

## 대지저항률에 따른 매설지선의 접지임피던스의 주파수의존성

(Frequency-Dependent Grounding Impedances of Counterpoises Associated with Soil Resistivity)

김태기\* · 최영철 · 최중혁 · 이복희\*\*

(Tae-Ki Kim · Young-Chul Choi · Jong-Hyuk Choi · Bok-Hee Lee)

### 요 약

본 논문에서는 대지저항률과 매설지선의 길이 그리고 접지전류의 인가점에 따른 매설지선 접지임피던스의 주파수 의존성에 대하여 살펴보았다. 단일 구조와 2층 구조의 대지에 설치된 매설지선의 접지임피던스를 1[kHz]에서 10[MHz]의 주파수 범위에서 측정하고 분석하였다. 그 결과, 접지임피던스의 주파수 의존성은 대지저항률에 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 그리고 높은 대지저항률의 대지에 설치된 매설지선의 접지임피던스는 수십 [kHz] 이하의 주파수에서 용량성 특성을 나타내었다. 높은 대지저항률을 갖는 대지에 설치된 매설지선의 끝단에 접지전류를 인가한 경우 접지임피던스는 높은 주파수 영역에서 증가하였다.

### Abstract

This paper deals with the frequency-dependent grounding impedances of counterpoises relevant to the soil resistivity, the length of counterpoises and the feeding point of test current. The grounding impedances of counterpoises buried in one-layered and two-layered soils were measured and analyzed in the frequency range from 1[kHz] to 10[MHz]. As a result, the frequency-dependent grounding impedances strongly depend on the soil resistivity, and the grounding impedances within the frequency of several tens [kHz] are capacitive behavior in high soil resistivity. When injecting the ground current to the end of counterpoise buried in soil with high resistivity, the grounding impedances in high frequency are increased.

Key Words : Counterpoise, Grounding Impedance, Ground Resistance,  
Frequency-Dependent Grounding Impedance, Soil Resistivity

---

\* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
\*\* 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2010년 1월 21일  
1차심사 : 2010년 1월 26일  
심사완료 : 2010년 2월 25일

## 1. 서 론

최근 고도 정보화 사회로 발전되면서 전력전송 전압의 고전압화, 전원 전압의 승압, 정보통신설비를 비롯하여 제어기기, 자동화기기, 사무화기기 등 각종 설비가 전자기기화로의 진보에 따라 안전성과 운용의 신뢰성에 직접적으로 관련되어 있는 접지시스템에 대한 관심이 가일층 고조되고 있다. 선진국의 경우 접지에 대한 연구가 활성화 되어 다양한 접지시스템에 대한 연구가 이루어져 적용되고 있으나 국내에서는 고주파용 접지시스템에 대한 연구가 활성화되지 못하여, 접지공사 기법에 대해서 정확하게 밝혀지지 않은 점이 많이 있다[1]. 특히 접지전극에 뇌서지 전류와 같이 수 [MHz]에 이르는 고주파 성분이 포함된 전류가 유입되게 되는 경우 낮은 주파수의 전류가 흐를 때와는 다른 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다[2]. 이에 따라 접지저항만으로는 접지시스템의 성능을 정확하게 평가할 수 없으며, 고주파 측정 전류를 사용하여 접지임피던스 차원의 성능평가가 필요하다. 접지임피던스는 접지전극의 형상 및 길이에 따른 R, L 및 대지저항률에 관련된 C, G에 따라 복잡한 특성을 나타내게 된다. 특히 대지저항률은 온도, 습도 및 토양의 입자의 크기 등에 따라 변동하며, 대지저항률은 접지임피던스에 상당히 크게 영향을 미치게 된다[3].

