

수중에 잠긴 접지전극 주변에서의 이온화에 의한 전위저감 및 에너지방출

(Potential Reduction and Energy Dispersion Due to Ionization Around the Submerged Ground Rod)

최종혁* · 안상덕 · 양순만 · 이복희

(Jong-Hyuk Choi · Sang-Duk Ahn · Soon-Man Yang · Bok-Hee Lee)

요 약

심매설 접지봉의 경우 장마철에 빗물이나 지하수와 접촉하는 경우가 발생한다. 수중에 잠겨있는 접지극에 서지 전압이 인가되면 접지극 주변에서 이온화 현상이 발생하게 된다. 지중이나 수중에서의 이온화 현상은 접지 시스템의 에너지적인 특성에 의해 영향을 받는다. 이 논문의 목적은 축소된 전해 수조를 이용하여 임펄스 전압에 의한 접지 시스템의 과도특성을 파악하는데 있다. 매트랩 프로그램을 활용하여 이온화에 의한 전위저감과 방출된 에너지를 측정하여 정량적인 분석을 수행하였다. 접지극 끝단의 최대 전압은 물의 저항률과 Marx형 전압발생장치의 충전전압에 따라 다양하게 나타났다. 접지극 끝단의 전위는 절연파괴전압에 이르기 전 인가전압에서 대략 절반까지 감소하였다. 또한 절연파괴가 발생하기 전 인가된 에너지의 절반 이상의 에너지가 이온화에 의해 접지극을 통하여 방출되었다.

Abstract

Deeply-driven ground rod in the rainy season may contact with rainwater and ground water. When surge voltages are applied to the submerged ground rods, the ionization around the ground rods are occurred. Ionization in soil and/or water is affected in dynamic performance of ground rod systems. This work aims at studying the transient performance of ground rod system under impulse voltage using scale model in an electrolytic tank. The potential reduction and energy dispersion caused by ionization were measured and quantitatively analyzed using the Matlab Program. As a result, the peak voltage at the terminal of ground rod was varied with water resistivity and charging voltage of Marx generator. The potential at the terminal of the ground rod was approximately reduced to a half of the applied voltage just below breakdown voltage. Also the energy more than half of the applied energy was dispersed through the ground rod due to ionization just below breakdown voltage.

Key Words : Deeply-Driven Ground Rod, Soil Ionization, Potential Reduction at the Terminal of Ground Rod, Energy Dispersion, Impulse Voltage

* 주저자 : 인하대학교 대학원 박사과정

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822, E-mail : chjoHy80@naver.com

접수일자 : 2008년 9월 30일, 1차심사 : 2008년 10월 8일, 심사완료 : 2008년 10월 16일

1. 서 론

임펄스전압이 인가된 경우 접지전극에 나타나는 과도현상은 크게 비방전영역과 방전영역으로 나눌 수 있다. 비방전영역의 경우 접지전극 자체의 저항, 인덕턴스와 커패시턴스 등의 회로적인 요소 및 서지와 같이 고주파를 포함하는 전류의 특성에 의해 나타난다. 방전영역의 경우 접지전극에 매우 높은 임펄스전압이나 전류가 인가되었을 때 일정한 전계 이상에서 접지전극 주변에 이온화가 발생하여 더욱 복잡한 현상으로 나타난다[1].

