 임펄스전압과 전류는 각각 용량성 분압기와 변류기로 검출하여 축적형 오실로스코프로 관측하고 저장하는 측정계를 구성하였다. 절연변압기와 선로용 필터를 적용한 안정화 전원회로를 이용하여 오실로스코프의 전원을 공급하였으며, 전도/유도노이즈의 영향을 배제하기 위해 차폐함 내에 배치하였다[8].

2.2 실험방법

시료 토양으로는 수분함유량의 조절이 용이하고 입자의 크기를 쉽게 분류할 수 있는 모래로 선정하였으며, 수돗물을 주수하여 통상의 대지조건에 상응하도록 모래의 저항률을 200 [$\Omega \cdot m$]로 결정하였다. 모래 입자 사이의 공극의 균일도가 유지되도록 5 [kPa]의 압력장치를 이용하여 토양의 조밀도를 조정하였다.

실험전압은 최대 400 kV의 Marx발생장치로 공급하였으며, 접지전극의 전위는 용량성 분압기(분압비 10,000 : 1)로 측정하였다. 시료 토양을 통과하여 흐르는 방전전류는 응답감도 0.1 [V/A]인 변류기로 검출하였다. 뇌임펄스전압과 전류의 파형은 4채널, 500 MHz(2.5 GS/s)의 축적형 오실로스코프로 기록하였다. 절연파괴전압과 방전전류를 기반으로 Matlab프로그램을 이용하여 $V-I$ 곡선, $Z-t$ 곡선을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양의 이온화 특성

3.1.1 토양의 이온화에 따른 전압과 전류 파형의 특성

접지전극 주위의 토양에서 이온화 작용이 발생한 때의 전형적인 임펄스전압과 전류의 파형의 오실로그래를 그림 2에 나타내었

다. 토양의 이온화에 의해 임펄스전압과 전류의 피크시간이 현저히 다른 비선형적인 모습이 관찰된다. 토양의 이온화의 발단은 초기 도전전류에 의한 토양의 가열에 관련된다[9]. 즉, 토양의 이온화 성장의 이전에는 주로 토양의 전기저항만이 작용하지만 이온화 성장이 시작된 이후에는 토양의 저항 이외에도 방전영역의 확장에 따른 전리 증식된 전류가 흘러 두 개의 피크로 나타나게 된다.

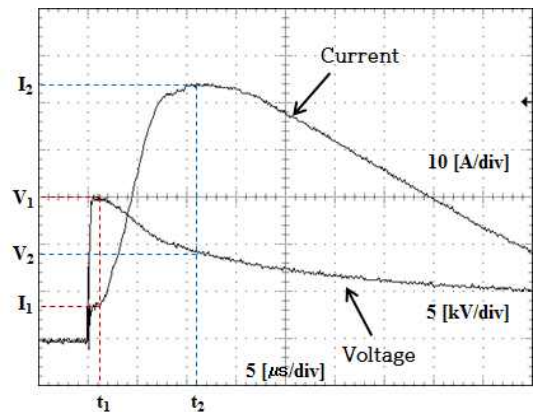


그림 2 이온화 파라미터의 정의
 Fig. 2 Definition of ionization parameters

임펄스전압이 가해진 후 토양의 이온화가 개시되었지만 진전이 확대되기 이전까지의 첫 번째 구간과 이온화 증식이 시작되어 최대에 이르는 두 번째 구간으로 나눌 수 있다. 전류 파형에서 t_1 은 이온화 성장의 개시시간, t_2 는 이온화가 최대로 진전된 전류 피크시간으로 정의하였다. 시각 t_1 이전에는 도전전류에 의한 토양의 가열효과가 지배적으로 작용한다. 이온화 성장 이전의 접지저항은 시간 t_1 에서의 접지저항으로 정의하며, 토양의 이온화가 최대로 성장한 때의 접지저항은 시간 t_2 에서의 값으로 정의한다. 시간 t_1 에서의 V_1 과 I_1 의 비로 이온화 성장 이전의 접지저항 R_1 그리고 토양의 이온화가 최대로 성장된 접지저항 R_2 는 시간 t_2 에서 V_2 와 I_2 의 비로 산출하였다.