본 논문에서는 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수의존성을 평가하기 위하여, 시설비용이 저렴하고, 시공이 편리하여 송전철탑의 피뢰설비용 접지전극으로 사용되는 매설지선을 선정하였다. 3개의 길이 10[m] 매설지선과 2개의 30[m], 50[m] 매설지선을 대지저항률이 다른 곳에 설치하여 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수의존성을 분석하였으며, 길이 10[m] 매설지선의 한쪽 5[m] 부분의 토양과 50[m] 매설지선의 한쪽 25[m]의 토양에 탄소가루를 산포하여 대지저항률이 다른 위치에 접지전류를 인가한 경우 접지임피던스의 주파수의존성을 측정하고 평가하였다.

## 2. 실험계

접지임피던스의 주파수 의존성을 평가하기 위하여 그림 1과 같은 실험계를 구성하였다. IEEE Std. 81.2에 제시된 수정된 전위강하법을 사용하여 전자유도에 의한 오차를 줄이기 위해서 90°로 전류보조전극과 전위보조전극을 설치하였다[4]. 특히 매설지선의 경우 전류보조전극과 전위보조전극을 90°로 배치하는 2가지 방법이 있으나 전류보조전극을 매설지선의 길이 방향에 위치시키는 것이 전류의 흐름으로 인해 발생하는 전위보조전극의 전위상승에 따른 도전유도의 영향이 작기 때문에 본 연구에서는 모든 전류보조전극의 위치를 그림 1과 같이 설치하였다[5].

수정된 전위강하법의 경우 전류보조전극과 전위보조전극의 90° 배치로 도전유도에 의한 오차가 나타나기 때문에 이를 최소화하여, 정확한 접지임피던스의 측정을 위하여 도전유도에 의한 오차가 5%이내인 거리를 선정하여 전류보조전극과 전위보조전극을 설치하였다[6].

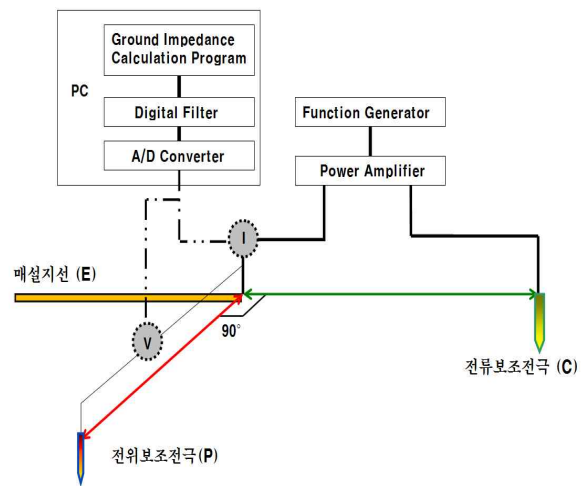


그림 1. 접지임피던스 측정을 위한 실험계  
Fig. 1. Experimental setup for measuring the grounding impedance

매설지선의 접지임피던스 측정을 위해 DC-80 [MHz]의 전류를 인가할 수 있는 함수발생기와 주파수대역이 DC~250 [MHz]이고 최대 출력이 75 [W]인

전력증폭기를 이용하여 1[kHz]에서 10[MHz] 주파수 범위의 접지전류를 인가하였다. DC~50[MHz]의 주파수대역을 갖는 능동형 전류프로브와 차동전압프로브를 사용하여 전류와 전압을 검출하였다. 측정된 신호는 100[MS/s]의 sampling rate를 갖는 A/D 변환기를 통하여 개인용 컴퓨터로 전송되며, 디지털 필터를 이용하여 노이즈를 제거하였다. 이렇게 측정된 전압과 전류 크기의 비를 이용하여 임피던스를 산출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성

그림 2와 같이 길이 10[m] 매설지선 3개, 30[m] 매설지선 2개, 50[m] 매설지선 2개를 설치하여 각각의 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수의존성을 측정하고 평가하였다. 매설지선은 단면적이 25[mm<sup>2</sup>]의 나동선으로 지면으로부터 0.5[m] 깊이에 매설하고, 단면적 25[mm<sup>2</sup>]의 GV전선을 접지도선으로 사용하였으며, 접지전류의 인가위치는 매설지선의 끝단으로 하였다. 각 접지극간의 상호 간섭을 배제하기 위해서 충분한 이격거리를 두고 시설하였다[7].

