

## 임펄스전류에 의한 대지표면전위상승 및 위험전압의 분석

(An Analysis of the Ground Surface Potential Rise and Hazardous Voltages Caused by Impulse Currents)

이복희\* · 이규선 · 최중혁 · 성창훈

(Bok-Hee Lee · Kyu-Sun Lee · Jong-Hyuk Choi · Chang-Hoon Seong)

### Abstract

Lightning and switching surges propagating through the grounding conductors lead to transient overvoltages, and electronic circuits in information technology systems are very susceptible to damage or malfunction from the electrical surges. Surge damages or malfunctions of electrical and electronic equipment may be caused by potential rises. To solve these problems, it is very important to evaluate the ground surface potential rises and hazardous voltages such as touch and step voltages at or near the grounding systems energized by electrical surges. In this paper, the performance of grounding systems against the surge current containing high frequency components on the basis of the actual-sized tests is presented. The ground surface potential rises and hazardous voltages depending on impulse currents for vertical or horizontal grounding electrodes are measured and analyzed. Also the touch and step voltages caused by the impulse currents are investigated. As a result, the ground surface potential rises, the touch and step voltages near the grounding electrodes are raised and the conventional grounding impedances are increased as the front time of the injected impulse currents is getting faster.

Key Words : Electrical Surge, Ground Surface Potential Rise, Touch Voltage, Step Voltage, Conventional Grounding Impedance

### 1. 서 론

피뢰접지는 뇌전류를 신속하고 안전하게 대지로 분산시켜 대지전위상승에 의한 인체의 감전이나 기기피

해를 방지하는 역할을 한다[1]. 직격뢰와 유도뢰에 의해서 발생하는 뇌전류는 접지시스템에 흐르는 전류 중에서 가장 크고, 상승시간과 지속시간이 매우 짧은 특성을 보이기 때문에 상용 주파수의 전류가 접지전극에 흘렀을 경우와는 다른 양상의 위험성이 나타난다. 일반적으로 접지전극 주변의 위험성은 접촉전압 및 보폭전압 등으로 평가하고 있으며, 그러한 위험전압의 정의 및 평가방법은 여러 문헌에 제시되어 있다

---

\* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2011년 2월 10일  
1차심사 : 2011년 2월 16일  
심사완료 : 2011년 3월 10일

[2-4]. 하지만 접촉전압과 보폭전압은 주로 상용주파수의 고장전류에 의한 위험성을 분석하고 있기 때문에 뇌전류를 대지로 방류하기 위한 피뢰접지시스템의 접지도체 주변의 위험성에 대하여는 많이 논의되지 못한 상태이다. 최근 기후의 변화로 인하여 뇌방전의 발생 횟수가 증가하면서 접지전극에 뇌전류가 유입될 수 있는 확률이 증가하였다. 따라서 뇌전류에 의한 접지시스템의 위험성에 대한 분석이 이루어져야 하며, 뇌전류에 의한 접지임피던스의 특성, 대지표면전위상승 및 위험전압 등이 동시에 고려되어야 한다.

또한 임펄스전류가 접지전극에 인가되었을 때 나타나는 접지임피던스의 과도특성에 관한 많은 연구는 서지전류가 접지시스템에 인가되었을 때 접지임피던스가 크게 변동하는 결과들을 제시하고 있다[5-7]. 접지임피던스가 접지저항에 비해 증가하는 특성의 접지전극의 경우 접지전극 주변에 더 큰 위험성이 존재할 수 있기 때문에 이러한 접지전극에 대해서는 반드시 임펄스전류에 의한 전위상승에 대한 분석이 수행되어야 하며, 규약접지임피던스의 변화를 고려한 분석이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 뇌서지전류가 접지전극에 인가되었을 때 접지전극 주변에서 발생하는 위험전압을 분석하기 위해 길이 50[m]인 수직 및 수평 접지전극에 대하여 임펄스전류의 파두시간에 따른 대지표면전위상승, 접촉전압과 보폭전압과 같은 위험전압을 측정하였다. 또한 접지임피던스의 파두시간에 따른 규약접지임피던스를 측정하여 접지전극 주변의 위험전압과 접지임피던스의 관계를 분석하였다.