3.1.2 이온화 지연시간

대지에 매설된 접지전극에 임계값 이상의 전계가 가해지면 비선형적인 전기전도현상이 나타나게 되며 주로 다음의 2가지 과정으로 된다. 첫째는 도전전류에 의해 발생된 열적효과에 기인된 현상이다. 접지전극에 도전전류가 유입되면 줄열로 인해 토양에 함유된 수분의 온도가 상승하여 이온이 활성화되어 토양의 전기저항이 감소하게 된다. 둘째는 토양 입자 사이의 공극에서 발생된 이온화 현상이다. 토양의 이온화 작용은 이온화가 시작되어 진전하는 단계에서 절연파괴에 이르기까지 일련의 연속과정이며, 토양에 가해지는 전계의 세기에 따라 다양한 현상으로 된다[10,11].

토양의 이온화 특성과 직접적으로 관련성이 있을 것으로 추정

되는 접지전극에 흐르는 임펄스전류의 크기에 따라 이온화 성장이 개시되기까지의 지연시간 t_1 과 이온화 성장에 의한 전류의 피크까지의 지연시간 t_2 에 대한 실측결과를 그림 3에 나타내었다.

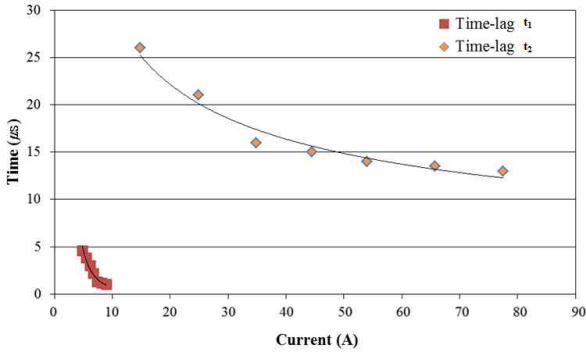


그림 3 임펄스전류의 크기에 따른 토양의 이온화 증식의 시작 및 최대 시점까지의 시간지연

Fig. 3 Time-lags to the initiation and peak of soil ionization growth as a function of the impulse current amplitudes

임펄스전류의 크기가 증가함에 따라 이온화 성장이 개시되기까지의 지연시간과 이온화 성장에 의한 전류의 피크까지의 지연시간 t_1 , t_2 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 절연파괴에 근접할수록 임펄스전압의 파두시간 근처에서 이온화의 성장이 시작되는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 입사전류의 크기가 증가할수록 토양의 이온화 반경이 확장되어 가는 속도가 빨라짐을 의미한다. 결과적으로 토양의 이온화가 진전되는 과정이 입사하는 전류의 크기에 의존적임을 확인하였다.

3.1.3 토양의 이온화 성장에 따른 과도접지저항

접지시스템의 과도접지저항은 임펄스전압에 의해 발생하는 토양의 이온화 과정과 밀접히 관련되어 있다. 토양의 이온화가 개시되고 진전되기 이전과 이후 접지전극의 전압과 전류의 파형이 변화하여 접지저항도 변동하게 된다[9]. 접지전극에 임펄스전압이 가해진 경우 토양의 이온화 성장이 확장되기 이전의 접지저항 R_1 과 이온화 성장이 최대인 시점의 접지저항 R_2 로 구별되는 2가지 저항으로 나타낼 수 있다. 이온화 성장이 시작되기 이전의 접지저항 R_1 은 첫 번째 전류피크와 이온화 성장이 최대인 시점의 접지저항 R_2 는 두 번째 전류피크와 관련이 있다. 이들 접지저항은 전류가 피크일 때의 전압과 피크전류를 이용하여 식 (1)과 식 (2)으로 산출된다[12] [13].

$$R_1 = \frac{V(I_{peak1})}{I_{peak1}} \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{V(I_{peak2})}{I_{peak2}} \quad (2)$$

