

## 매설지선의 길이와 전류인가점에 따른 접지임피던스특성

(Grounding Impedance Behaviors Associated with the Current Injection Point and the Length of Counterpoise)

이 봉\* · 이복희\*\*

(Feng Li · Bok-Hee Lee)

### 요 약

본 논문은 임펄스전류가 인가된 매설지선의 과도접지임피던스특성에 관한 것으로 길이가 10, 30, 50 [m]인 3개의 매설지선에 대하여 임펄스전류의 인가점을 파라미터로 하여 과도접지임피던스와 규약접지임피던스를 측정하고 분석하였다. 임펄스전류의 상승시간에 대한 규약접지임피던스는 과도접지임피던스와 비슷한 경향이였다. 과도접지임피던스는 임펄스전류의 인가위치에 영향을 크게 받으며, 짧은 시간영역에서 과도접지임피던스는 매설지선의 길이에 매우 의존적이다. 임펄스전류가 인가된 10 [m]의 매설지선은 용량성 특성이었으나 30 [m]와 50 [m]의 매설지선은 유도성 특성을 나타내었다. 접지도선은 매설지선의 중앙점에 접속하는 것이 바람직한 것으로 밝혀졌다.

### Abstract

This paper presents the grounding impedance behaviors of counterpoise exposed to impulse currents. The transient and conventional grounding impedances of three counterpoises having the length of 10, 30 and 50 [m] were measured and analyzed as a function of the injection point of impulse currents. As a result, the trend of the conventional grounding impedances measured as a function of risetime of impulse current is similar to the transient grounding impedance of counterpoise. The injection point of impulse current has great influence on the transient grounding impedance characteristics of counterpoise. The transient grounding impedance characteristics in a short time range are strongly dependent on the length of counterpoise. The transient characteristics of grounding impedance of 10 [m] counterpoise subjected to the impulse current was capacitive behavior, on the other hand, those of 30 [m] and 50 [m] counterpoises were inductive behavior. It is found that the grounding conductor should be connected to the central point of counterpoise.

Key Words : Transient Grounding Impedance, Impulse Current, Soil Resistivity, Counterpoise, Conventional Grounding Impedance

\* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정

\*\* 교신저자 : 인하대학교 전자·전기공학과 교수

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

접수일자 : 2009년 3월 30일

1차심사 : 2009년 4월 6일

심사완료 : 2009년 4월 24일

## 1. 서 론

접지시스템의 성능을 평가하는 지표의 하나로 접지저항이 널리 사용되어 왔다. 접지저항을 측정할 때에는 50/60 [Hz] 전원의 공통모드 표류전류의 영향을 받지 않도록 직류 또는 저주파수(128 [Hz])의 측정전류로 사용한다. 하지만 상승시간과 지속시간이 짧은 뇌서지전류에는 수 [kHz]에서 수 [MHz]의 주파수성분이 포함되어 있으므로 피뢰설비용 접지시스템은 고주파수 전류에 대하여 평가해야 실제 접지시스템의 목적에 맞는 성능을 알게 된다. 높은 주파수에서 접지극시스템의 리액턴스성분의 영향으로 임피던스가 증가하거나 감소하게 되며, 특히 접지극시스템이 규모가 커질수록 접지극 도체에 의해 저항성 성분보다 리액턴스성분이 지배적으로 작용하므로 접지시스템의 성능을 접지임피던스로 평가하는 것이 바람직하다. 또한 뇌서지전류와 같이 급격히 변화하는 전류가 유입되면 접지전극의 접지임피던스는 대지의 구조와 저항률, 습윤 상태, 접지전극의 형상과 크기, 매설조건 등에 의해서 복잡한 특성을 나타내기 때문에 그 값을 정량적으로 표현하는 것이 곤란한 경우가 많다.

현재 피뢰설비용 접지극시스템의 고주파수에 대한 특성의 파악에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 대지표면으로부터 어느 정도의 깊이에 지표면에 대해서 수평으로 매설하는 접지전극을 매설지선(counterpoise)이라 하며, 피뢰설비용 접지나 송·배전 지지물의 피뢰접지에 많이 이용되고 있는 접지극 중의 하나이다[1-3].