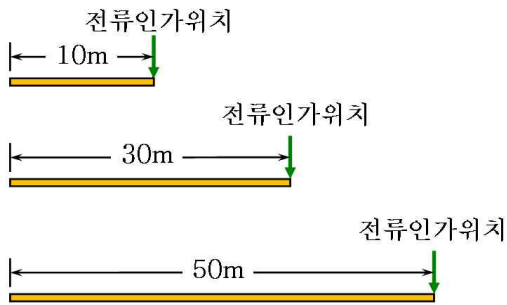


그림 2. 측정대상 매설지선의 형상  
Fig. 2. Configurations of the counterpoise intended for measurement

길이 10[m] 매설지선이 설치된 3곳의 겹보기 대지저항률은 H. B. Dwight에 의해 제안된 매설지선의 접지저항을 산출하는 식 (1)로 구하였다[8].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \ln \frac{2l}{a} + \ln \frac{l}{h} - \frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{2l^4} \right] \quad (1)$$

식 (1)에서  $R$ 은 접지저항,  $\rho$ 는 대지저항률,  $l$ 은 매설지선의 길이,  $a$ 는 매설지선의 반지름,  $h$ 는 매설지선의 매설깊이를 나타낸다. 이렇게 매설지선의 접지저항을 산출하는 식으로부터 역산하여 산출한 10[m] 매설지선이 설치된 3곳의 겹보기 대지저항률의 값을 표 1에 나타내었다.

표 1. 10[m] 매설지선이 설치된 3곳의 겹보기 대지저항률

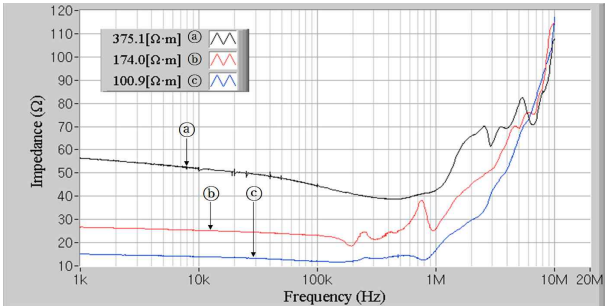
Table 1. Apparent soil resistivity at three places where the 10[m] counterpoises were buried

구 분	10-Ⓐ	10-Ⓑ	10-Ⓒ
접지저항[Ω]	59.6	27.6	16.0
겹보기 대지저항률 [Ω·m]	375	174	101

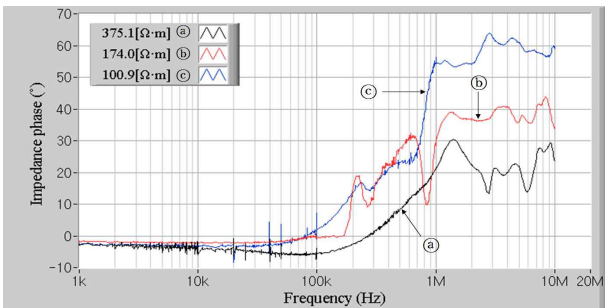
접지저항은 대지저항률에 직접적으로 영향을 받지만 접지임피던스는 인가되는 전류의 주파수에 따라 다른 양상을 보이기 때문에 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성을 실험적으로 분석하였다.

길이 10[m] 매설지선에 대하여 접지전류의 주파수에 따른 접지임피던스의 측정결과를 그림 3에 나타내었다. 10[m] 매설지선의 접지임피던스는 주파수가 증가함에 따라 3가지 경우 모두 서서히 감소하다가 수백 [kHz]의 주파수에서 증가하기 시작하였다. 대지저항률이 가장 높은 375[Ω·m]인 위치에 설치된 매설지선의 접지임피던스의 주파수의 증가에 따른 감소가 가장 크게 나타났다. 이는 대지저항률이 101[Ω·m]일 때보다 대지저항률이 클 때가 대지의 커패시턴스 성분이 접지임피던스에 더 크게 영향을 미치기 때문이라 판단된다. 또한 1[MHz] 이상의 주파수에서는 3가지 경우 모두 접지임피던스가 증가하는 양상을 나타내었다. 이는 주파수가 증가함에 따라 대지의 컨덕턴스와 유전율의 영향보다 인덕턴스가 더 크게 영향을 미치기 때문이라 판단된다. 일반적으로 뇌격의 주파

