

## 수직 접지전극 주변에서 전위간섭의 분석

(An Analysis of Potential Interference in the Vicinity of the Vertical Ground Rod)

이복희\* · 이강수 · 성창훈 · 최종혁

(Bok-Hee Lee · Kang-Soo Lee · Chang-Hoon Seong · Jong-Hyuk Choi)

### Abstract

A grounding system is generally composed of several vertical, horizontal electrodes or grids. Excessive ground potential rises due to adjacent grounding electrodes can cause failures or misoperation of electronic devices and control systems. It is therefore necessary for computer-related and information-oriented equipment to be placed at a sufficient distance from the areas influenced by grounding electrodes. In this paper, in order to propose a method for evaluating the ground potential rise and interference in the vicinity of vertical grounding electrodes, the experimental and theoretical results on the potential interference between vertical grounding electrodes and its frequency dependence were described. The ground potential rise is sharply decreased with increasing the distance between grounding electrodes. In case that the separation of vertical grounding electrodes is less than 1.5[m], the potential interference coefficient was greater than 0.1 and linearly increased with the frequency of the test current within the frequency of 1[MHz].

Key Words : Grounding System, Ground Potential Rise, Potential Interference, Impulse Current, Vertical Grounding Electrodes

### 1. 서 론

이상적인 독립접지는 인접한 접지전극에 접지전류가 아무리 흘러도 다른 쪽 접지전극에 전혀 전위 상승을 일으키지 않는 경우이나 접지전극을 무한대의 거리만큼 떨어지도록 하지 않으면 완전한 독립

이라 할 수 없다. 독립접지는 인접한 접지전극의 영향 없이 독립적으로 장비나 설비를 보호할 수 있다는 장점이 있으나, 시공시 각각의 접지전극 간에 충분한 이격거리를 두어야 하며, 고장전류 또는 뇌전류가 유입될 때 전위차가 발생하여 전자장비나 제어설비에 손상을 주거나 오동작을 유발하는 단점이 있다[1].

고·저압 접지시스템이 인접되어 있는 경우 통합되어 있지 않으면 고압시스템의 전위상승이 저압시스템에 영향을 미치므로 고·저압접지시스템은 서로 접촉하거나 완전히 분리시켜야 한다. 이 경우 접촉전압, 보

\* 주저자 : 인하대학교 IT공과대학 전기공학부 교수  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2011년 3월 2일  
1차심사 : 2011년 3월 22일  
심사완료 : 2011년 3월 25일

폭전압, 이행전압 등에 관련된 요건을 충족해야 하므로 인접한 독립접지전극 사이에 발생하는 전위간섭에 대한 평가가 이루어져야 하며, 고주파수를 포함하는 서지전류 또는 고장전류가 접지전극에 유입되었을 때 나타나는 전위간섭의 변동성을 분석할 필요가 있다. 현재까지 전위간섭에 대한 연구는 주로 상용주파수의 고장전류에 대하여 수행되었으며, 축소형 모델에 대한 접지전극의 전위간섭에 대해서 분석이 주로 이루어져 왔다[2-4].

본 논문에서는 접지전극 상호간의 전위간섭 및 그 주파수의존성을 실제의 대지조건에서 수직 접지전극의 대지표면전위상승에 대한 이론식을 이용하여 전위간섭계수를 검토하고 전위간섭영향을 평가하는 간이적 방법을 도출하였다. 또한 고주파수를 포함하는 뇌전류 또는 고장전류가 유입되었을 때 접지전극의 전위간섭에 대한 주파수의존성을 분석하였고, 임펄스전류가 유입되었을 때 접지전극 상호간 전위간섭영향에 대하여 평가하고 검토하였다.