본 논문에서는 피뢰설비용 접지극시스템의 뇌서지에 대한 성능을 나타내는 과도접지임피던스를 분석하여 합리적인 접지극시스템의 설계를 위한 기초 자료의 확보를 목적으로 길이 10, 30, 50 [m]의 매설지선을 대지저항률이 300~500 [ $\Omega \cdot m$ ]인 실증시험장에 설치하고 임펄스전류의 상승시간을 변화시키면서 임펄스전류의 인가위치에 따른 과도접지임피던스와 규약접지임피던스를 측정하고 분석하였다. 특히 고주파수에 상응하는 상승시간이 짧은 영역에서의 과도적 특성에 대하여 집중적으로 검토하였다.

## 2. 실험계의 구성 및 방법

### 2.1 실험계의 구성

임펄스전류에 대한 접지임피던스의 과도적 특성을 측정하기 위한 실험회로를 그림 1과 같이 구성하였다.

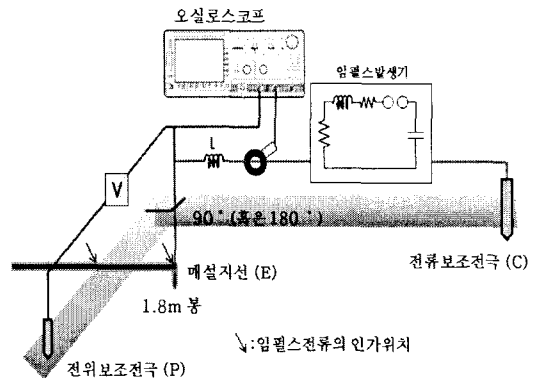


그림 1. 실험계의 구성

Fig. 1. Configuration of the experimental setup

임펄스전류에 대한 과도접지임피던스의 측정과 같이 높은 주파수 성분을 포함하는 측정전류를 인가하는 경우에는 측정선의 상호결합에 의한 전자유도의 영향이 매우 크게 작용한다. 임펄스전류의 인가위치에 따른 매설지선의 과도접지임피던스특성을 분석하기 위해서 그림 2와 같이 전류보조전극(C극)과 전위보조전극(P극)을 설치하였다. C극을 연결하는 도선과 P극 사이에 발생하는 전자유도결합에 의한 오차를 최소화하기 위하여 본 실험에서는 임펄스전류를 매설지선의 끝단에 인가하는 경우, 그림 2(a)와 같이 IEEE81.2-1991에서 권고하는 C극을 P극과 90[°]로 배치하였고, 임펄스전류를 매설지선의 중앙에 인가하는 경우는 그림 2(b)와 같이 C극과 P극을 180[°]로 설치하였다. 또한 측정대상 접지전극(E극)으로부터 P극 또는 C극 사이의 이격거리를 도전유도에 의한 오차가 5[%]미만이 되도록 하였다. 접지전극의 정상상태 접지저항 값을 측정할 경우에는 P극을 E극과 C극 사이의 61.8[%]지점에 설치하여 접지저항을 정확하게 측정하였다[4].

## 매설지선의 길이와 전류인가점에 따른 접지임피던스특성

단면적이 25 [mm<sup>2</sup>]인 나동선인 매설지선의 길이를 각각 10, 30, 50 [m]로 하여 지표면으로부터 0.5 [m]의 깊이에 수평으로 매설하였다. E극과 C극 사이의 측정전류 인가용 전선은 측정선의 인덕턴스의 영향을 줄이기 위하여 단면적 10 [mm<sup>2</sup>]인 4심 케이블을 일괄하여 사용하였다.