수 스펙트럼의 고주파수 성분이 약 1[MHz] 정도를 나타내기 때문에 낮은 대지저항률을 갖는 위치에 접지 전극을 설치하는 것이 접지저항 뿐만 아니라 접지임피던스의 저감에도 효과적인 것으로 판단된다.



(a) 접지임피던스



(b) 위상차

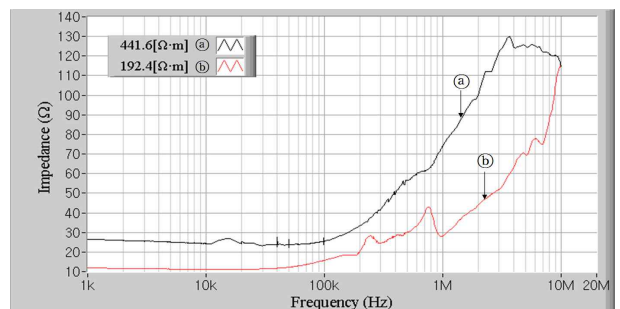
그림 3. 대지저항률에 따른 10[m] 매설지선의 접지임피던스와 위상차의 주파수의존성  
Fig. 3. Frequency-dependant grounding impedances and impedance phase of the 10[m] counterpoises as a parameter of soil resistivity

표 2. 30[m] 매설지선이 설치된 2곳의 겉보기 대지저항률  
Table 2. Apparent soil resistivity at two places where the 30[m] counterpoises were buried

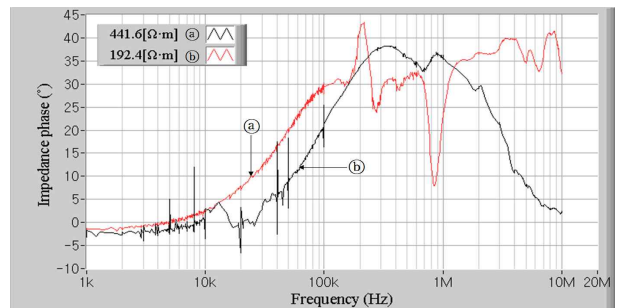
구 조	30-①	30-②
접지저항[Ω]	28	12
겉보기 대지저항률[Ω·m]	442	192

길이 30[m] 매설지선의 접지저항과 이를 통하여 식 (1)을 사용하여 산출한 30[m] 매설지선이 설치된 지점의 겉보기 대지저항률을 표 2에 나타내었다.

표 2에 나타낸 바와 같이 길이 30[m]인 2개의 매설지선의 접지저항은 2배 이상의 차이를 보였다. 이에 따라 대지저항률 또한 2배 이상의 대지저항률을 나타냈다. 대지저항률이 다른 곳에 매설된 2개의 매설지선의 주파수에 따른 접지임피던스를 그림 4에 나타냈다.



(a) 접지임피던스



(b) 위상차

그림 4. 대지저항률에 따른 30[m] 매설지선의 접지임피던스와 위상차의 주파수의존성  
Fig. 4. Frequency-dependant grounding impedances and impedance phase of the 30[m] counterpoises as a parameter of soil resistivity

대지저항률이 442[Ω·m]인 경우 약 100[kHz]에서부터 대지저항률이 낮은 192[Ω·m]인 경우 약 50[kHz]에서부터 접지임피던스가 증가하는 추세를 나타내었다. 이는 10[m] 매설지선에서보다 낮은 주파수에서부터 접지임피던스가 증가하는 경향을 보여주는 것으로 접

지전극의 인덕턴스가 10[m] 매설지선에 비해 30[m] 매설지선이 더 크기 때문이라 판단된다.