## 2. 접지전위간섭계수의 정의

독립접지에서는 그림 1과 같이 접지전극 A에 접지전류가 유입하였을 때 다른 접지전극에서 전위상승을 전혀 일으키지 않는 것이 가장 바람직하나 접지전극의 설치에 있어서 충분히 이격시키는 것이 현실적으로 불가능하기 때문에 전위상승의 일정한 범위에 접지전극이 매설되게 되어 접지전극 B처럼  $\Delta V$ 만큼의 전위상승이 일어나게 되므로 서로 완전히 독립되었다고 볼 수 없다. 따라서 접지시스템을 시설할 때 도전유도에 의한 전위간섭을 충분히 고려하여 설계하고 시공하여야 한다[1].

접지전극 A의 전위상승에 의해 접지전극 B가 간섭을 받는 것을 전위간섭이라고 하고, 접지전극 B에 미치는 전위간섭의 정도를 평가하는 척도로서 전위간섭계수 K를 식 (1)과 같이 정의한다[5].

$$\text{전위간섭계수 } K = \frac{\text{접지전극 B 전위}}{\text{접지전극 A 전위}} \quad (1)$$

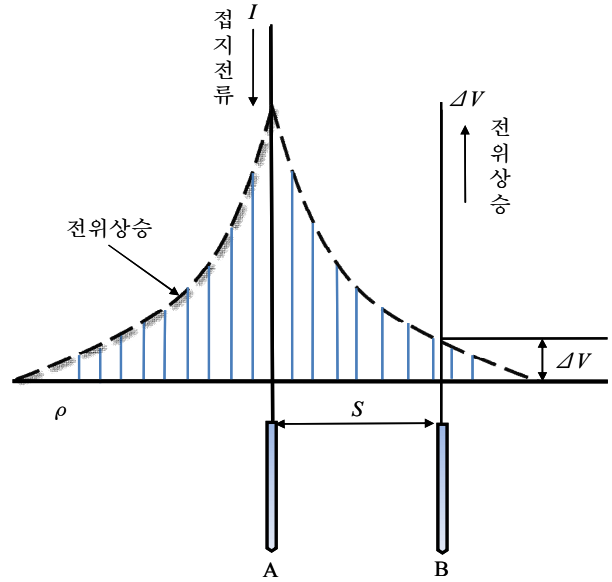


그림 1. 접지전극간의 전위간섭  
Fig. 1. Potential interference between grounding electrodes

## 3. 실험계 및 실험방법

수직 접지전극 상호간의 전위간섭을 분석하기 위해 반경 7.5[mm], 길이 1.8[m]인 접지전극을 설치하고 그림 2와 같이 전위간섭을 평가하는 실험계를 구성하였다.

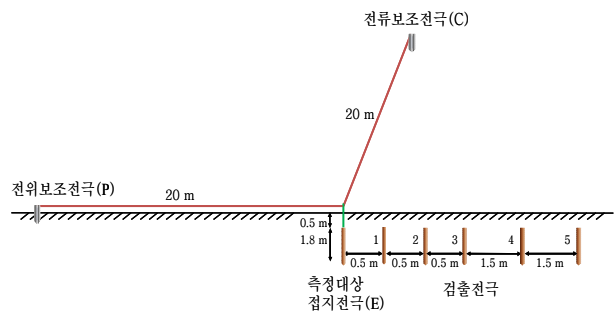


그림 2. 전위간섭평가를 위한 실험계  
Fig. 2. Experimental setup for evaluating the potential interference

수직 접지전극의 전위간섭을 측정하기에 앞서 측정대상 접지전극의 접지임피던스의 측정에는 IEEE Std. 81.2-1991에서 제안한 전위강하법을 사용하였으며[6], 전위보조전극과 전류보조전극을 측정대상 접지전극

의 길이의 10배 이상 이격된 위치에 설치하여 도전유도에 의한 오차를 적게 하였다[7].