접지전극 주변에 발생하는 방전으로 인한 접지저항의 변화를 여러 문헌들에서 이온화 현상으로 설명하고 있으며 그러한 과도 특성을 파악하기 위해 여러 실험적인 연구들이 수행되었다[2-3]. 이러한 방전영역에서의 과도특성은 심매설 접지전극과 같이 땅속 깊은 곳에 묻혀 지하수와 접촉되거나 장마철과 같이 비가 많이 내리는 계절에 수중에 잠겨있는 접지전극에서도 발생한다[4]. 하지만 아직까지 수중에 잠겨 있는 접지전극에 대한 이온화 현상에 대한 연구가 충분히 이루어지지 못하였다. 지금까지 연구된 접지전극 주변의 이온화 현상에 대한 연구들도 대부분 접지저항이나 시간적 요소들에 국한되어 있다. 이러한 이온화 현상이 발생할 수 있는 피뢰접지는 높은 전압이나 전류가 침입할 수 있는 조건이기 때문에 단순히 저항적인 요소가 아닌 안전성에 직접 연관되는 전위상승 측면과 에너지 방출에 대한 분석이 수행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 수중에 잠긴 접지전극 주변에 발생한 이온화에 의한 전위저감과 에너지방출을 평가하기 위해 대지를 모의하는 반구형 수조와 접지전극을 모의하는 도체를 이용하여 물의 저항률과 임펄스전압발생장치의 충전전압에 따른 전위저감과 에너지방출을 정량적으로 분석하였다.

2. 실험계의 구성 및 방법

임펄스전압에 의해서 수중에 잠긴 접지전극의 주변에서 발생하는 이온화 현상을 모의하기 위해서 그림 1과 같이 대지를 모의하는 직경 110[cm]의 반구

형 수조를 제작하였다. 접지전극에서 이온화가 발생할 때 나타나는 방전광의 촬영을 위해 두 개의 관측창을 90[°]를 이루게 설치하였다. 봉형 접지전극을 모의하여 직경 3[mm]의 침전극을 수조의 중앙에 설치하였다. 또한 표준뇌임펄스전압을 전극에 인가하기 위하여 400[kV], 20[kJ]의 용량을 갖는 Marx형 임펄스전압발생장치를 사용하였으며, 용량성 분압기와 감쇠기를 이용하여 10,000:1의 비율로 전압을 측정하였다. 방전시에 갭을 통해 흐르는 전류를 측정하기 위하여 접지와 수조 사이에 0.02[Ω]의 분류기를 연결하였다. 분압기와 분류기의 신호는 400[MHz] 대역폭의 4채널 오실로스코프로 측정하였다.

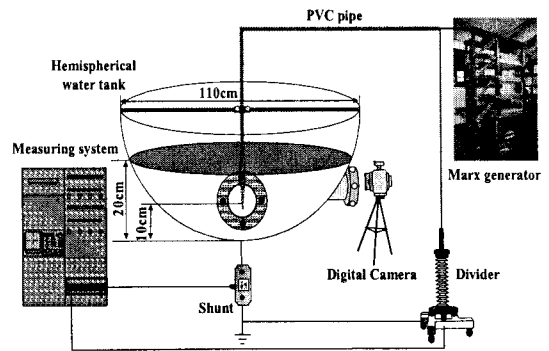


그림 1. 실험계의 구성
Fig. 1. Configuration of the experimental setup

일반적인 토양의 저항률은 100[Ω · m] 정도인 것으로 알려져 있으며 본 실험에 앞서 예비 실험을 통해 이온화가 뚜렷히 나타나는 10[Ω · m]에서 200[Ω · m]까지를 연구의 범위로 선정하였다. 물의 저항률은 지하수에 많이 함유되어 있는 NaCl을 첨가하여 저항률을 조절해 가며 실험하였으며 전기전도도 측정기를 사용하여 측정하였다. 전위저감과 에너지방출량을 분석하기 위해 전압과 전류 파형을 측정하여 매트랩 프로그램(Matlab program)을 이용하여 분석하였으며 임펄스전압 발생장치의 충전전압에 따라 전위저감과 에너지방출에 대한 정량적인 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수중에서의 이온화 현상

수중에 설치된 접지도체에 일정한 전계 이상이 인가되면 그림 2 (a)와 같이 접지전극 주변에 이온화 현상이 나타난다. 이러한 이온화 현상은 접지전극 주변에 인가된 높은 전계로 인해 전리가 발생하고 스트리머가 진전하여 이온화 영역이 형성되는 것을 의미한다. 이렇게 생성된 이온화 영역은 전기전도도가 매우 높기 때문에 확장된 접지도체의 역할을 하여 접지저항이 낮아지는 효과를 나타내게 된다.