## 2. 실험계의 구성 및 방법

임펄스전류에 의한 규약접지임피던스와 대지표면전위분포를 측정하기 위한 실험계를 그림 1에 나타내었다. 임펄스전류가 인가되었을 때 접지시스템의 성능은 KS C IEC 62305-1표준에 제시되어 있는 규약접지임피던스로 평가하였으며[8], 접지임피던스를 측정하기 위해 IEEE Standard 81.2에서 제시하고 있는 수정된 전위강하법을 이용하여 측정하였다[9].

임펄스전류에 의한 접지임피던스의 측정에서 인가

전류의 크기와 파두시간은 전류보조선의 인덕턴스의 영향을 받으므로 이의 영향을 줄이기 위해 전류보조선 전극은 20[m] 거리에 설치하였으며, 도선유도에 의한 오차를 최소로 줄이기 위해 전위보조선극은 접지전극 길이의 두 배인 100[m] 떨어진 위치에 설치하였다 [10-11].

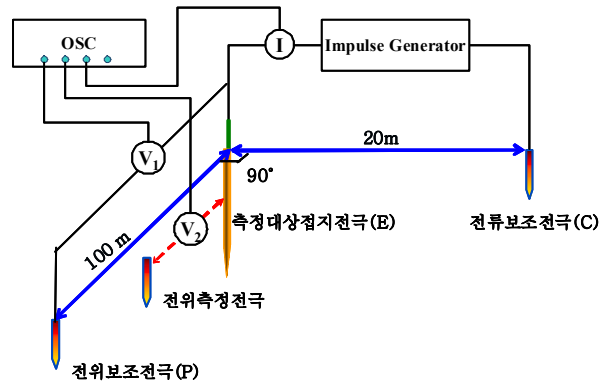


그림 1. 실험계의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up

임펄스전류의 파두시간은 조합형 임펄스발생장치의 커패시터의 용량을 변화시키며 조절하였다. 대지표면전위는 주파수대역이 DC - 70[MHz]인 차동전압프로브로 측정하였고, 전류는 전류프로브(Pearson 110)으로 측정하였다. 측정된 신호는 1[GHz]의 주파수대역을 갖는 오실로스코프(Tek. 5204B)로 검출하였다. 규약접지임피던스는 접지전극 전위의 피크와 전류피크의 비로 산출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수직 접지전극의 대지표면전위상승 및 위험전압

임펄스전류에 의한 접지전극 주변의 위험성을 평가하기 위해 직경 54[mm], 길이 50[m]의 수직 접지전극의 상단이 지표면에서 깊이 0.5[m]에 놓이도록 설치하였으며, 100[Hz]에서 측정된 접지저항은 5.7[Ω]이었다.

50[m] 수직 접지전극에 파두시간이 5.9[ $\mu$ s]인 임펄스전류를 인가하였을 때 인가전류와 접지전극의 전위상승 파형의 예를 그림 2에 나타내었다. KS C IEC 62305표준에 따라 접지전극의 전위상승과 접지전류 파형의 피크값의 비로 규약접지임피던스를 산출하였다.

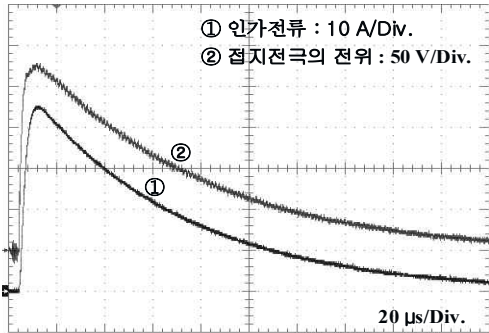


그림 2. 임펄스전류에 의한 길이 50[m]인 수직 접지전극의 전위상승 파형의 예  
 Fig. 2. Examples of the potential rise waveforms of the vertically buried grounding electrode of 50[m] long biased by the impulse current