정현과 교류 80[MHz]까지 발생시킬 수 있는 함수발생기와 DC-250[MHz]의 주파수대역을 갖는 전력증폭기를 이용하여, 측정대상 접지전극에 시험전류를 인가하였으며, 전위보조전극과 측정대상 접지전극 사이에서 측정된 전위차를 기반으로 접지임피던스를 산출하고 접지임피던스의 주파수의존성을 분석하였다. 시험용 접지전류는 50[MHz]의 측정주파수 대역을 갖는 전류프로브로 그리고 전위차는 100[MHz]의 주파수대역을 갖는 능동형 차동전압프로브로 측정하였다.

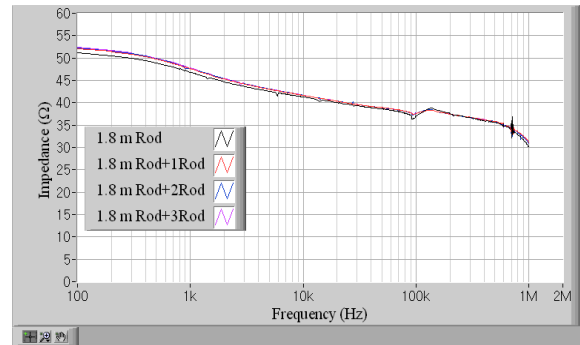
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 접지임피던스의 주파수의존성

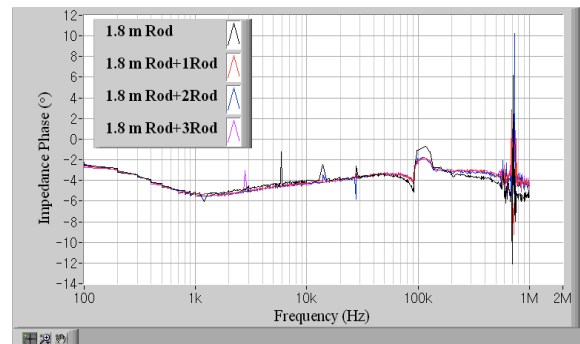
접지전극의 전위상승은 접지임피던스와 직접적으로 상관성을 가지므로 접지전위간섭의 주파수의존성을 평가하기 위해서는 접지임피던스의 주파수의존성을 알아 볼 필요가 있다. 수직 접지전극 상호간 전위간섭을 분석하기 위해 우선적으로 측정대상의 수직 접지전극의 접지임피던스와 위상차를 측정하였다. 접지전류의 주파수에 따른 접지임피던스의 변동특성은 PC 기반형 접지임피던스 분석기로 측정하였다. 측정대상인 반경 7.5[mm], 길이 1.8[m] 수직 접지전극의 접지임피던스와 위상차를 인가전류의 주파수를 100[Hz]에서 1[MHz]까지 변화시키며 측정된 결과를 그림 3에 나타내었다. 검출전극의 설치에 따른 측정대상 접지전극의 접지임피던스의 영향을 검토하기 위해 검출전극의 설치 수를 파라미터로 측정한 접지임피던스를 함께 나타내었으며, 검출전극의 설치에 따른 접지임피던스의 변동은 1[Ω] 이하로 실험결과와 이의 경향성에 대한 영향은 무시할 정도인 것으로 판단된다.

인가전류의 주파수 100[Hz]에서 측정된 수직 접지전극의 접지저항은 약 52[Ω]을 나타내었으며, 주파수가 1[MHz]까지 증가함에 따라 접지 임피던스는 31[Ω]까지 감소하였다. 인가전류의 위상이 접지전극의 전위보다 위상이 앞서는 용량성 특성을 나타내었으며, 주파수가 높아짐에 따라 용량성의 정도가 감소하는

경향으로 이는 전위간섭과도 관련성이 있는 것으로 보인다.



(a) grounding impedance([Ω])



(b) grounding phase([°])

그림 3. 접지임피던스 및 위상차의 주파수 의존성  
Fig. 3. Frequency-dependent grounding impedance and impedance phase

### 4.2 수직 접지전극의 전위간섭계수

그림 1에 나타낸 수직 접지전극 A의 전위와 근접한 수직 접지전극 B의 전위를 추정하는 간이적 방법의 제안에 대하여 검토하였다. 접지전류  $I$ 가 수직 접지전극 A에 흐를 경우, 수직 접지전극 A의 발생하는 전위  $V_A$ 는 식 (2)과 같다.

$$V_A = I \times R_A \quad (2)$$

식 (2)의 수직 접지전극의 저항  $R_A$ 는 식 (3)과 같이 표현된다[8].