접지저항의 감소는 이미 토중에서의 이온화 현상에 대한 문헌들에서 언급이 되었으며[5-6], 그림 2 (b)와 같이 이온화 현상을 나타내는 전형적인 임펄스전압과 전류 파형을 통해서도 확인된다. 이온화가

발생하는 순간 전압 파형은 감소하게 되고 전류 파형은 증가하여 비선형적인 특성을 나타내게 되며 저감된 전압과 증가된 전류로 인해 저항이 급격하게 감소됨을 확인할 수 있다.

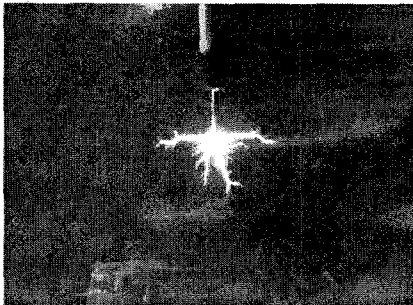
3.2 이온화에 의한 전위저감

앞에서 언급된 수중방전의 이온화 특성은 토중방전의 결과와 유사한 점이 많고 이미 여러 가지 요소들이 분석되었다. 하지만 접지저항의 감소 이외에 실제 접지전극에 이온화가 발생하였을 때 나타나는 이점은 인체 및 전자기기의 안전성과 직접 연관되는 전위저감을 통해 더욱 명확히 밝혀진다. 그림 2 (b)의 전압 파형을 보면 전도성 전류에 의한 파두부 전위상승의 억제와 이온화가 발생하였을 때의 파미부에서 전위가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 전위저감을 정량적으로 평가하기 위해 이전에 수행된 연구결과와 매틀랩 프로그램을 이용하여 전위저감에 대하여 평가하였다[7].

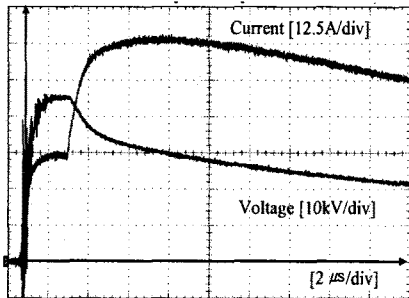
접지전극에 인가되는 전압은 이온화의 유무에 상관없이 충전전압에 비례한다. 또한 이전의 이온화에 대한 연구에서 이온화가 발생하지 않았을 때 시간에 따라 저항변화가 발생하지 않고 모든 저항률에서 이온화 이전 저항은 인가된 전압에 무관하게 일정하기 때문에 동일한 저항률의 부하에서 이온화가 발생하지 않는다면 전압 파형은 충전전압에 비례한다.

따라서 이온화가 발생하지 않았을 때의 전압 파형을 이용하여 인가전압에 비례하여 전압 파형을 확대하면 높은 전압에서 이온화가 발생하지 않았을 때의 파형을 얻을 수 있다. 또한 여기서 이온화가 발생하였을 때의 파형을 빼주면 그 차가 이온화에 의해 저감된 전위라 할 수 있으며, 이러한 과정을 그림 3 (a)에 나타내었다.

이온화 현상이 발생하지 않은 30[kV]의 충전전압의 전압 파형을 이용하여 이온화가 발생된 80[kV]의 충전전압의 이온화가 발생되지 않은 가상의 파형을 만들어 이온화가 발생한 실제 파형을 빼주면 그 면적이 이온화에 의해 저감된 전위를 의미하게 된다. 이렇게 저감된 전위의 파형을 그림 3 (b)에 나타내었다. 이온화에 의해 저감된 전위 파형은 임펄스와 비