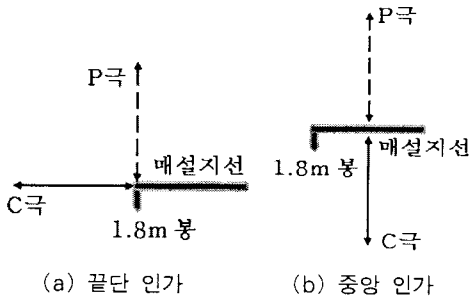


그림 2. C극과 P극의 배치도  
Fig. 2. Arrangement of the C and P auxiliary electrodes

## 2.2 실험방법

측정대상 접지전극에 임펄스전류를 인가하는 전원으로 조합형 임펄스전류발생장치를 사용하였다. 임펄스전류발생장치의 커패시터의 용량에 따라 임펄스 전류의 상승시간을 1~60 [μs]의 범위로 하여 10 [A]의 피크값으로 인가하였다. 인가전류는 주파수 대역이 0~5 [MHz]인 전류프로브로 측정하였으며, 접지전극의 전위는 75 [MHz]의 주파수 대역을 갖는 능동성 차동프로브로 측정하였다. 프로브로 검출된 인가전류와 전위파형은 디지털 오실로스코프로 관측하여 과도접지임피던스와 규약접지임피던스를 산출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 매설지선의 길이에 따른 인가전류와 전위상승 파형

길이 10, 30, 50 [m]인 매설지선의 정상상태 접지 저항의 측정값은 각각 101.3 [Ω], 29 [Ω], 27 [Ω]으로

실험장의 접지도체가 매설된 위치의 대지저항률과 매설지선의 길이가 복합적으로 작용하여 결정된 값이다. 매설지선에 인가된 임펄스전류와 전위상승의 전형적인 파형의 예를 그림 3에 나타내었다. 인가된 임펄스전류의 피크값은 약 10 [A]이며, 상승시간은 1~60 [μs] 범위이다. 임펄스전류를 측정대상 접지전극에 인가하였을 때 10 [m] 매설지선에서는 인가전류파형이 전위상승파형보다 위상이 앞서는 것으로 나타났으며, 상승시간이 빨라짐에 따라 전위의 피크값이 작아지는 것을 알 수 있다. 그리고 50 [m] 매설지선에서는 인가전류파형이 전위상승파형보다 위상이 뒤져 나타났으며, 상승시간이 빨라짐에 따라 전위의 피크값이 커지는 것을 알 수 있다. 전반적으로 길이 10 [m]의 매설지선의 경우 전류파형이 전위파형보다 앞서는 용량성으로 나타났고, 그리고 길이 50 [m]인 매설지선의 경우 전류파형이 전위파형보다 뒤지는 유도성을 나타냈다. 이러한 차이는 측정대상 접지전극의 회로요소가 접지저항과 인덕턴스, 접지

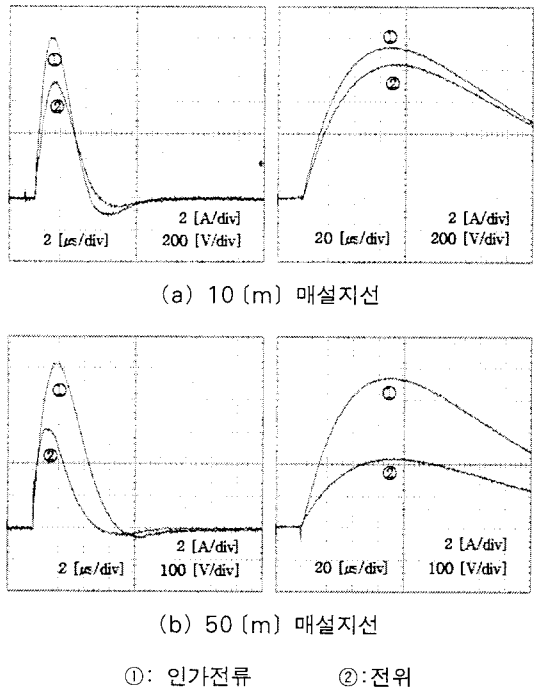
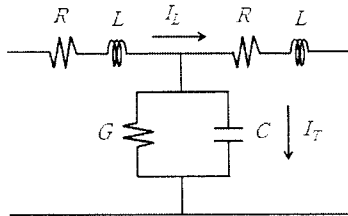


그림 3. 인가전류 및 전위 파형의 예  
Fig. 3. Examples of waveforms of the injected current and potential of counterpoise

전극과 토양 입자 사이 접촉면의 용량성 성분 영향의 정도에 따라 나타난 것으로 보인다.