여기서,

I_{peak1} : 첫 번째 전류피크

I_{peak2} : 두 번째 전류피크

$V(I_{peak})$: 전류피크에 상응하는 순간의 전압

을 나타낸다. 전류피크에서 $di/dt = 0$ 이기 때문에 유도효과는 무시할 수 있다. 시료 토양에서 절연파괴가 발생하기 이전까지의 전압을 가하여 전류의 크기에 따른 이온화가 증식되기 이전의 전기저항 R_1 과 이온화 성장이 최대인 시점에서의 전기저항 R_2 를 그림 4에 나타내었다.

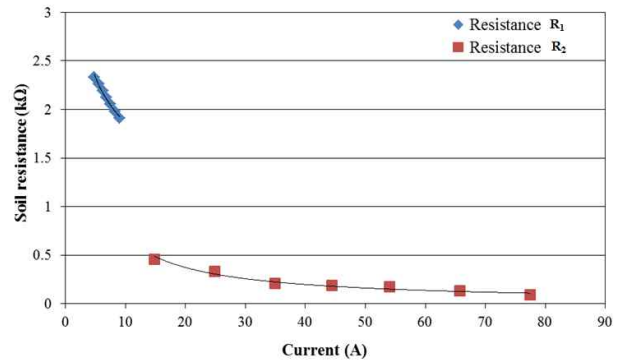


그림 4 임펄스전류의 크기에 따른 토양의 이온화의 시작점과 최대점에서 접지저항

Fig. 4 Ground resistance at the initiation and peak of soil ionization growth as a function of the impulse current amplitudes

이온화가 증식되기 이전이라도 접지전극 표면 근방에서 토양이 가열되고 이온화는 발생하므로 접지저항 R_1 은 전류의 크기에 따라 감소한다. 토양의 이온화가 증식되기 시작하는 점에서 접지저항과는 달리 이온화 성장이 최대인 때의 접지저항은 전류의 크기가 증가함에 따라 감소하는 비율이 완만하게 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같이 토양의 이온화 성장이 일어난 경우 전류의 증가에 따라 저항이 서서히 감소하는 이유는 토양의 이온화 확장이 방사상으로 진전되는 것이 아니라 전계가 집중된 좁은 경로로 이루어지기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 절연파괴특성

뇌임펄스전압에 대한 접지시스템의 과도적 특성을 파악하기 위해서는 토양의 임펄스방전특성의 분석이 필요하다. 토양에 설치된 전극 사이에서 뇌임펄스전압에 의해 절연파괴가 발생한 때의 전형적인 전압과 전류의 파형을 그림 5에 나타내었다.

절연파괴가 발생한 때의 전형적인 전압과 전류 파형은 토양의 이온화가 발생하였지만 그림 2의 절연파괴에 이르지 않은 경우의 전압과 전류 파형과 매우 흡사한 패턴이다. 절연파괴를 일으킨 임펄스전압과 전류 파형의 특징을 보면 접지전극에 임펄스전압이

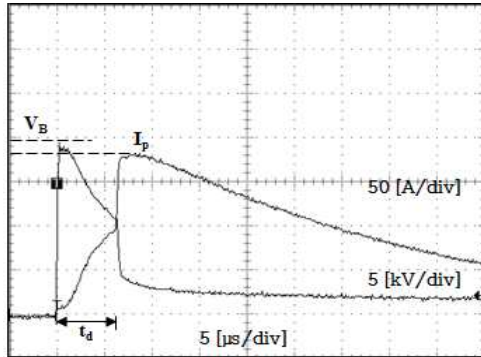


그림 5 전형적인 임펄스절연파괴전압과 전류의 파형
 Fig. 5 Typical oscillograms of impulse breakdown voltage and current

가해졌을 때 접지전극의 주위에서 도전전류에 의한 가열로 토양의 이온화가 개시된다. 그 후 에너지의 주입으로 토양의 온도가 상승하고 이온화가 가속되어 스트리머가 확장되는 열적메커니즘으로 완성되는 것으로 보인다[14]. 기중 방전과는 다르게 전극 사이에서 절연파괴를 일으킨 경우에도 토양의 전압강하에 의해 상당한 정도의 잔류전압이 나타난다.