2개의 30[m] 매설지선의 경우 인덕턴스는 같겠지만 대지저항률이 작은 경우 컨덕턴스와 유전율이 크기 때문에 인덕턴스의 영향이 낮은 주파수에서부터 나타나는 것으로 판단된다. 이에 따라 낮은 대지저항률의 토양에 매설된 매설지선은 높은 대지저항률에 매설된 매설지선에 비하여 좀 더 낮은 주파수에서부터 접지임피던스의 증가가 나타나는 것으로 판단된다.

높은 대지저항률인 위치에 설치된 경우보다 낮은 대지저항률인 장소에 설치된 매설지선이 컨덕턴스와 커패시턴스성분이 더 작아 인덕턴스에 의한 영향이 더 크게 작용하므로 낮은 주파수에서부터 접지임피던스가 증가할지라도, 낮은 주파수에서는 그 증가되는 비율이 작고 접지저항이 작기 때문에 접지임피던스는 더 커지지 않는다. 낮은 대지저항률의 대지에 매설지선을 설치하는 것이 작은 접지임피던스를 얻기 위한 방법이라 판단된다.

길이 50[m] 매설지선이 설치된 2곳의 겉보기 대지저항률을 표 3에 나타내었다. 대지저항률의 차이가 3배가 넘는 조건에서의 접지임피던스의 주파수의존성에 대하여 측정된 결과를 그림 5에 나타내었다.

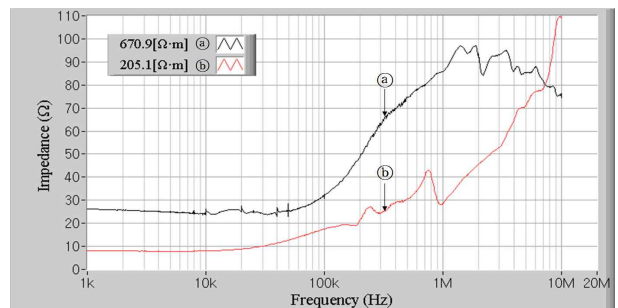
표 3. 50[m] 매설지선이 설치된 2곳의 겉보기 대지저항률

Table 3. Apparent soil resistivity at two places where the 50[m] counterpoises were buried

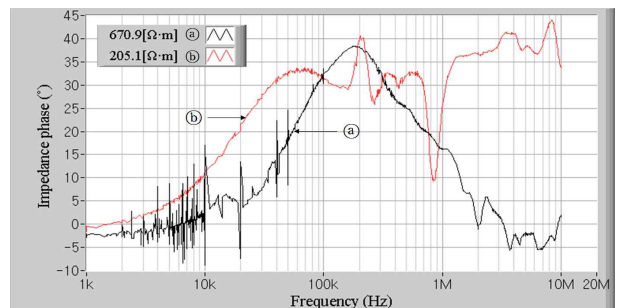
구 조	50-①	50-②
접지저항[Ω]	28	6
겉보기 대지저항률 [Ω·m]	671	205

길이 10[m], 30[m] 매설지선과 마찬가지로 50[m] 매설지선 또한 대지저항률이 낮은 경우 접지임피던스가 감소하는 경향은 저주파수에서만 나타났으며, 20 [kHz] 이상의 주파수에서부터 증가하는 추세를 나타냈다. 높은 대지저항률에서의 경우도 약 50[kHz]부터

증가하는 추세를 나타내었으며, 10[m], 30[m] 매설지선에 비하여 낮은 주파수에서부터 증가하는 추세를 나타냈다. 이는 길이 10[m], 30[m] 매설지선에 비하여 50[m] 매설지선의 인덕턴스가 크기 때문이라 판단된다. 7[MHz] 이상의 주파수에서는 낮은 대지저항률에서의 접지임피던스가 더 크지만 뇌격에 의한 고주파 전류의 성분이 약 1[MHz] 정도의 스펙트럼을 갖기 때문에 낮은 대지저항률의 대지에 매설지선을 설치하는 것이 피뢰설비용 접지임피던스의 저감을 위한 좋은 방법이라 판단된다.