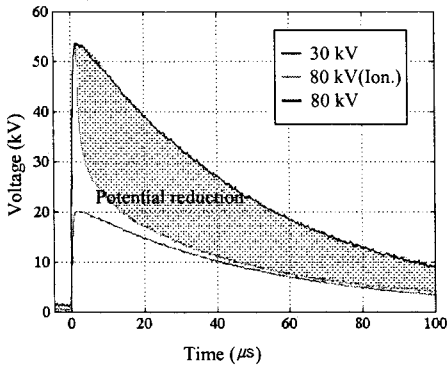
(a) 이온화에 의한 방전광



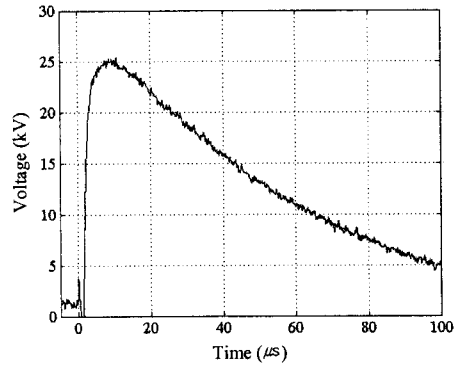
(b) 이온화에 의한 전압과 전류 파형의 예

그림 2. 이온화에 의한 전형적인 방전광 및 전압과 전류 파형의 예

Fig. 2. Typical examples of the discharge light image and current waveforms caused by ionization



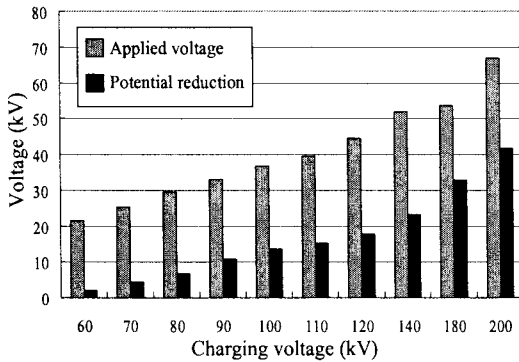
(a) 저감된 전위 파형의 산출



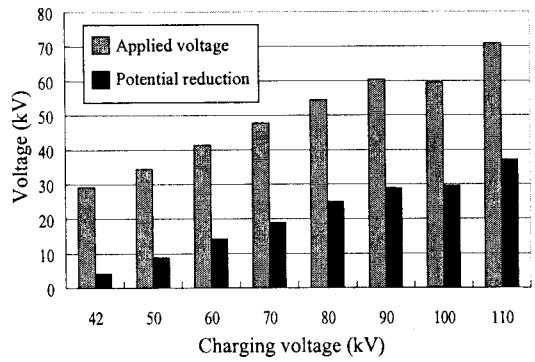
(b) 저감된 전위 파형

그림 3. 매텔랩 프로그램을 이용한 전위저감의 산출

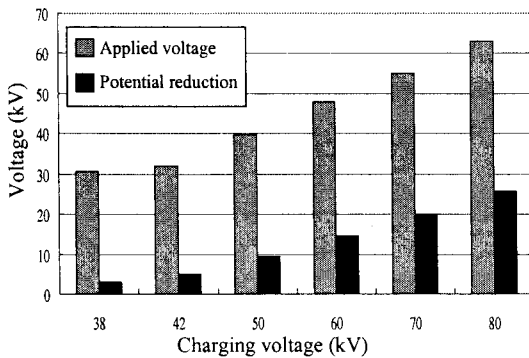
Fig. 3. Calculation for the potential reduction using Matlab program



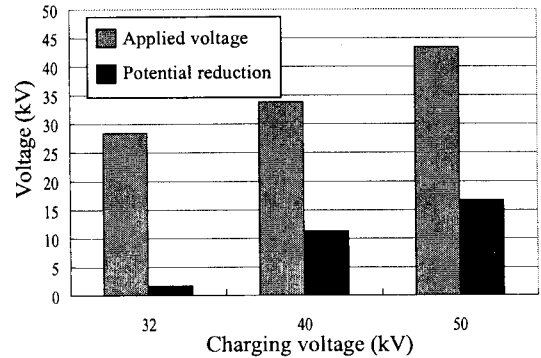
(a) 10(Ω · m)



(b) 50(Ω · m)



(c) 100(Ω · m)



(d) 200(Ω · m)

그림 4. 저항률별 충전전압에 따른 인가전압 및 전위저감

Fig. 4. Applied voltage and potential reduction as a function of charging voltages in different water resistivities

슷한 형태를 나타내었으며 파형의 시작은 전위가 감소하는 시간과 동일하게 나타났다.