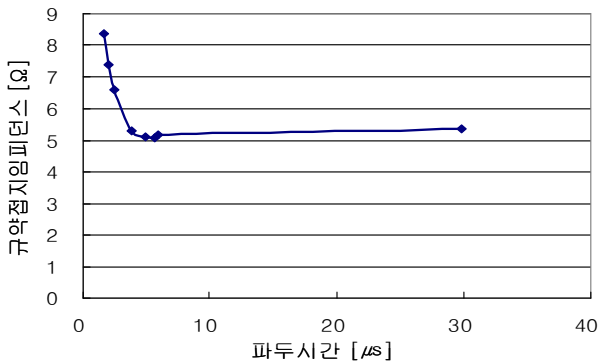
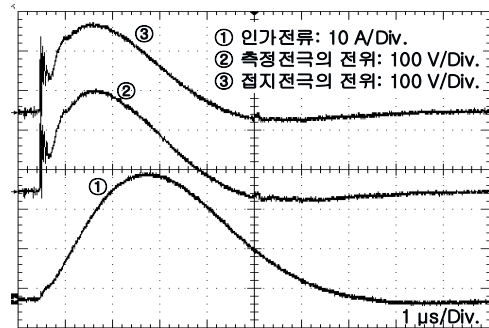


그림 3. 임펄스전류의 파두시간에 따른 길이 50[m]인 수직 접지전극의 규약접지임피던스  
 Fig. 3. Conventional grounding impedance of the vertically buried grounding electrode of 50[m] long as a function of the front time of impulse currents

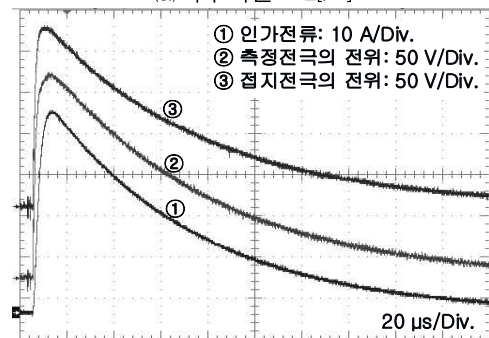
50[m] 수직 접지전극에 대하여 임펄스전류의 파두시간 2-30[ $\mu$ s]에서 측정된 규약접지임피던스는 그림 3과 같다. 각 파두시간에 대한 규약접지임피던스는 동

일한 파두시간의 임펄스전류로 5회 측정된 평균값으로 결정하였다.

50[m] 수직 접지전극의 규약접지임피던스는 파두시간 5-30[ $\mu$ s]에서 약 5[ $\Omega$ ]으로 접지저항보다 약간 작은 값이었으나 5[ $\mu$ s] 이하의 빠른 파두시간에서 규약접지임피던스는 급격히 증가하였으며, 약 2[ $\mu$ s]의 파두시간에서는 8.5[ $\Omega$ ]의 접지임피던스를 나타내었다. 빠른 파두시간에서 접지임피던스가 증가하는 유도성 특성은 접지전극의 인덕턴스에 의한 영향과[7], 고주파수 접지전류의 인가점 주변에서 유출의 집중효과에 기인된 것으로 판단된다[12-13].



(a) 파두시간 : 2[ $\mu$ s]



(b) 파두시간 : 5.9[ $\mu$ s]

그림 4. 임펄스전류의 파두시간에 따른 길이 50[m] 수직 접지전극의 전위상승 파형의 예  
 Fig. 4. Examples of the potential rise waveforms of the vertically buried grounding electrode of 50[m] long biased by the impulse current with different front time

파두시간이 2[ $\mu$ s]와 5.9[ $\mu$ s]인 임펄스전류를 인가하였을 때 인가전류 및 전위측정전극의 위치에 따른 접

지전극의 전위 파형의 예를 그림 4에 나타내었다. 접지전극의 전위 파형은 전위측정전극의 위치에 상관없이 거의 비슷함을 알 수 있다. 파두시간이 2[ $\mu$ s]인 임펄스전류의 경우 전위파형의 피크도달시간이 전류파형의 피크도달시간보다 빠른 유도성 특성을 보였으며, 파두시간이 5.9[ $\mu$ s]의 임펄스전류에 대하여는 인가전류와 전위파형의 피크도달시간이 거의 일치하는 것으로 나타났다.

