

# 수중에 잠긴 접지전극주변에서 이온화에 의한 전위저감 및 에너지 방출의 평가

(Evaluation of the potential reduction and energy dispersion caused by ionization phenomena at the submerged ground rod)

안상덕 · 최종혁 · 박건훈 · 양순만 · 이복희 · 안창현\*

( Sang-Duk An · Jong-Hyuk Choi · Geon-Hun Park · Soon-Man Yang · Bok-Hee Lee · Chang-Hwan Ahn )

인하대학교 IT공대 전기공학과  
인하공업전문대학 전기전자공학부\*

## Abstract

When high surge voltage invaded into the ground rod contacted with ground water, the ionization phenomena are happened in the water. Although some researchers have surveyed the ionization phenomena in soil, they have just analyzed the variation of the ground resistance. The most important role of the ground rod is to protect human beings from potential rise and to dissipate energy to the earth safely. In this work, we presented the method evaluating the potential reduction and energy dispersion. Also we analyzed theses factors as a function of charging voltages at the water resistivity of  $50 \Omega \cdot m$  using the Matlab Program. As a result, the ground rod potential was reduced to 38 kV by ionization just below breakdown voltage. The energy more than half of the total injected energy was dispersed through the grounding electrode caused due to ionization.

## 1. 서론

뇌서지와 같이 고전압과 대전류가 접지전극에 인가되게 되면 접지전극 주변에 전리가 발생하여 큰 방전전류가 흐르게 되고 이것으로 인한 접지저항의 변화를 여러 문헌들에서 토양의 이온화 현상으로 설명하고 있으며 그러한 과도 특성을 파악하기 위해 여러 실험적인 연구들이 수행되었다[1,2]. 접지전극에서 방전으로 인해 나타나는 과도특성은 토중 뿐 아니라 심매설 접지전극과 같이 땅속 깊은 곳에 묻혀 지하수와 접촉되거나, 장마철과 같이 비가 많이 내리는 계절에 수중에 잠겨 있는 접지전극에서도 발생한다[3]. 하지만 아직까지 물과 접촉되거나 수중에 잠겨 있는 접지전극에 대하여 방전으로 인한 과도적인 특성에 대한 연구가 이루어지지 못하고 있다. 최근 토중에서 수행된 접지전극 주변에서의 이온화 현상에 관한 연구결과들은 대부분 접지저항의 변화나 시간적 요소들에 한정되어 있다. 하지만 접지전극의 가장 중요한 역할인 안전을 고려할 때 접지전극 주변의 전위상승과 에너지의 방출에 대한 분석이 수행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 수중에 설치된 접지전극에서 이온화가 발생할 때의 전위저감과 이온화에 의해 방출된 에너지를 충전전압의 크기에 따라 정량적으로 분석하였다.

로 분석하였다.

## 2. 실험계의 구성 및 방법

수중에 잠긴 접지전극에 임펄스전압에 의해서 발생하는 이온화 현상을 모의하기 위해서 그림 1과 같이 대지를 모의하는 직경 110 cm의 반구형 수조를 제작하였다. 접지전극에서 이온화가 발생할 때 나타나는 방전광의 촬영을 위해 두 개의 관측창을 90°를 이루게 설치하였다. 접지전극을 모의한 직경 3 mm의 침전극을 수조 중앙에 설치하였다.

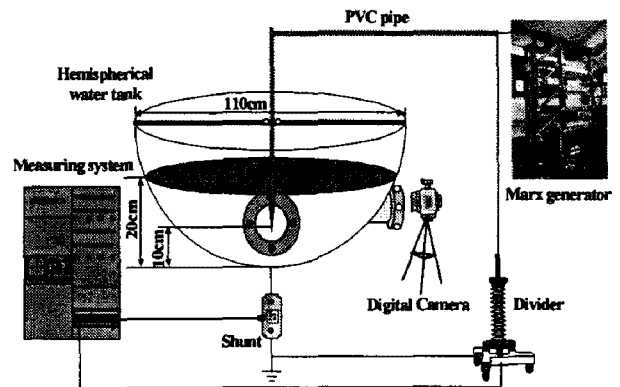


그림 1. 실험계의 구성  
Fig. 1. Configuration of the experimental set up

뇌서지가 접지전극에 침입하는 것을 모의하기 위해 400 kV, 20 kJ의 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 Ω의 분류기(shunt)를 연결하였다. 분압기와 분류기의 신호는 400 MHz 대역폭의 4채널 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

본 실험에 앞서 예비 실험을 통해 이온화가 가장 뚜렷히 나타나는 50 Ω·m의 물의 저항률을 선정하여 실험을 진행하였다. 전위저감과 에너지방출을 분석하기 위해 전압과 전류 파형을 측정하여 매틀랩 프로그램을 이용하여 분석하였으며 임펄스전압 발생장치의 충전전압에 따라 전위저감과 에너지방출에 대한 정량적인 분석을 수행하였다.