각각의 저항률에 대하여 충전전압에 따라 접지전극에 인가되는 전압과 이온화에 의한 전위저감을 정량적으로 그림 4에 나타내었다. $200[\Omega \cdot m]$ 의 비교적 높은 저항률의 경우 이온화가 발생하는 전압의 범위가 매우 낮기 때문에 데이터의 수가 적으며 저항률이 낮을수록 이온화가 발생하는 충전전압의 크기와 범위가 증가하는 것을 알 수 있다. 이온화에 의해 저감된 전위를 분석해 보면 모든 저항률에서 충전전압이 높아질수록 접지전극에 인가되는 전압과 전위저감이 증가하는 것으로 나타나며 본 실험계에서 이온화가 발생하는 최소조건은 저항률 $200[\Omega \cdot m]$ 의 수중에서 $32[kV]$ 의 충전전압에서 발생하는 것을 알 수 있다.

전위저감은 충전전압을 높일수록 인가전압의 절반정도에 이르는 것으로 나타났으며, $10[\Omega \cdot m]$ 와 같이 낮은 저항률에서는 임펄스전압발생기의 충전전압을 높일수록 접지전극에 인가되는 전압의 증가율에 비해 전위저감의 증가율이 더욱 커지는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 보아 접지전극 주변의 토양의 저항률이 낮을수록 접지저항이 작으며, 접지전극의 전위상승이 저감되는 측면 외에 추가적으로 이온화의 발생에 의해 그 주변의 전위저감이 크게 되어 인체에 대한 위험전압을 낮추는데 효과적이라 분석된다.

3.3 이온화에 의한 에너지방출

접지전극의 성능평가를 위해서는 접지전극에 인가되는 에너지와 방출되는 에너지와의 관계를 분석할 필요가 있다. 이 또한 선행되었던 실험결과들과 매틀랩 프로그램을 활용하여 분석이 가능하다. 앞절에서 저감된 전위 파형의 산출과는 반대로 이온화가 발생하게 되면 전류 파형은 수중에 존재하는 이온성 전도전류에 이온화 전류가 더해진 파형으로 나타난다.

전위산출과 반대로 생각하면 이온화에 의한 전류의 증가분은 전체 전류에서 전도성 전류 파형을 빼주면 산출된다. 전위 파형에서의 가정과 마찬가지로 전도성 전류의 파형은 이온화가 발생하지 않았을 때

의 파형을 의미하기 때문에 파형의 형태가 동일하고 충전전압에 따라 첫 번째 전류피크의 크기에 비례하여 나타난다. 따라서 그림 5 (a)와 같이 이온화가 발생하지 않은 $30[kV]$ 충전전압에 대한 전류 파형을 이용하여 이온화가 발생하는 $80[kV]$ 충전전압에 대한 전도성 전류 파형을 생성하여 이온화가 발생한 원래의 전류 파형에서 빼주면 이온화에 의한 전류의 증가분을 구할 수 있게 되며, 그림 5 (b)는 이온화에 의한 전류의 증가분을 나타낸다. 이온화에 의한 전류의 증가분은 전위저감의 파형과 마찬가지로 임펄스 형태의 파형으로 나타나며 파형의 시작 또한 전위저감과 전류가 갑자기 증가하는 시간과 일치하였다. 이렇게 파형의 개시 시간과 형태가 동일한 원인은 이온화에 의해 저감된 전위만큼 접지전극 주변에 전리로 인한 전류가 증가하였기 때문인 것으로 볼 수 있다. 이온화에 의해 증가된 임펄스전류는 전체 파형에서 두 번째 전류 피크를 형성하는 역할을 한다. 그림 5 (c)의 그래프는 각각 이온화가 발생하지 않은 $30[kV]$ 의 충전전압에 대한 전체 전력 및 $80[kV]$ 충전전압에서 이온화에 의한 전력과 전체 전력을 전류와 전압의 곱으로 구한 순시전력의 파형이며, 그림 5 (d)의 파형은 전력 파형을 시간에 대하여 적분해 얻은 에너지를 나타낸다. 에너지 파형을 살펴보면 초기에 전압과 전류의 급격한 증가에 따라 증가하지만 $50[\mu s]$ 이후에는 거의 일정한 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