임펄스전류를 인가한 때 접지전극 주변에서 측정된 대지표면전위를 인가전류 1[A]당으로 환산하여 그림 5에 나타내었다. 인가된 임펄스전류의 파두시간이 빠를수록 대지표면전위가 100[Hz]의 접지전류에 의한 대지표면전위에 비하여 높으며, 접지전극으로부터의 이격거리에 따라 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

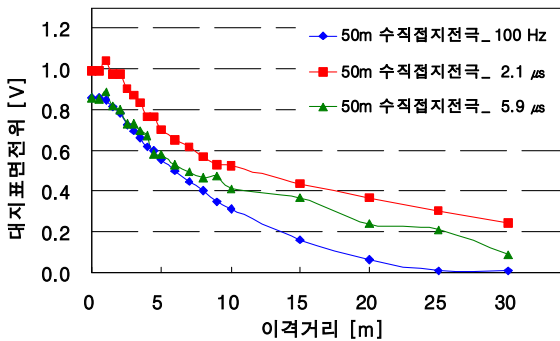


그림 5. 임펄스전류에 의한 길이 50[m]인 수직 접지전극 주변의 대지표면전위상승

Fig. 5. Ground surface potential rises near the vertically buried grounding electrode of 50[m] long biased by impulse currents

이러한 원인은 그림 3에 나타낸 파두시간에 따른 규약접지임피던스의 결과에서 알 수 있듯이 인가전류의 파두시간이 짧아짐에 따라 접지전극의 전위가 더욱 높아지며 서지전류가 표피효과에 의해 대지표면 부근으로 전파되기 때문에 접지전극 주변의 전위상승 또한 더 높게 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 접지전극에 유입되는 전류의 상승시간이 빠를수록 접지전극의 전위 및 그 주변의 대지표면전위상승이 높아져 위험성도 증가하므로 접지시스템을 설계할 때 이러한 관점을 고려하여야 과도특성이 양호한 성능을 구현할

수 있다. 임펄스전류에 의한 길이 50[m] 수직 접지전극 주변의 대지표면전위로부터 산출한 접촉전압 및 최대보폭전압을 표 1에 나타내었으며, 동일한 파두시간에서 측정된 규약접지임피던스와 비교하였다. 5.9[ $\mu$ s] 파두시간의 임펄스전류가 인가된 경우 접지임피던스는 접지저항에 비해 약간 작게 나타나며 이때 접촉전압 역시 100[Hz]의 주파수에서의 측정값보다 약간 작게 나타났다.

표 1. 접지전류의 파형에 따른 길이 50[m] 수직 접지전극의 위험전압 및 규약접지임피던스  
Table 1. Hazardous voltages and conventional grounding impedance of the vertically buried grounding electrode of 50[m] long as a function of ground current waveforms

주파수/ 파두시간	접지전류 1[A]		
	접촉전압 ([V])	최대 보폭전압 ([V])	규약접지임피 던스 ([ $\Omega$ ])
100[Hz]	4.48	0.08	5.73
2[ $\mu$ s]	6.93	0.11	7.4
5.9[ $\mu$ s]	4.36	0.09	5.2

반면 2[ $\mu$ s]의 빠른 파두시간에서는 접지임피던스가 100[Hz]에 비해 2[ $\Omega$ ]이상 증가하였다. 접촉전압도 1[A] 당 약 2.5[V] 상승하였으며 최대 보폭전압은 약 0.03[V] 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 매우 작은 것으로 보이나 실제로 뇌전류가 수 십[kA] 정도이므로 대지전위상승에 따른 위험성은 매우 크다고 볼 수 있다.

### 3.2 매설지선의 대지표면전위상승 및 위험 전압

단면적 25[mm<sup>2</sup>]이고, 길이 50[m]인 매설지선(수평 접지전극)을 수직 접지전극과 마찬가지로 대지표면으로부터 깊이 0.5[m]에 설치하여 임펄스전류의 파두시간에 따른 규약접지임피던스 및 위험전압을 측정하고 분석하였다. 매설지선의 경우 수직 접지전극과 달리 대칭성이 아니며 측정 방향에 따라 그 결과가 달라질

수 있으므로 그림 6과 같이 2가지 측정 방향에 대하여 대지표면전위를 측정하였으며, 전류보조전극과 전위보조전극의 거리는 수직 접지전극과 동일하게 각각 20[m]와 100[m] 떨어진 위치에 설치하여 측정하였다.