### 3 실험결과 및 고찰

수중에 설치된 접지도체에 일정한 전계 이상이 인가되면 그림 2와 같이 접지전극 주변에 이온화 현상이 발생한다. 이러한 이온화 현상은 접지전극 주변에 높은 전계로 인해 전리가 발생하고 스트리머가 진전하여 이온화 영역을 형성하는 것을 의미한다. 이렇게 형성된 이온화 영역은 전도도가 매우 높기 때문에 확장된 접지도체의 역할을 하여 접지 저항이 낮아지는 효과를 나타내게 된다. 접지저항의 감소 효과는 이미 토중에서의 이온화 현상에 대한 문헌들에서 언급이 되었다[4,5].



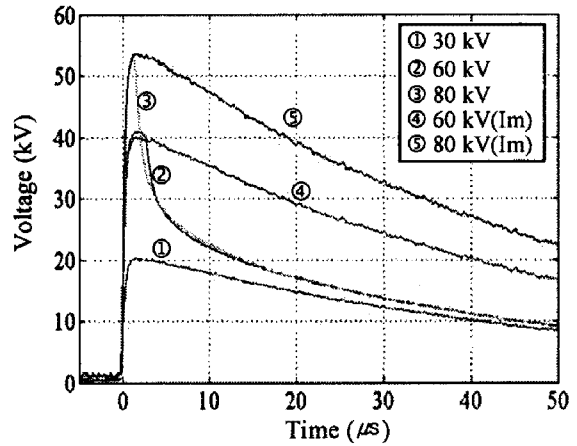
그림 2. 수중에서의 이온화에 의한 방전광 사진  
Fig. 2. A photograph of discharge luminous image caused by ionization in the water

#### 3.1 이온화에 의한 전위저감

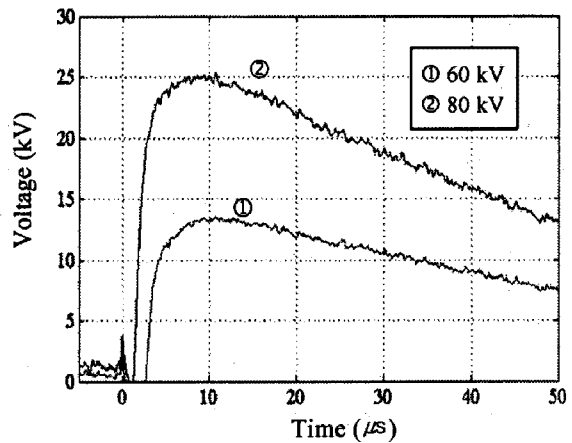
접지전극에 인가되는 전압은 임펄스발생장치의 충전전압에 비례하며 이온화가 발생하지 않았을 때 시간에 따라 저항변화가 발생하지 않고 모든 저항률에서 이온화 이전 저항은 인가된 전압에 무관하게 일정하기 때문에 동일한 저항률의 부하에

서는 이온화가 발생하지 않는다면 전압 파형은 충전전압에 비례한다[6].

이온화가 발생하지 않았을 때의 전압 파형을 이용하여 인가전압에 비례하여 전압 파형을 확대하면 높은 전압에서 이온화가 발생하지 않았을 때의 파형을 나타낼 수 있다. 또한 여기서 이온화가 발생하였을 때의 파형을 빼어 주면 그 차가 이온화에 의한 전위저감이라 할 수 있다.



(a) 전위저감 파형의 산출



(b) 전위저감파형

그림 3. 매틀랩 프로그램을 이용한 전위저감의 산출  
Fig. 3. Calculation for the potential reduction using Matlab Program.

그림 3은 이온화에 의한 전위저감을 산출하는 과정을 나타낸다. 이온화 현상이 발생하지 않은 30 kV의 충전전압에서의 전압 파형을 이용하여 이온화가 발생된 60 kV와 80 kV의 충전전압에서의 이온화가 발생되지 않은 가상의 파형인 60 kV와 80 kV의 전류파형을 만들어 이온화가 발생한 실제 파형을 빼어주면 그 면적이 이온화에 의한 전위저감을 의미하게 된다. 이렇게 저감된 전위의 파형을 그림 3(b)에 나타내었다. 이온화에 의해 저감된 전위 파형은 임펄스와 비슷한 형태를 나타내었으