접지전극에 인가된 전체 에너지와 이온화에 의해 접지전극에서 방출된 에너지를 정량적으로 평가하기 위해 각각의 저항률에서 그림 5 (d)의 에너지 파형을 산출하여 충전전압에 따른 이온화 에너지를 분석하였으며, 저항률별 충전전압에 따른 전체 에너지와 이온화에 의해 방출된 에너지의 관계를 그림 6에 나타내었다.

그림 4의 전위저감에 대한 평가와 마찬가지로 높은 저항률에서는 이온화가 발생하는 충전전압의 범위가 좁고 저항률이 낮아질수록 이온화가 발생하는 범위가 확장되어 데이터 수가 증가하였다. 저항률 $50[\Omega \cdot m]$ 에서 $200[\Omega \cdot m]$ 의 범위에서 충전전압이 증가함에 따라 전체 에너지와 이온화에 의한 에너지 방출이 증가하고, 갭간의 섬락레벨보다 약간 낮은

전압에서 이온화에 의해 접지전극을 통하여 방출된 에너지는 대략 전체 에너지의 절반에 이르는 것으로 나타났다. 또한 동일한 충전전압에서 인가된 전체 에너지와 이온화에 의해 접지전극에서 방출된 에너지는 거의 비슷하게 나타났다.

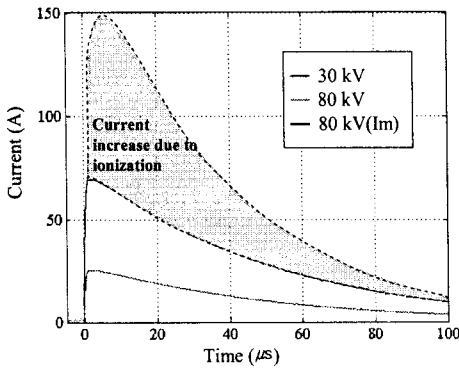
10[Ω·m]의 낮은 저항률의 경우 액체를 통해 흐르는 전도성 전류에 의해 200[kV]의 높은 충전전압에서도 인가전압은 66.8[kV]에 불과하고 이온화에 의한 방전광은 매우 미약하게 나타났으며, 400[kV]의 충전전압에서도 섬락이 발생하지 않기 때문에 전체 에너지에 비하여 이온화에 의한 에너지는 매우 작은 것으로 나타났다.

이온화의 유무에 상관없이 저항률이 낮아질수록

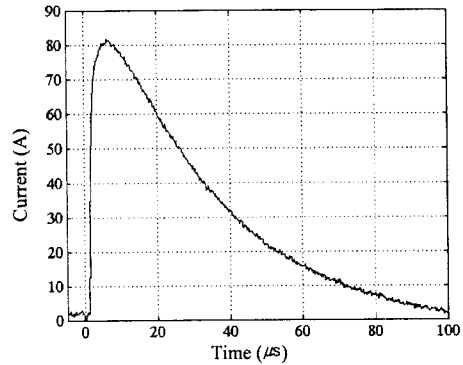
전체 에너지와 이온화에 의한 에너지의 방출이 증가하는 것으로 나타나기 때문에 접지전극을 저항률이 낮은 장소에 설치할수록 접지전극을 통하여 방출되는 전체 에너지와 이온화에 의한 에너지 모두 증가하여 접지전극의 기능인 입사한 불필요한 에너지를 안전하게 대지로 방출하는 효과적인 역할을 하므로 인체와 주변기기의 안전성을 확보하는 데 유리한 것으로 판단된다.