수직 접지전극 주변에서 전위간섭의 분석

$$R_A = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad (3)$$

단  $\rho$  : 대지저항률 [ $\Omega \cdot m$ ],  $a$  : 접지전극 A의 반경 [m],  $l$  : 접지전극 A의 길이 [m]이다.

그림 1에 나타낸 것과 같은 수직 접지전극에 의한 대지표면의 전위상승은 식 (4)와 같이 표현된다[9].

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \frac{l+h+\sqrt{(l+h)^2+h^2}}{h+\sqrt{h^2+x^2}} \quad (4)$$

단,  $h$  : 접지전극 A 상단의 지표면으로부터의 매설 깊이 [m],  $x$  : 접지전극 A로부터의 이격거리 [m]이다. 따라서 수직 접지전극의 전위간섭계수  $K$ 는 간이적으로 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{\Delta V}{V_A} = \frac{\ln \frac{l+h+\sqrt{(l+h)^2+h^2}}{h+\sqrt{h^2+x^2}}}{\ln \frac{4l}{a} - 1} \quad (5)$$

즉, 식 (5)은 대지표면전위를 기반으로 나타낸 수직 접지전극의 전위간섭계수이다. 본 논문에서는 수직 접지전극에 의한 전위간섭을 식 (5)으로 표현되는 해석적 방법을 제안하여 폭 넓게 활용될 수 있도록 이 방법의 정확성을 검토하였다.

본 연구의 분석대상인 반경 7.5[mm], 길이 1.8[m]인 수직 접지전극을 대지저항률 108[ $\Omega \cdot m$ ]인 장소에 접지전극의 상단이 지표면에서 0.5[m]인 위치에 놓이도록 설치한 경우 인가전류 1[A]에 대한 대지표면의 전위분포를 그림 4에 나타내었다.

이와 같은 전위간섭분석기법은 수직 접지전극의 경우 접지전극이 설치된 조건과 예상접지고장전류를 알게 되면 대지표면전위분포를 기반으로 전위간섭의 정도를 해석적으로 간단하게 평가할 수 있으므로 접지 설계 및 설비의 시설단계에서 안전성과 신뢰성을 확보하는데 활용될 수 있다.

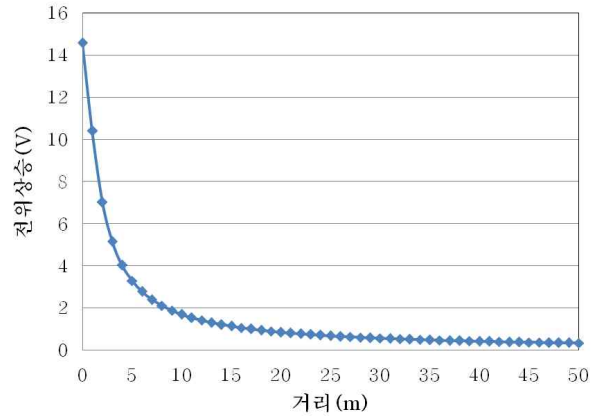


그림 4. 측정대상인 수직 접지전극 주변의 대지표면전위분포

Fig. 4. Ground surface potential profile near the vertical ground rod under test

인가전류의 주파수 1[kHz]에서 측정된 전위간섭계수를 그림 5에 나타내었으며, 실험결과 측정대상 수직 접지전극에서 가까울수록 전위간섭계수가 크게 나타났으며, 거리가 멀어짐에 따라 전위간섭계수가 감소하는 것으로 나타났다.