며 파형의 시작은 전위가 저감되는 시간과 동일하게 나타났다. 충전전압이 80 kV일 때 25 kV의 전위가 저감되었고 60 kV의 충전전압에서 약 14 kV의 전위가 저감되었다. 50 Ω·m의 저항률에서 충전전압의 크기에 따른 저감된 전위의 크기에 대한 정량적인 데이터를 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 이온화에 의한 전위저감을 분석해 보면 충전전압이 높아질수록 접지전극에 인가되는 전압과 전위저감이 증가하는 것으로 나타나며 본 실험계에서 이온화가 발생하는 조건은 약 29 kV 이상의 인가전압에서 발생한다는 것을 알 수 있다. 전위저감은 충전전압을 높일수록 인가전압의 절반 정도에 이르는 것으로 나타났다.

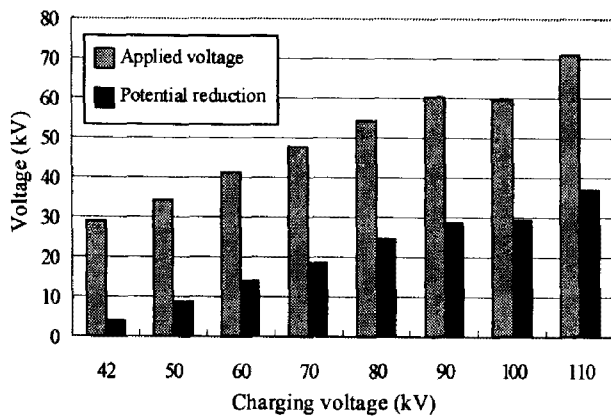


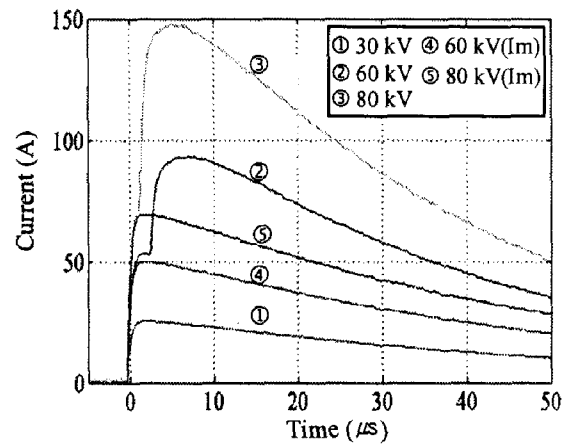
그림 4. 50 Ω·m의 저항률에서 충전전압에 따른 인가 전압 및 전위저감

Fig. 4. Applied voltages and potential reduction as a function of charging voltages at the water resistivity of 50 Ω·m

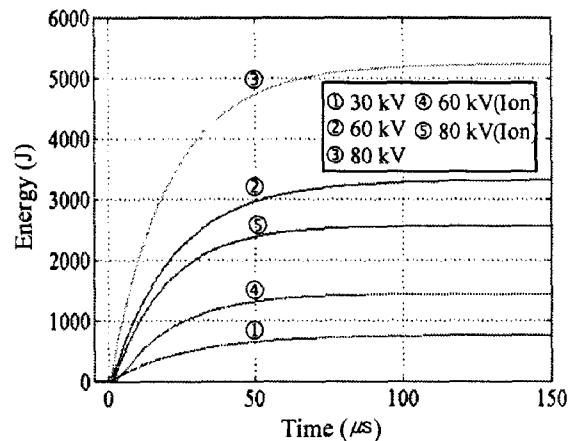
### 3.2 접지전극의 에너지 방출

접지전극의 안전성 평가를 위해서 접지전극을 통하여 방출되는 에너지를 분석할 필요가 있으며, 이 또한 매텔랩 프로그램을 이용하여 분석이 가능하다. 전위 파형의 산출과는 반대로 이온화가 발생하게 되면 전류 파형은 물속에 존재하는 이온성 전도전류에 전리로 인한 이온화 전류가 더해진 파형이 나타난다. 반대로 생각하면 이온화에 의한 전류의 증가분은 전체 전류에서 전도성 전류파형을 빼주게 되면 산출된다. 전위 파형에서의 가정과 마찬가지로 전도성 전류의 파형은 이온화가 발생하지 않았을 때의 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 충전전압의 전류 파형을 이용하여 이온화가 발생하는 60 kV와 80 kV 충전전압에 대한 전도성 전류 파형을

생성하여 이온화가 발생한 원래의 전류 파형에서 빼주면 이온화에 의한 전류의 증가분을 구할 수 있게 된다. 전체 전류의 파형과 증가된 전류의 파형을 전압 파형과 곱하게 되면 순시전력파형을 얻을 수 있고 전력 파형을 시간에 대하여 적분하면 그림 5 (b)와 같이 에너지파형을 얻을 수 있다. 에너지의 파형을 살펴보면 초기에 전압과 전류의 급격한 증가에 따라 증가하지만 50 μs 이후에 일정한 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 80 kV의 인가전압에서 전체 접지전극을 통해 방출된 에너지는 약 5.2 kJ에 이르고 이중 이온화에 의한 에너지는 약 2.5 kJ인 것으로 나타났다.