3.2.1 절연파괴전계의 세기

임펄스전류가 접지전극에 흐르면 접지전극의 주변에는 전계가 형성된다. 만약 접지전극 표면의 전계의 세기가 토양의 절연파괴를 일으킬 수 있는 전계의 세기보다 더 크면 접지전극 주변에서 방전이 발생하게 된다. 다시 말하면 식 (3)으로 나타낸 접지전극 표면의 전계의 세기가 임계값보다 큰 범위에서 방전이 일어나게 된다[15].

$$E_c = \rho \cdot J_c \tag{3}$$

본 연구에 적용한 동심반구형 전극계에서 토양의 절연파괴를 일으킨 때 접지전극 표면의 전계의 세기는 다음의 식 (4)과 같이 표현된다[16].

$$E(r_1) = \frac{V_c}{r_1^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \tag{4}$$

여기서,

- r_1 : 반구형 접지전극의 반경 (12 [mm])
- r_2 : 반구형 실험용기의 반경 (100 [mm])
- V_c : 절연파괴전압 [kV]

이다.

접지전극 주위의 토양에서 개시된 이온화에 의해 절연파괴를 일으킨 때 전계의 세기가 가장 높은 접지전극 표면에서의 전계의 세기를 산출하였다. KS C IEC-60060-1표준[17]에 따른 승강법

으로 10회 측정된 절연파괴전압의 측정값을 식 (4)에 대입하여 절연파괴가 일어나는 전계의 세기를 계산하였다. 정극성 또는 부극성의 뇌임펄스전압을 접지전극에 가하여 측정된 절연파괴전압의 비교를 그림 6에 나타내었다.

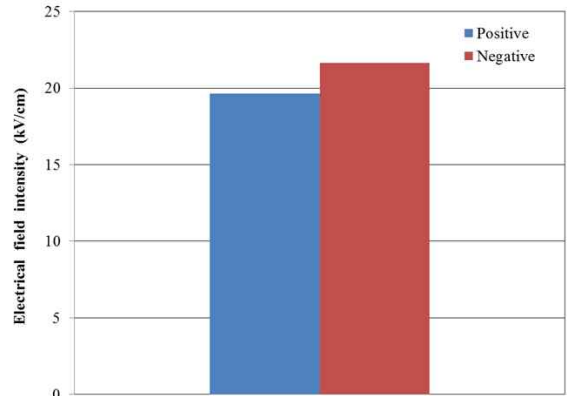


그림 6 토양의 절연파괴가 일어난 때 접지전극 표면의 전계의 세기

Fig. 6 Electric field intensity on the electrode surface as the electrical breakdown in soil is occurred

토양의 절연파괴가 일어난 때 전계의 세기가 가장 낮은 실험 용기 내표면에서 전계의 세기는 약 0.30 [kV/cm]이다. 따라서 전극 간의 전계분포는 매우 불균등하다고 볼 수 있다. 절연파괴가 일어난 때 접지전극 표면 근방에서 전계의 세기는 약 20 [kV/cm]정도이며, 토양의 이온화 작용이 매우 강렬하게 발생하고, 스트리머의 성장과 도전채널의 형성으로 방전이 진전된 것으로 보인다. 그림 6에서 보는 바와 같이 정극성에 비해 부극성의 절연파괴전계의 세기가 약간 높게 나타났다. 이것은 불평등전계 중의 기중방전에서의 같이 정극성의 절연파괴전압이 부극성에 비해 낮은 현상으로 설명할 수 있다. 본 연구에서의 지중방전현상은 주로 모래 입자 사이의 공극에서 일어나기 때문에 기중방전현상과 비슷한 양상인 것으로 보인다.