- R : 접지전극의 자체저항
- L : 접지전극의 자체 인덕턴스
- C : 접지전극과 대지 사이의 정전용량
- G : 접지전극과 대지 사이의 컨덕턴스

그림 4. 매설지선의 등가회로  
Fig. 4. Equivalent circuit of counterpoise

매설지선에 인가된 임펄스전류의 흐름은 다음과 같이 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 매설지선을 통해 흐르는 종축전류  $I_L$ (longitudinal current)이고 다른 하나는 토양으로 방출되는 누설횡단전류  $I_T$ (leakage transversal current)이다. 종축전류  $I_L$ 는 전극의 내부와 외부영역에서의 자계와 접지전극 내부의 손실을 일으킨다. 이 자계와 손실은 종축전류의 크기와 접지전극 자체의 저항 R과 인덕턴스 L에 의해 결정되며, 전류가 접지전극에 흐르는 동안 전압강하를 일으킨다. 누설횡단전류  $I_T$ 는 접지전극 주변의 토양에 전계를 일으키며, 토양으로 흐르는 전도성 전류와 용량성 전류로 분류된다. 토양으로 흐르는 전도성 전류와 용량성 전류의 비율은 전극의 형상에는 상관없으며, 오직 " $\sigma/\omega\epsilon$ "( $\sigma=1/\rho$ ,  $\rho$ : 대지저항률,  $\omega=2\pi f$ ,  $\epsilon$ : 유전율)에 의존한다. 종축전류  $I_L$ 은 그림 4에서의 R과 L에 의존하고 횡단누설전류  $I_T$ 는 C와 G에 의존한다. 따라서 매설지선의 길이가 상대적으로 짧게 되면 C 성분이 주로 작용하게 되며, 매설지선의 길이가 상대적으로 길게 되면 L 성분이 주로 작용하게 되었다[1, 5-6].

### 3.2 매설지선의 접지임피던스 특성

측정된 전류파형과 전위파형을 이용하여 매설지선의 임펄스전류 인가위치에 따른 과도접지임피던스

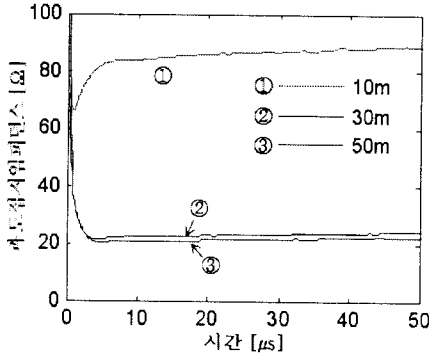
(Z-t곡선) 그림 5에 나타내었다.

과도접지임피던스는 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 매설지선의 전위를 인가전류로 나누어 산출하였다. 일반적으로 과도접지임피던스는 접지전극의 형상과 크기, 접지도체의 인덕턴스, 대지저항률, 인가전류의 상승시간, 인가위치 등 여러 가지 요인의 복합적 효과에 의존한다[7]. 길이 10 [m] 매설지선의 과도접지임피던스는 임펄스전류를 매설지선의 끝단과 중앙에서 인가한 경우 모두 5 [ $\mu$ s] 이전의 빠른 시간영역에서 접지저항보다 낮았으며, 시간이 흐름에 따라 접지저항으로 수렴하는 것으로 나타났다. 또한 임펄스전류를 매설지선의 중앙에 인가한 경우가 끝단에 인가한 경우보다 전반적으로 과도접지임피던스가 작게 나타났다. 이러한 용량성 특성은 대지저항률이 큰 장소에 길이가 비교적 짧은 매설지선에서 나타난다. 그러나 길이 30, 50 [m]인 매설지선의 끝단에 임펄스전류를 인가한 경우 5 [ $\mu$ s] 이전의 빠른 시간영역에서 과도접지임피던스는 지수함수적으로 감소하였으며, 시간이 흐름에 따라 점차적으로 접지저항에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 매설지선의 중앙점에 임펄스전류를 인가한 경우 1 [ $\mu$ s] 이전에 과도접지임피던스가 유도성을 나타냈으며, 이후에는 미약한 용량성으로 나타났다. 전반적으로 임펄스전류를 매설지선의 중앙점에 인가한 경우가 끝단에 인가한 경우보다 과도접지임피던스가 작게 나타났다. 동일한 크기의 임펄스 전류를 인가할지라도 인가전류의 분기회로가 2개가 되는 중앙점에 인가한 경우 한 방향으로 흐르는 끝단 인가보다는 과도접지임피던스가 작게 나타난다.