(a) 이온화에 의한 전류 증가분의 산출



(b) 에너지 파형

그림 5. 이온화에 의해 증가된 전류 파형과 에너지 산출 파형의 예

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

접지전극을 통하여 방출된 전체 에너지와 이온화에 의해 방출된 에너지를 정량적으로 평가하기 위해 그림 5(b)의 에너지 파형을 산출하여 충전전압에 따른 이온화 에너지를 분석하였다. 저항률 50 Ω·m에서 충전전압에 따른 전체에너지와 이온화

에 의한 에너지의 관계를 그림 6에 나타내었다.

충전전압이 증가함에 따라 전체 에너지와 이온화에 의한 에너지가 증가하고 갭간에 섬락이 발생하기 이전까지 이온화에 의해 접지전극을 통해 방출되는 에너지가 전체에너지의 절반에 이르는 것으로 나타났다. 또한 동일한 충전전압에서 인가된 전체 에너지와 이온화에 의해 접지전극을 통해 방출된 에너지는 거의 비슷하게 나타난 것으로 분석된다.

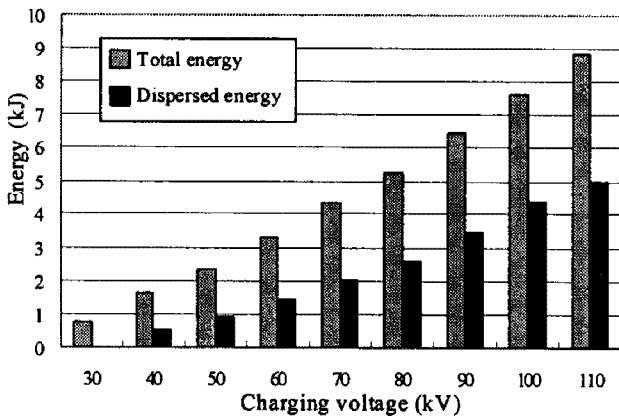


그림 6. 50 Ω·m의 저항률에서 충전전압에 따른 접지극의 인가된 에너지와 이온화에 의해 방출된 에너지

Fig. 6. Applied energy to ground rod and energy dispersed by ionization as a function of charging voltages at the water resistivity of 50 Ω·m

#### 4. 결론

본 논문에서는 매텔랩 프로그램을 이용하여 50 Ω·m의 저항률에서 이온화시에 접지전극에 나타나는 전위저감과 에너지방출을 임펄스전압 발생장치의 충전전압에 따라 정량적인 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

충전전압에 따라 접지전극에 인가되는 전압과 전위저감이 증가하였으며, 절연파괴 직전의 전압에서 전위저감은 인가전압에 절반에 이르는 것으로 나타났다. 또한 이온화에 의해 접지전극을 통하여 방출된 에너지는 전체 에너지에 비하여 섬락에 이르기 전까지 절반 이상의 에너지가 방출되는 것으로 나타났다.

#### 참고 문헌

[1] N. Mohamad Nor, A. Ramli, "Electrical properties of dry soil under high impulse currents", Journal of Electrostatics Vol.65, No.8, pp.500-505, 2007.  
 [2] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Performance of Earthing systems of Low Resistivity Soils". IEEE Trans.

on PD, Vol.21, No.4, 2006.  
 [3] Jong-Hyuk Choi, Sang-Duk An, Bok-Hee Lee, "Analysis of Underwater Discharge Characteristics Caused by Impulse Voltages", Journal of KIEE, Vol.22, No.2, 2008.  
 [4] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses" IEEE Trans. on PD, Vol.21, No.1, 2006.  
 [5] Junping Wang, Ah Choy Iiew, Eeior Member, IEEE, and Mat Darveniza, Life Fellow, IEEE, "Extension of Dynamic Model of impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents", IEEE Trans. on PD, Vol.20, No.3, 2005.  
 [6] Jong-Hyuk Choi, Sang-Duk An, Young-Hwan Beak, Bok-Hee Lee and Chang-Hwan Ahn, "Characteristics of ionization near the submerged ground rod", 5th Asia Lightning Protection Forum, pp.41-45, 2008.