3.2.2 절연파괴전압-시간특성

절연파괴전압-시간곡선(Breakdown voltage-time curve: $V-t$ 곡선)은 접지시스템의 뇌임펄스응답특성을 파악하는데 매우 중요한 역할을 한다. 시료토양으로 채워진 접지전극 사이에 임펄스전압이 가해진 경우 즉시 불꽃방전으로 이루어지지 않고 어느 정도의 시간이 요구된다. 절연파괴에 이르기까지 지연되는 시간은 뇌임펄스전압의 크기와 상승률, 토양 내의 공극, 전극의 형상과 표면상태, 토양 내의 수분함유율 등 다양한 파라미터의 영향을 받는다. $V-t$ 곡선은 KS C IEC 60060-1표준[17]에 따라 절연파괴가 일어나기 이전에 가해진 최고전압과 절연파괴까지의 지연시간으로 작도한다. 정극성과 부극성 임펄스전압을 가하여 측정된 결과인 $V-t$ 곡선을 그림 7에 나타내었다.

토양의 절연파괴는 대부분 임펄스전압의 파미에서 일어났으며,

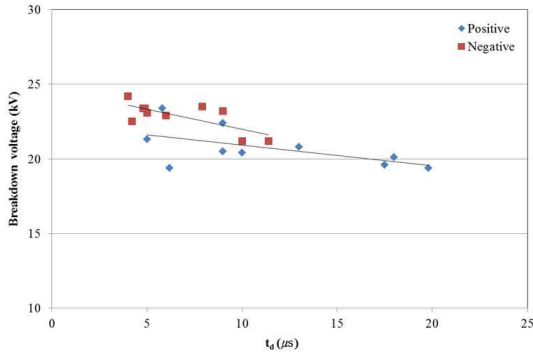


그림 7 V-t 곡선
Fig. 7 V-t curves

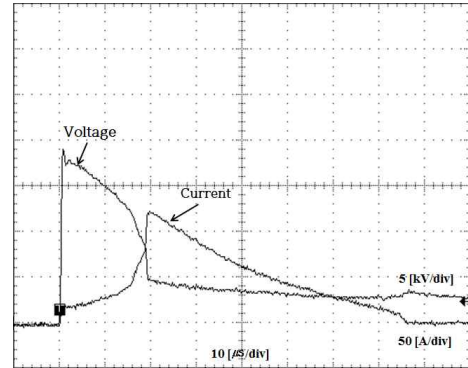
절연파괴까지의 시간지연은 비교적 길게 나타났다. 정극성의 경우 방전지연시간은 약 6 μs 에서 20 μs 범위이고, 부극성은 약 4 μs 에서 11 μs 범위로 정극성이 부극성에 비해 방전지연시간이 비교적 길게 측정되었다. 이러한 결과는 시료인 모래에 수분이 함유되어 있으므로 입사전류에 의해 토양에 에너지가 주입되어 온도상승이 일어나고 이온화가 가속화되기까지 시간이 소요되기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 토양의 이온화와 스트리머의 진전이 열적 메커니즘으로 이루어지는 것을 시사한다.