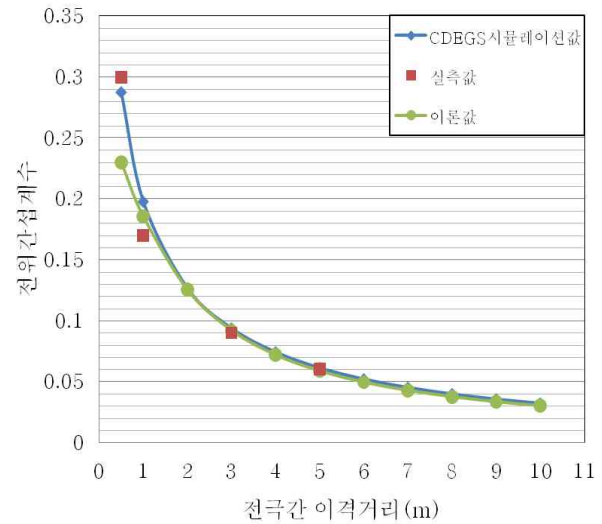


그림 5. 1[kHz]의 인가전류에 대한 전위간섭계수

Fig. 5. Potential interference coefficient under the test current of 1[kHz]

또한 CDEGS프로그램을 이용한 시뮬레이션 값과 식 (5)으로 산출한 결과를 비교하여 나타내었다. 위의

3가지 데이터 값을 비교하였을 때 수직 접지전극으로부터의 이격거리가 1[m] 이내의 경우 약간의 차이가 발생되는 것으로 나타났지만, 접지전극 간의 이격거리가 증가하면서 모든 값이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안하는 식 (5)의 전위간섭계수는 대지표면전위를 기반으로 하였으므로 1[m] 이내의 거리에서는 약간 작은 값을 보이나 그 이상의 거리에 대하여는 실측값과 거의 일치하였다. 실제로 접지전극 상호간 거리는 대략 2[m] 이상으로 시공하므로 본 연구에서 제안하는 전위간섭의 평가방법을 적용하여도 높은 정확도의 확보가 가능한 것으로 볼 수 있다. 길이 1.8[m]인 수직 접지전극의 경우 약 7[m] 이상 이격거리에서 5[%] 이하의 전위간섭의 영향을 받을 것으로 예상된다. 이와 같은 간이적인 방법으로 높은 정확도로 접지전극 상호간의 전위간섭의 영향을 평가할 수 있으므로 접지설비의 신뢰성 확보에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 4.3 전위간섭계수의 주파수의존성 분석

접지전극 상호간의 이격거리를 파라미터로 하여 측정한 전위간섭계수의 주파수의존성을 그림 6에 나타내었다. 전위간섭계수는 저주파수의 결과와 마찬가지로 고주파수일 때도 측정대상 수직 접지전극에 가까울수록 크고, 접지전극 간의 이격거리가 멀어짐에 따라 전위간섭계수는 감소하는 것으로 나타났다. 측정대상 수직 접지전극과 검출전극 사이의 거리가 0.5[m], 1[m], 1.5[m]인 경우 전위간섭계수는 1[MHz] 까지 약간 증가하는 추세를 보였으나 3[m], 5[m]의 거리에 대한 전위간섭계수는 주파수가 증가하여도 5[%] 이내의 차이를 보이면서 거의 일정하게 유지되었다. 따라서 측정대상 수직 접지전극의 경우 3[m] 이상의 거리만큼 이격시킬 경우 인가전류의 주파수에 의한 전위간섭계수에 대한 영향이 적은 것으로 판단된다. 접지임피던스에 따라 전위상승이 변동하므로 전위간섭계수의 주파수의존성은 접지임피던스의 주파수의존성과 직접적으로 관련성을 가지게 된다.