(a) 접지임피던스



(b) 위상차

그림 5. 대지저항률에 따른 50[m] 매설지선의 접지임피던스와 위상차의 주파수의존성

Fig. 5. Frequency-dependant grounding impedances and impedance phase of the 50[m] counterpoises as a parameter of soil resistivity

### 3.2 접지전류의 인가위치에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성

접지전극 주변의 대지저항률에 따른 접지임피던스

의 주파수의존성을 분석하기 위하여 10[m] 매설지선의 경우 그림 6 (a)와 같이 5[m]에 대하여 1[m] × 1[m]의 토양에 탄소가루를 혼합하여 수평 2층 구조의 토양으로 만들었다. 그림 6 (b)와 같이 길이 50[m] 매설지선의 절반인 25[m]의 매설위치 1[m] × 1[m]의 토양에 탄소가루를 혼합하여 수평 2층 구조를 만들었다. 탄소가루를 사용하여 대지저항률을 낮춘 부분의 겉보기 대지저항률은 약 150[Ω · m]이고 치환하기 전 겉보기 대지저항률은 약 376[Ω · m]이다.

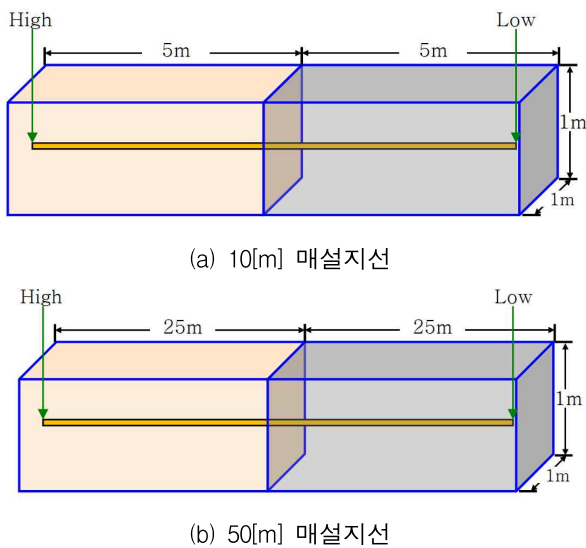
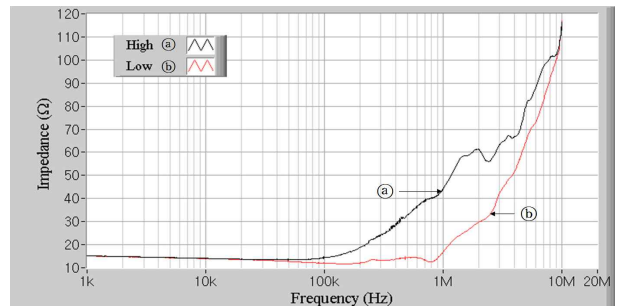


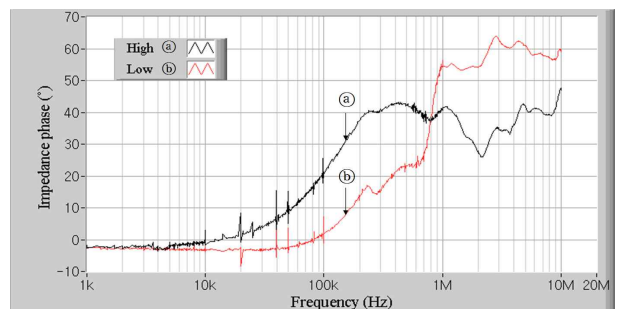
그림 6. 2층 대지에 설치된 매설지선의 개요  
Fig. 6. Layout of the counterpoises buried in two-layered soils

그림 6 (a)에 나타난 것과 같이 길이 10[m] 매설지선의 한쪽 5[m]를 탄소가루를 산포하여 대지저항률을 낮춘 쪽의 전류인가점을 Low, 그렇지 아니한 쪽의 인가점을 High로 설정하여 접지전류의 인가점의 대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수의존성에 대하여 측정하였다. 양 끝단에서 접지저항을 측정한 경우 16 [Ω]으로 접지저항은 같게 나타났다. 이는 저주파수에서는 접지전류가 인가점에서부터 반대편 끝단까지 균일하게 흐름으로써 그 차이가 나타나지 않기 때문이라 판단된다. 2층 대지구조에 설치된 10[m] 매설지선의 양 끝단에서 측정한 접지임피던스를 그림 7에 나타내었다.