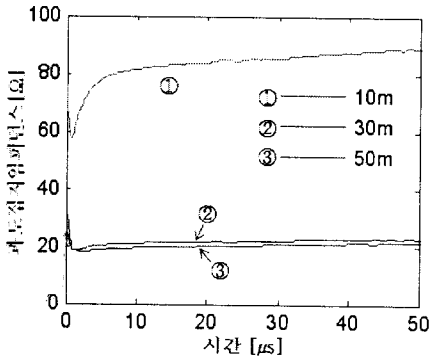
매설지선의 길이에 따른 과도접지임피던스 특성을 살펴보면 비교적 짧은 10 [m] 매설지선의 과도접지임피던스는 용량성을 나타내는 반면에 상대적으로 긴 30, 50 [m] 매설지선의 과도접지임피던스는 유도성을 나타냈다. 30 [m] 매설지선과 50 [m] 매설지선의 과도접지임피던스곡선은 3 [ $\mu$ s]에서 서로 교차하였다. 이는 매설지선의 길이가 길면 접지저항을 낮추는데 유효하지만 빠른 시간영역의 뇌서지전류가 접지전극에 유입되면 접지전극 자체의 인덕턴스로 인해 과도접지임피던스가 더 크게 나타나기 때문이다. 대지저항률에 따라 적절한 길이의 매설지선을

매설지선의 길이와 전류인가점에 따른 접지임피던스특성

선정한다면 과도접지임피던스가 용량성을 나타내어 뇌서지전류에 대한 매설지선의 접지성능을 높일 수 있다[7].



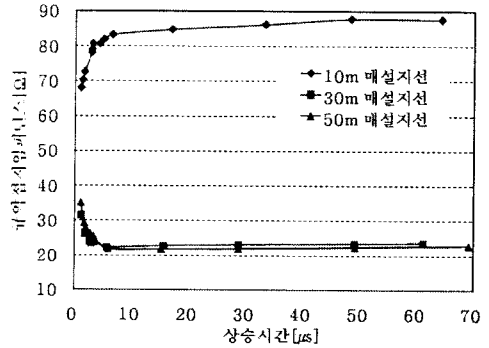
(a) 끝단에 인가한 경우



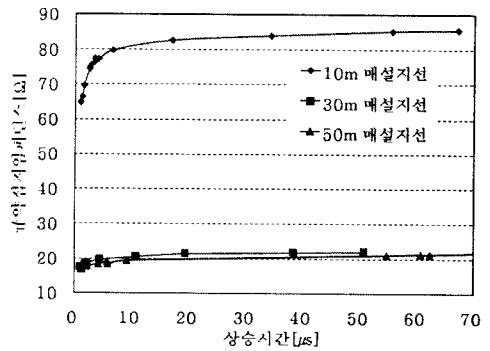
(b) 중앙점에 인가한 경우

그림 5. 임펄스전류의 인가위치에 따른 과도접지임피던스  
Fig. 5. Transient grounding impedances according to the injection point of impulse current

뇌서지전류에 대한 접지전극의 과도임피던스를 표기함에 있어 입사전류와 전위는 동위상이 아니므로 특정의 값으로 과도임피던스를 나타내는 것이 곤란하다. 따라서 접지전극에 서지전류가 입사한 경우 과도임피던스의 해석에 있어서 전위피크값과 전류피크값의 비를 이용한 규약접지임피던스가 널리 사용되고 있다. 접지전극에 임펄스전류  $i(t)$ 가 유입될 때 일반적으로 접지전극과 무한원점 사이에는 전압  $v(t)$ 가 나타나며, 접지전극의 저항뿐만 아니라 인덕턴스(L)나 정전용량(C)의 영향 때문에 임펄스전류  $i(t)$ 와 전압  $v(t)$ 의 피크가 동시에 나타나지 않는다.