4. 결 론

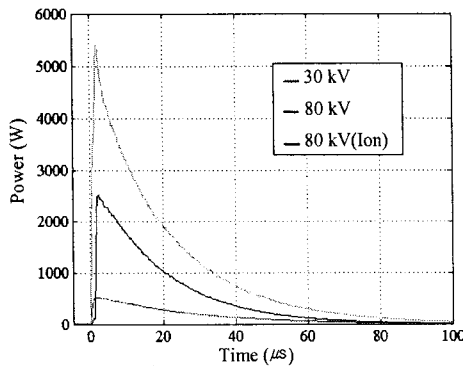
본 논문에서는 매텔랩 프로그램을 이용하여 이온화가 발생할 때 접지전극의 전위저감과 에너지방출



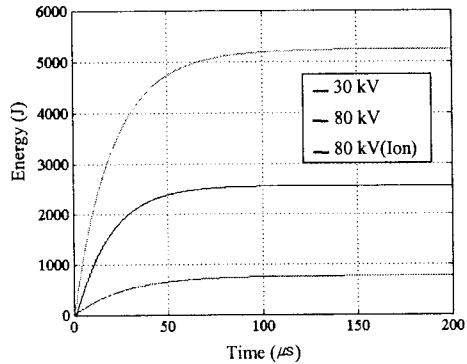
(a) 이온화에 의한 전류 증가분의 산출법



(b) 이온화에 의해 증가된 전류 파형



(c) 순시전력 파형



(d) 에너지 파형

그림 5. 이온화에 의해 증가된 전류 및 전력, 에너지 파형의 예

Fig. 5. Examples of increased current, power and energy waveforms caused by ionization