3.2.3 접지저항의 과도적 특성

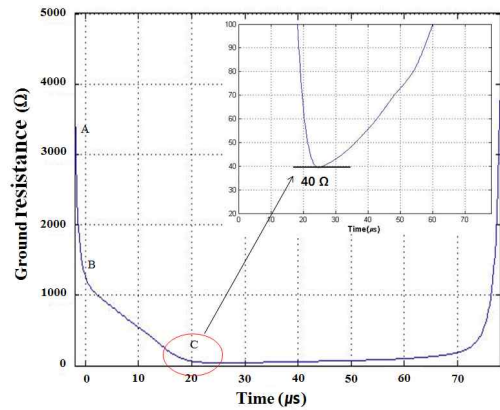
토양의 절연파괴가 일어난 때 접지저항이 변동하는 특성을 분석하기 위해 반구형 전극계에서 뇌임펄스전압에 대한 모래의 절연파괴전압과 방전전류 파형의 오실로그래프 및 Matlab프로그램으로 산출한 Z-t곡선과 V-I곡선의 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 8(a)는 시료인 모래로 채워진 반구형 접지전극에서 절연파괴가 발생한 때의 전압과 전류 파형의 오실로그래프이다. 절연파괴가 발생한 시점에서 전압이 급격히 저하하고 전류가 급상승하는 전형적인 전기적 방전의 양상을 나타내었다. 전류 파형은 과열불안정진전에 의한 스트리머의 성장과 교락하는 과정을 거쳐 절연파괴로 급격히 증가하였다[14]. 이에 상응하는 전압은 최대점을 지나 서서히 감소하다가 절연파괴에 의해 급락하였다. 다시 말하면 전극 갭에서 최종 섭락이 일어나기 전에 접지전극 주위의 토양에서 스트리머방전이 활발히 진전되고 있음을 알 수 있다. 지중의 접지전극 주위에 발달된 이온화영역을 넘어 불꽃방전으로 진전됨을 알 수 있다.

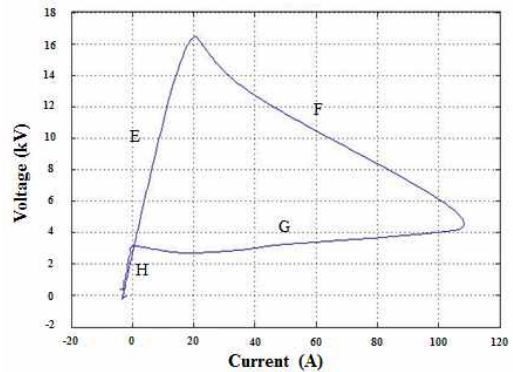
그림 8(b)에 나타난 Z-t곡선의 A-B구간에서 최대전압에서 과열불안정진전이 시작되어 토양의 온도상승이 이루어지는 것으로 생각된다. B-C구간은 접지전극 근처에서 발생한 스트리머의 진전으로 접지전류가 증가하여 저항이 감소하는 영역으로 플라즈마채널이 성장하는 동안 추가적인 가열과 관련이 있는 것으로 보인다. C점에서 전극 갭이 교락되어 전류가 급증한 후 차차 감소하며, 전위도 서서히 감소하지만 탈이온화에 의해 접지저항은 서서히 증가하며 최종에는 원래의 상태로 회귀한다. 절연파괴상태에서 토양의 전기저항은 약 40 [Ω] 정도로 절연파괴 이전보다 약 1/100배 이하로 저감된다.



(a) 절연파괴전압과 전류의 파형



(b) Z-t곡선



(c) V-I 곡선

그림 8 절연파괴가 일어난 때 전압과 전류 파형, Z-t곡선 및 V-I 곡선

Fig. 8 Voltage and current traces, Z-t curve and V-I curve as the electrical breakdown in soil is occurred

토양의 이온화와 절연파괴에 의해 전류가 급격히 증가하고 전압이 감소하므로 V-I 곡선은 시계방향으로 회전하는 폐곡선을 그리게 된다. V-I 곡선이 시계방향으로 회전하는 것은 전류의 증가에 따라 접지저항의 감소를 나타내는 것이다. 그림 8(c)에 나타

낸 $V-I$ 곡선의 E부분은 임펄스전압이 가해져 최대값에 이르기 까지 전압의 상승부에 대한 응답으로 토양의 온도상승과 이온화가 없어 선형적으로 증가하였으며, 기울기가 전극 간의 토양저항이다. 전압이 최대값에 도달한 이후에 $V-I$ 곡선은 감쇠하기 시작하여 초기 상태로 되돌아온다.