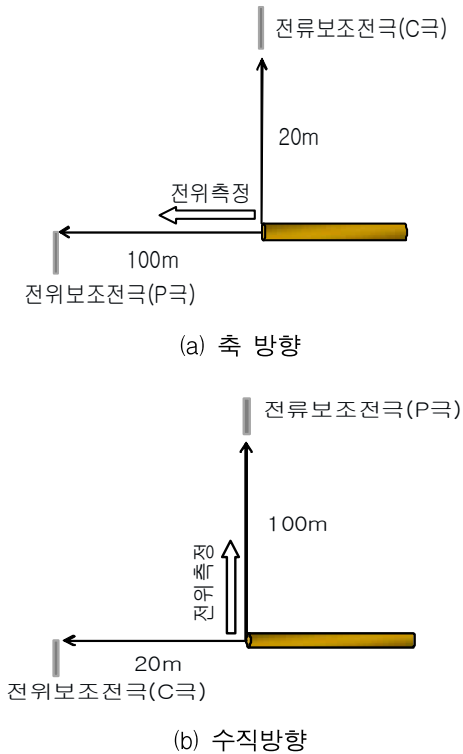


그림 6. 길이 50[m]인 매설지선 주변의 대지표면전위 상승의 측정 방향  
 Fig. 6. Measuring direction of the ground surface potential rise near the counterpoise of 50[m] long

임펄스전류의 파두시간에 따른 길이 50[m]인 매설지선의 규약접지임피던스의 측정결과를 그림 7에 나타내었다. 길이 50[m]인 매설지선의 접지저항은 0.46 [ $\Omega$ ]으로 매우 작았다. 매설지선의 규약접지임피던스는 파두시간이 빨라짐에 따라 급격하게 상승하였으며, 약 2[ $\mu$ s]의 파두시간에서 6[ $\Omega$ ]의 규약접지임피던스로 접지저항에 비하여 10배 이상 큰 값을 나타내었다. 이러한 결과는 매설지선이 설치된 부지의 대지저항률이 수직 접지전극이 설치된 위치에 비해 매우 낮아 접지저항이 작아진 반면, 서지전류에 대한 매설지선의 인

덕턴스의 영향이 상대적으로 크게 나타나기 때문이라 판단된다.

파두시간 2.1[ $\mu$ s]와 7.6[ $\mu$ s]의 임펄스전류와 100[Hz] 정현파 전류를 인가하였을 때 길이 50[m]인 매설지선 주변의 대지표면전위상승의 분포를 그림 8에 나타내었다. 임펄스전류에 의한 매설지선 주변의 대지표면전위상승은 수직 접지전극의 경우와 마찬가지로 파두시간이 빠를수록 크게 나타났으며, 임펄스전류 1[A]당 접지전극의 전위상승은 100[Hz] 정현파 전류에 비해 10배 이상 크게 나타났다. 이러한 결과는 측 방향과 수직방향 모두 동일하게 나타났으며 방향에 따른 전위상승의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

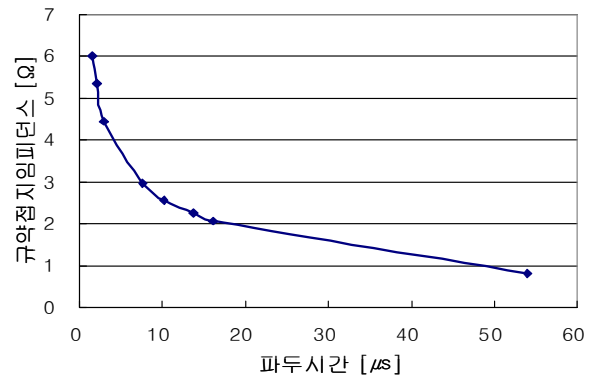
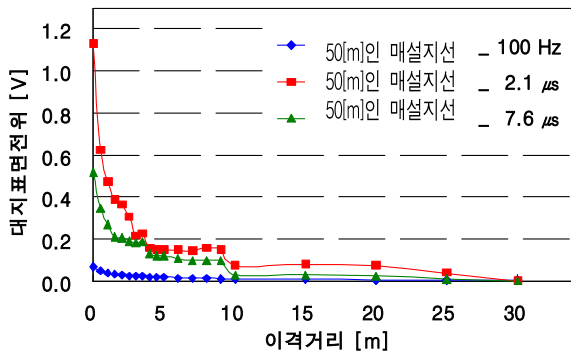