본 실험조건인 경우 인가전류의 주파수가 높아짐에 따라 접지임피던스가 감소하는 용량성을 나타내었으

며, 실제의 측정에서도 1[A]당 접지전위는 주파수가 높아짐에 따라 낮게 나타났다. 그러나 인가전류와 접지전위의 위상차의 측정에 나타난 바와 같이 인가전류의 주파수가 높아짐에 따라 위상차가 작아지는 경향 즉 용량성 경향이 낮아져 전위상승의 비로 평가되는 전위간섭계수는 인가전류의 주파수의 상승과 더불어 증가된 것으로 해석된다.

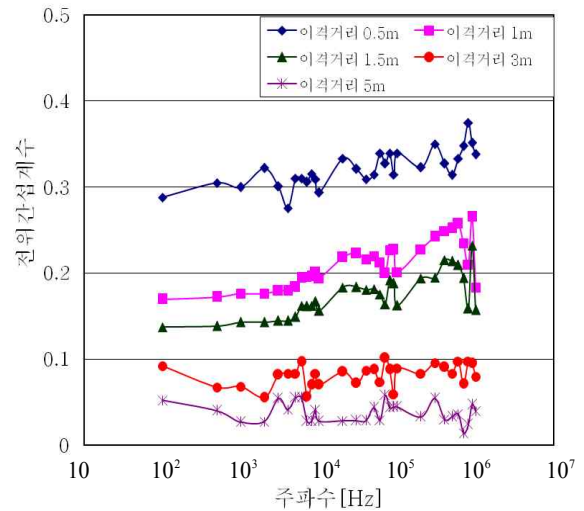


그림 6. 전위간섭계수의 주파수의존성  
Fig. 6. Frequency-dependent potential Interference coefficient

### 4.4 임펄스전류에 의한 전위간섭

임펄스전류에 대한 접지시스템의 성능을 규약접지 임피던스로 평가하므로 임펄스전류에 의한 전위간섭 평가의 지표로 삼기 위해 임펄스전류에 대한 측정대상 접지전극의 규약접지임피던스를 측정하였다. 측정 결과는 그림 7과 같으며, 파두시간이 짧을수록 규약접지임피던스가 감소하는 용량성 특성으로 나타났다. 임펄스전류의 파두시간에 따른 전위간섭계수의 측정 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 결과에서처럼 접지전극 간의 이격거리가 멀어질수록 전위간섭계수는 작게 나타났으며, 파두시간이 길어질수록 전위간섭계수가 일정하게 나타났다.

임펄스전류의 파두시간 20[μs] 이상에서의 결과는

그림 5에 나타난 인가전류의 주파수 1[kHz]에서의 전위간섭계수와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 파두시간이 짧아질수록 전위간섭계수가 약간 상승하는 결과와 접지전극 간의 이격거리가 멀어질수록 상승 폭이 감소하는 것은 전위간섭계수의 주파수의존성과 동일한 경향성을 확인할 수 있다.

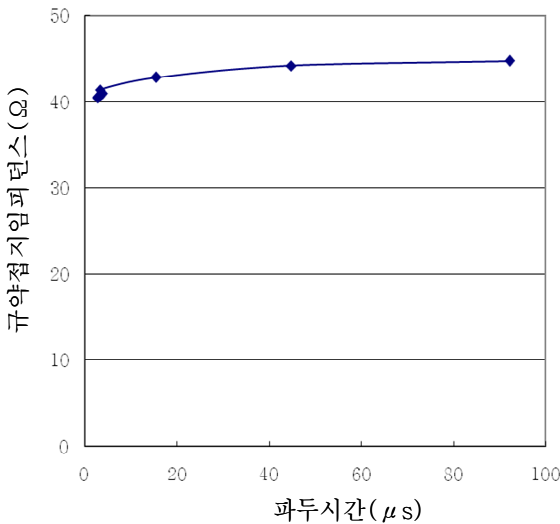


그림 7. 측정대상 접지전극의 규약접지임피던스  
Fig. 7. The conventional grounding impedance of the ground rod under test