수중에 잠긴 접지전극 주변에서의 이온화에 의한 전위저감 및 에너지방출

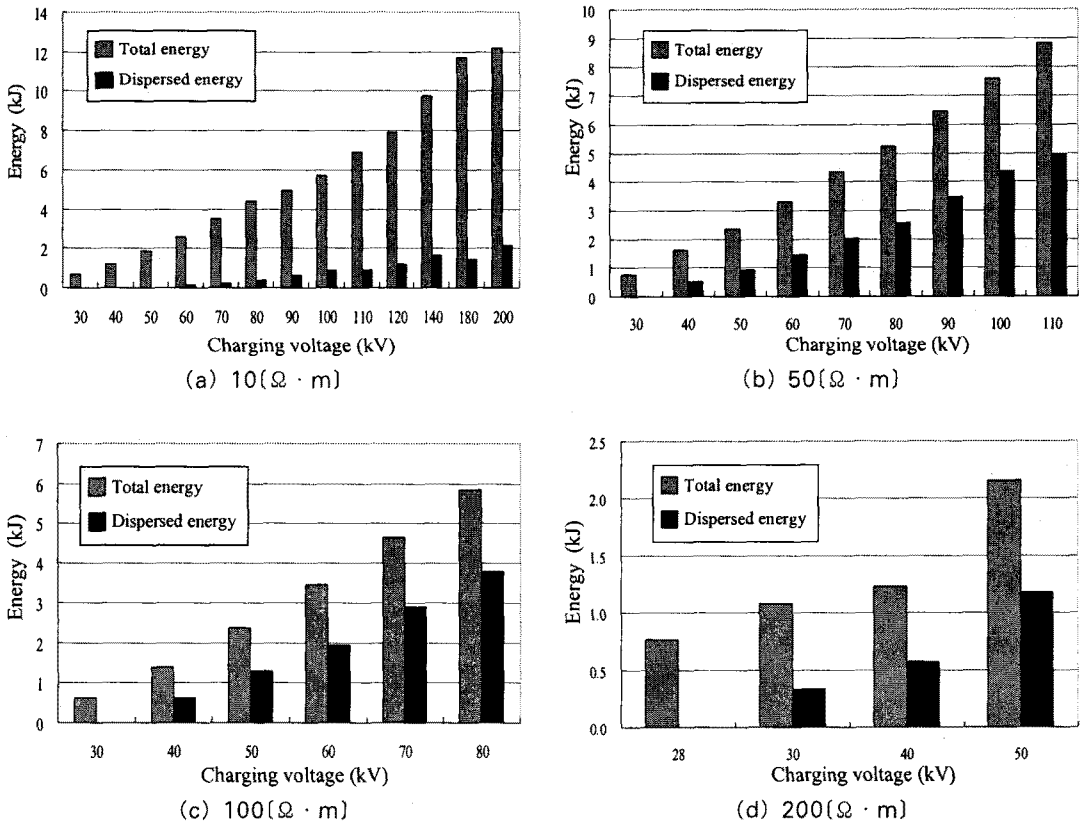


그림 6. 저항률별 충전전압에 따른 접지전극에 인가된 에너지와 이온화에 의해 방출된 에너지
 Fig. 6. Applied energy to ground rod and energy dispersed by ionization as a function of charging voltages for different water resistivities

을 임펄스전압발생장치의 충전전압에 따라 정량적인 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 모든 저항률에서 충전전압의 증가에 따라 접지전극에 인가되는 전압과 전위저감이 증가하였으며, 절연과피 직전의 전압에서 전위저감은 대략 인가전압에 절반에 이르는 것으로 나타났다. 또한 저항률이 낮을수록 접지전극의 전위저감의 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

② 저항률 50[Ω·m] 이상에서 섬락에 이르기 직전의 전압레벨에서 이온화에 의해 전체 에너지의 절반 이상이 접지전극을 통하여 방출되었다.

③ 피뢰설비용 접지전극을 시공할 때 대지저항률이 낮은 곳에 접지전극을 설치하여 이온화가 잘 발

생될 수 있는 조건을 갖추는 것이 필요하다. 또한 향후 실제 접지전극의 시공시 이온화가 잘 발생할 수 있도록 시공하는 기술의 개발과 적용이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

(1) R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar, "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Trans.

- PAS, Vol.100, No.11, pp.4653-4660, 1981.
- [2] T. Takahashi, T. Kawase, "Calculation of Earth Resistance for a Deep-driven rod in Multi-layer Earth Structure", IEEE Trans. on PD, Vol.6, No.2, pp.608-614, 1991.
 - [3] J. B. Rakov, M. A. Uman, M. I. Fernandez, C. T. Mata, K.J. Rambo, M. V. Stapleton, R. R. Sutil, "Direct lightning strikes to the lightning protective system of a residential building: triggered lightning experiments", IEEE Trans. on PD, Vol.17, No.2, pp.575-586, 2002.
 - [4] Pedro Llovera, Juan Antonio Lliso, Alfredo Quijano, Vicente Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", 28th ICLP, Vol.1, pp.727-729, 2006.
 - [5] M. Irfan Jambak, Hussein Ahmad, "Measurement of grounding system resistance based on ground high frequency behavior for different soil type", IEEE, TENCON 2000. Proceedings, Vol.3, pp.207-211, 2000.
 - [6] M. A. Abdallah, "High frequency performance of an earthing system", Proc. 13th ISH, pp.201-205, 2003.
 - [7] N. Mohamad Nor, "Characteristics of sodium chloride(NaCl) under DC, AC and impulse conditions", Proc. 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp.926-931, 2006.

안상덕 (安相德)

1965년 11월 24일생. 2006년 2월 한국교육개발원 졸업.
 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : (032)860-7398
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : jeungi@korea.com

양순만 (楊淳晩)

1961년 1월 24일생. 2004년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 박사과정.
 Tel : (02)6303-0290
 Fax : (02)6303-0744
 E-mail : smyang1@kumhoenc.com

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 부회장.
 Tel : (032)860-7398
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : bhlee@inha.ac.kr

◇ 저자소개 ◇

최종혁 (崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 2008년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 박사과정.
 Tel : (032)860-7398
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : chjohy80@naver.com