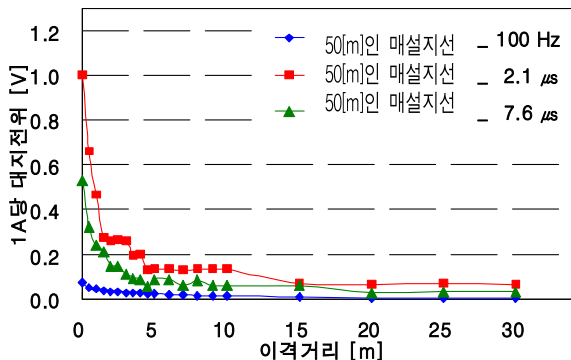
그림 7. 임펄스전류의 파두시간에 따른 길이 50[m] 매설지선의 규약접지임피던스  
 Fig. 7. The conventional grounding impedance of the counterpoise of 50[m] long as a function of the front time of impulse currents

매설지선의 경우 수직 접지전극에 비해 접지저항이 10배 이상 작게 나타났으며, 100[Hz] 정현파 전류로 측정된 전위 또한 접지저항의 비율과 유사하게 나타났다. 하지만 파두시간 2.1[ $\mu$ s]의 임펄스전류가 인가되었을 때 접지전극 직상부의 대지표면전위는 수직 접지전극과 매설지선이 거의 비슷한 크기를 나타내었다. 이는 규약접지임피던스의 측정결과에서 알 수 있듯이 매설지선의 경우 수직 접지전극에 비해 접지저항은 매우 작지만 파두시간이 빨라짐에 따라 규약접지임피던스가 크게 상승하여 수직 접지전극의 규약접지임피던스와 거의 차이가 나지 않기 때문이라 판단된다. 즉

임펄스전류의 파두시간이 빠른 경우 인덕턴스의 영향이 지배적으로 작용하며, 수직 접지전극과 매설지선의 길이가 동일하므로 규약접지임피던스와 대지표면전위상승이 거의 같게 나타난 것으로 볼 수 있다.



(a) 축 방향



(b) 수직방향

그림 8. 접지전류 1[A]일 때 길이 50[m]인 매설지선 주변의 대지표면전위상승

Fig. 8. Grounding surface potential rises near the counterpoise of 50[m] long biased by the ground current of 1[A]

길이 50[m]인 매설지선의 임펄스전류와 100[Hz] 정현파전류에 대한 접촉전압과 최대 보폭전압 및 규약 접지임피던스를 표 2에 나타내었다. 길이 50[m]인 매설지선은 2.1[μs]와 7.6[μs]의 파두시간을 갖는 임펄스전류에 대하여 수직, 수평방향 모두 100[Hz]로 측정된 접지저항보다 큰 규약접지임피던스를 나타내었다. 접촉전압은 접지전극의 전위와 1[m] 떨어진 지점의 대지표면전위와의 차이를 나타내며, 파두시간이 빠른 임펄스전류에서 접지전극의 전위와 대지표면전위가 모

두 증가하지만 접지전극의 전위가 훨씬 크게 증가하기 때문에 그 차이가 커지게 되어 접촉전압이 증가하게 된다. 또한 접촉전압은 접지전극의 전위와 직접 관련되므로 보폭전압에 비해 훨씬 크게 나타났다. 임펄스전류에 의한 매설지선의 축방향의 접촉전압은 파두시간 7.6[μs]에서 2.85[V]로 100[Hz] 정현파 전류의 경우에 비해 약 6배 크게 나타났으며, 파두시간 2.1[μs]에서 5.11[V]로 10배 이상 크게 나타났다.

표 2. 접지전류의 파형에 따른 길이 50[m] 매설지선의 위험전압과 규약접지임피던스

Table 2. Hazardous voltages and conventional grounding impedance of the counterpoise of 50[m] long as a function of ground current waveforms

파두시간 /주파수	접지전류 1[A]					
	접촉전압 ([V])		보폭전압 ([V])		규약접지임피던스 ([Ω])	
	축방향	수직방향	축방향	수직방향	축방향	수직방향
100[Hz]	0.38	0.42	0.03	0.03	0.46	0.46
2.1[μs]	5.11	4.89	0.66	0.53	5.34	5.34
7.6[μs]	2.85	2.71	0.25	0.29	2.96	2.96

보폭전압 역시 접지전극 주변의 대지표면전위의 상승으로 인해 전위경도가 증가하기 때문에 접지전극 주변에서 높게 나타난다. 보폭전압도 임펄스전류에 의한 측정결과가 크게 나타났으며 파두시간 2.1[μs]의 측정결과는 파두시간 7.6[μs]에서의 값보다 2배 이상 크게 나타났다.