4. 결 론

본 논문에서는 뇌임펄스전압에 대한 토양의 방전특성을 고려한 합리적인 피뢰설비용 접지시스템의 설계 및 해석을 위한 기초 자료를 확보하기 위해서 접지전극 주변에서 발생하는 토양의 이온화에 따른 임펄스절연과괴전압과 전류를 측정하고, 절연과괴특성을 평가하는 실험적 연구의 결과를 기술하였다. 임펄스전압과 방전전류를 기반으로 토양의 절연과괴특성을 $V-I$ 곡선과 $Z-t$ 곡선으로 평가하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피뢰설비용 접지시스템의 성능은 정상상태 접지저항을 지표로 평가하는 방식을 탈피하고, 토양의 이온화 현상과 관련된 과도접지저항을 고려하여 접지시스템을 설계하는 것이 바람직함을 확인하였다.

(2) 토양의 이온화 및 절연과괴에 의해 접지저항은 급격히 감소하였으며, 입사전류의 증가에 따라 이온화 성장의 최대가 되는 시간은 짧아지며, 이온화가 급속히 이루어짐을 알 수 있다.

(3) 정극성 임펄스전압에 대한 절연과괴전압은 부극성보다 낮게 나타났으며, 방전지연시간은 정극성이 길게 나타났다. 접지전극에 임펄스전류가 입사되면 도전전류에 의한 토양의 가열과 이온화 성장을 거쳐 절연과괴에 이르며, 전위상승과 접지저항이 과도적으로 급감하는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 접지시스템의 과도적인 성능의 평가에 기반이 되고, 뇌방호를 위한 접지시스템의 성능 향상을 위한 유용한 기초자료로 활용될 것으로 기대되며, 실용화와 실증을 위한 지속적인 연구가 요망된다.

감사의 글

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

References

[1] X. Wen, Z. Feng, H. Lu, X. Tong, L. Lan, W. Chen, and B. Tan, "Sparkover observation and analysis of the soil under the impulse current", IET Sci. Meas. Technol., Vol. 10, Iss. 3, pp. 228-233, 2016.
 [2] J. He and B. Zhang, "Progress in Lightning Impulse

Characteristics of Grounding Electrodes With Soil Ionization", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 51, No. 6, pp. 4924-4933, 2015.
 [3] L. M. Vasilyak, et al, "Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading", J. Phys. D. Appl. Phys. 48(2015), 285201 (pp. 7)
 [4] I. F. Gonos and I. A. Stathothopoulos, "Soil ionization under lightning impulse voltages", IEE Proc. Sci.- Meas. Tech., Vol. 151, No. 5, pp. 343-346, 2004.
 [5] S. Sekioka, M. I. Lorentzou, M. P. Philippakou, 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.
 [6] P. Chowdhuri, "Impulse impedance tests on laboratory model ground electrodes" IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 150, No. 4, pp. 427-433, 2003.
 [7] 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.
 [8] 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.
 [9] L. M. Vasilyak, et al, "Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading", J. Phys. D. Appl. Phys. 48(2015), 285201 (pp. 7)
 [10] B. H. Lee, H. G. Kim, G. H. Park and Y. H. Baek, "Ionization Behaviors in various Soils Subjected to Impulse Currents", J. KIIEE, Vol. 22, No. 12, pp. 87-94, 2008.
 [11] B. H. Lee, G. H. Park, H. G. Kim and K. S. Lee, "Analysis of Soil Ionization Behaviors under Impulse Currents", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 98-105, 2009.
 [12] 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.
 [13] 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.
 [14] V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vettchinin, V. Y. Pecherkin, and E. E. Son, "Pulsed electrical discharge in conductive solution", J. Phys. D. Appl. Phys. 49(2016), 385202 (pp. 9)
 [15] Bok-Hee Lee, Seung-Chil Lee, "The Major Foundational Technics for Grounding Systems", Euijae Pub. Co. 2nd

Ed., pp. 37-104, 1999.

- [16] 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.
- [17] KS C IEC 60060-1 Std, Part 1-Guide on High-Voltage Testing Techniques, pp. 22-27, 2002.

저 자 소 개



김 회 구 (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.



이 복 희 (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. 2010~2011년 한국조명전기설비학회 회장. 현재 인하대 공대 전기공학과 교수.