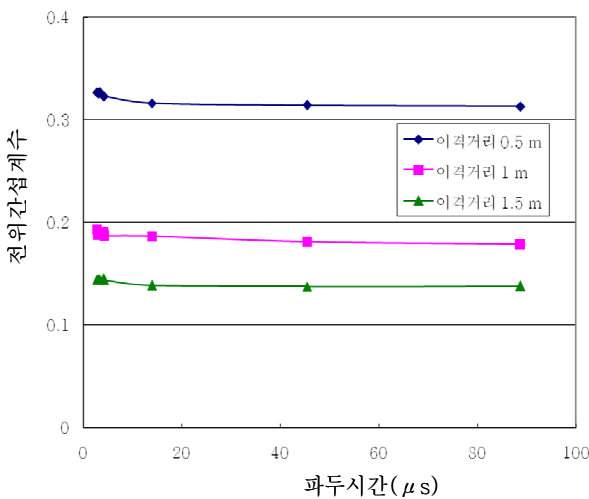


그림 8. 임펄스전류에 의한 전위간섭계수  
Fig. 8. Potential interference coefficient due to impulse currents

## 5. 결 론

본 논문에서는 반경 7.5[mm], 길이 1.8[m]인 수직 접지전극 상호간의 전위간섭계수를 실측을 통하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수직 접지전극 주변에서 대지표면전위의 산출식을 기반으로 제안한 전위간섭의 평가방법은 접지전극 간의 이격거리가 1[m] 이상에서 정확도가 우수함이 확인되었다.
- (2) 수직 접지전극의 전위간섭계수는 접지전극 간 이격거리가 멀어짐에 따라 작아지며, 길이 1.8[m]인 수직 접지전극의 경우 접지전극의 길이의 4배 이상의 이격거리에서 5[%] 이하로 나타났다.
- (3) 길이 1.8[m]인 수직 접지전극 사이의 거리가 짧은 범위에서 전위간섭계수는 주파수가 높아질수록 약간 증가하며, 3[m] 이상의 이격거리에서 주파수의존성은 미약하였다.
- (4) 전위상승은 접지임피던스와 직접 관련되며, 전위간섭계수는 비율적인 평가이어 전위간섭계수가 작더라도 전위상승은 클 수도 있으므로 전위간섭의 영향은 접지전위상승값으로 평가하는 것이 바람직하다.

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

## References

- [1] 최중혁, 최영철, 성장훈, 김동성, 김태기, 이복희, 안창환, “매설지선 상호간 전위간섭계수의 주파수의존성 분석”, 2010년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp.1442-1443, 2010.
- [2] IEC Std. "Power installations exceeding 1[kV] a.c. - Part 1 : Common rules", IEC 61936-1, 2nd ed. pp.84-88, 2010.
- [3] 이복희, 이수봉, 이태형, 정현욱, 김형준, “봉상 접지전극 상호간의 전위간섭에 대한 평가”, 조명·전기설비학회논문지 Vol.20, No 5, pp.92-98, 2006.
- [4] 이복희, 이수봉, 이태형, 김형준, “수조실험장치를 이용한 접지전극 상호간의 전위간섭 평가”, Vol.20, No 4, pp.29-36, 2006.
- [5] 高橋健彦, “接地・等電位ボンディング設計の實務知識”, オーム社, pp.94, 2003.

- [6] 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.
- [7] 최종혁, 최영철, 이복희, “수직 접지전극의 접지임피던스 측정에서 도전유도에 의한 오차 평가”, 대한전기학회 논문지, Vol. 58 No. 9, pp.1778-1783, 2009.
- [8] IEEE Std. 142TM, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, pp.164~.168, 2007.
- [9] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초 기술”, 도서출판 의제, pp.73-76, 1999.

◇ 저자소개 ◇



**이복희(李福熙)**

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경 대학 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



**이강수(李康壽)**

1970년 2월 19일생. 1996년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정. (주)옵니엘피에스 상무.  
 Tel : (02)2632-4541  
 Fax : (02)2671-5313  
 E-mail : pwrtoy@empal.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



**최중혁(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