매설지선의 접촉전압 및 보폭전압의 전반적인 변동 특성은 규약접지임피던스의 경향과 거의 일치하였으며, 방향에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 따라서 매설지선의 경우에도 빠른 파두시간의 서지전류에 대해서 규약접지임피던스를 저감할 수 있도록 접지전극을 설계하는 것이 위험전압을 낮추는 효과적인 방법이라는 것이 입증되었다.

#### 4. 결 론

접지전극에 임펄스전류를 인가하였을 때 접지전극

주변의 대지표면전위를 측정하고, 규약접지임피던스와의 상관성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 접지시스템에 임펄스전류가 인가되었을 때 접지전극 주변의 대지표면전위상승은 접지전극의 규약접지임피던스의 경향과 유사한 것으로 나타났다.

(2) 임펄스전류에 의한 접지시스템의 규약접지임피던스가 접지저항보다 큰 경우 접촉전압과 보폭전압 모두 높게 나타났다.

(3) 임펄스전류에 의한 접지전극의 전위상승이 현저하므로 상용 주파수 접지전류에 의한 접촉전압보다 훨씬 높으며, 전이전압도 높아 정보기술기기의 손상이나 오동작이 발생할 가능성이 높다.

(4) 뇌서지전류에 의한 접촉전압 또는 보폭전압과 같은 위험전압은 접지시스템의 규약접지임피던스 특성과 관련되므로 피뢰접지시스템의 성능을 규약접지임피던스로 평가하는 설계가 합리적이다.

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

### References

- [1] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초 기술”, 도서출판 의제, pp.1-18, 1999.
- [2] IEEE Std. 80-2000, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, pp.3~25, 2000.
- [3] R. Kosztaluk, K. Mukhedkar, Y. Gervais, “Field measurements of touch and step voltages”, IEEE Trans., Vol.PAS-103, No.11, pp.3286-3294, 1984.
- [4] G. Parise, M. Lucheroni, “Measurements of touch and step voltages adopting current auxiliary electrodes at reduced distance”, IEEE Trans. Industry Application, Vol. 44, No. 6, pp. 1896-1901, 2008.
- [5] B. R. Gupta, B. Thapar, “Impulse Impedance of Grounding Grids”, IEEE Trans., Vol.PAS-99, No.6, pp.2357-2362, 1980.
- [6] Silverio Visacro, “A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents”, IEEE Trans. on P.D., Vol. 22 No. 1, 2007.
- [7] Leonid Grcev, “Impulse Efficiency of Ground Electrode”, IEEE Trans. Power Del., Vol.24, No.1, pp.441-451, 2009.
- [8] IEC 62305-1, “Protection against lightning - Part 1: General principles”, 2006.
- [9] IEEE Std. 81.2-1991, “IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems”, pp.12~17, 1991.
- [10] 최영철, 최종혁, 이복희, 전덕규 “수직 또는 수평으로

매설된 접지전극의 접지임피던스 측정시 보조전극 위치에 따른 전자유도의 영향”, 조명·전기설비학회 논문지, Vol. 23, No.8, pp.86-92, 2009.

- [11] 최종혁, 최영철, 이복희, “수직 접지전극의 접지임피던스 측정에서 도전유도에 의한 오차 평가”, 전기학회 논문지, Vol.58, No. 9, pp.1778~1783, 2009.
- [12] J. H. Choi, J. H. Kim, B. H. Lee, Y. K. Chung, “An analysis of conventional grounding impedance based on the impulsive current distribution of a counterpoise”, Proc. Conf. on ICLP, pp.1179-1-6, 2010.
- [13] J. He, R. Zeng, Y. Li and B. Zhang, “Lightning Impulse Property of Vertical Grounding Rod”, Proc. Conf. on 28th ICLP, Vol.2, pp.686-691, 2006.

### ◇ 저자소개 ◇



**이복희(李福熙)**

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대

IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



**이규선(李圭善)**

1954년 9월 17일생. 천안공업전문대학 전기공학과 졸업. 2006년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : leeks0482@hanmail.net



**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



**성장훈(成昶勳)**

1983년 5월 1일생. 2010년 2월 인천대학교 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : chslove0501@nate.com