(a) 끝단에 인가한 경우



(b) 중앙에 인가한 경우

그림 6. 임펄스전류의 인가위치에 따른 매설지선의 길이별 규약접지임피던스

Fig. 6. Conventional grounding impedances as a parameter of the length of counterpoise according to the injection point of impulse current

이 때 전위와 전류의 피크 값의 비 즉,

$$Z = \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad (1)$$

를 규약접지임피던스(conventional grounding impedance)라 정의한다[8]. 접지시스템의 임펄스전류에 대한 과도적인 특성에 대한 물리적 의미보다는 전류에 대한 전위의 정도를 나타내는 파라미터로 규약접지임피던스가 낮은 것이 뇌서지전류가 흐를 때 전위상승이 낮으므로 피뢰설비용으로 성능이 양호한 접지시스템이라고 볼 수 있다.

임펄스전류의 인가위치에 따른 매설지선의 규약

접지임피던스에 대한 매설지선의 길이별 측정결과를 그림 6에 나타내었다. 매설지선의 규약접지임피던스는 그림 5의 과도접지임피던스와 비슷한 양상을 보인다. 5[ $\mu$ s] 이하의 빠른 상승시간을 갖는 전류는 높은 주파수 성분을 갖고 있으며, 그림 5의 과도접지임피던스에서 5[ $\mu$ s] 이하 시간영역에서의 주파수 성분과 비슷하다.

매설지선의 과도접지임피던스를 분석하기 위해서는 높은 주파수 성분을 포함한 빠른 상승시간을 갖는 전류파형을 인가해서 분석해야 한다. 빠른 상승시간을 갖는 전류파형에서의 규약접지임피던스는 매설지선의 과도접지임피던스 특성을 나타내는 중요한 요소이다. 또한 규약접지임피던스는 인가전류의 상승시간뿐만 아니라 매설지선의 길이와 대지저항률 그리고 임펄스전류의 인가위치에 따라 다른 특성을 보인다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 매설지선에 임펄스전류가 인가된 경우 나타나는 과도접지임피던스와 규약접지임피던스의 특성을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대지저항률이 300~500 [ $\Omega \cdot m$ ]인 장소에 설치된 매설지선의 길이에 따른 과도접지임피던스는 길이가 짧을 경우(10[m]) 용량성을 나타내며, 그리고 길이가 긴 경우(30, 50[m]) 유도성을 나타내었으며, 전반적으로 시간이 흐름에 따라 접지저항에 수렴하였다.
- (2) 매설지선의 중앙점에 임펄스전류를 인가하면 끝단에 인가하는 것에 비하여 입사전류의 분류와 매설지선의 길이가 짧아지는 상승적 효과로 접지임피던스의 과도적 특성이 우수한 것으로 나타났다.
- (3) 임펄스전류의 상승시간에 대한 규약접지임피던스는 과도접지임피던스와 유사한 경향이었으며, 매설지선의 적절한 길이와 접지도선의 접속위치를 선정하는 것은 과도접지임피던스 특성의 향상에 매우 효과적이다.

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

#### References

- [1] S. Visacro, "A didactic general approach of grounding behavior for lightning currents", Proceedings of the 27th ICLP-International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, Vol. 1, pp. 508-513, 2004.
- [2] 이복희: 접지의 핵심 기초 기술, 도서출판 의재, pp.87, 1999.
- [3] KS C IEC 62305-1, 피뢰시스템-제1부: 일반원칙, pp.3-15, 2007
- [4] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", IEEE Inc., pp.1731, 1991.
- [5] Leonid Grcev, "High frequency performance of ground rods in highly resistive soil". International Conference on Grounding and Earthing, pp.85-89, 2000.
- [6] L. Grcev, "Modeling of grounding systems for better protection of communication installations against effects from electric power system and lightning", IEE Conf. Pub., No. 484, pp. 461-468, 2001
- [7] Leonid Grcev, "Improved design of power transmission line grounding arrangements for better protection against effects of lightning", proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, C1-7, pp.100-103, 1998.
- [8] B. R. Gupta and B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids", IEEE Trans. Vol.PAS-99, No.6, pp.214-218, 1980.

#### ◆ 저자소개 ◆

##### 이 봉 (李 峰)

2006년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032) 863-5822

E-mail : lifeng197895@hanmail.net

##### 이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1987년 인하대 대학원 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