약 50[kHz]까지는 두 경우가 거의 같은 값을 나타내지만 접지저항과는 다르게 그 이상의 주파수에서는 인가점에 따라 확연한 차이를 나타낸다. High쪽에서 측정한 접지임피던스는 Low쪽에서 측정한 접지임피던스에 비하여 급격하게 증가하는 경향을 보이며, 2[MHz]에서 High쪽에서 측정한 경우 약 60[Ω]의 접지임피던스를 나타낸 반면, Low쪽에서 측정한 접지임피던스는 약 30[Ω] 정도의 접지임피던스를 나타내었다. 이는 High쪽에 전류를 인가한 경우 주파수가 올라갈수록 측정전류가 접지전극의 끝까지 도달하지 못하고 전극 자체에서 전위차가 발생되어 접지전극 후단의 대지저항률이 낮은 부분의 영향을 받지 못하기 때문이라 판단된다.



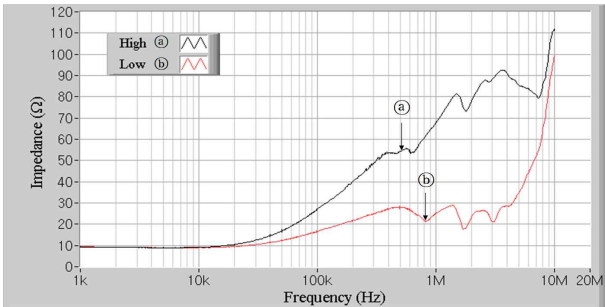
(a) 접지임피던스



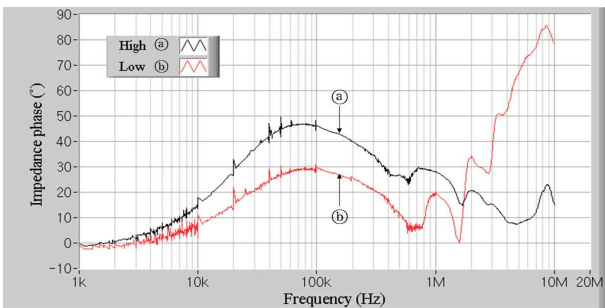
(b) 위상차

그림 7. 전류의 인가점의 대지저항률에 따른 10[m] 매설지선의 접지임피던스의 주파수의존성  
Fig. 7. Frequency-dependant grounding impedances of the 10[m] counterpoise relevant to the soil resistivity at the injected point of test current

그림 6 (b)에 나타낸 것과 같이 길이 50[m] 매설지선 또한 25[m]를 탄소가루를 이용하여 대지저항률을 낮게 하여 실험하였다. 접지저항은 10[Ω]으로 양 끝단의 전류인가점에서 모두 동일하게 측정되었다. 하지만 접지임피던스의 경우 그림 8에서 나타낸 것과 같이 약 20[kHz]에서부터 접지임피던스가 차이가 나타났다.



(a) 50[m] 매설지선의 접지임피던스



(b) 50[m] 매설지선의 위상차

그림 8. 전류의 인가지점의 대지저항률에 따른 50[m] 매설지선의 접지임피던스의 주파수 의존성

Fig. 8. Frequency-dependant grounding impedances of the 50[m] counterpoise relevant to the soil resistivity at the injection point of test current

길이 10[m] 매설지선에 비하여 50[m] 매설지선의 경우 더 낮은 주파수에서부터 접지임피던스의 차이가 나타나는 것은 50[m] 매설지선에서 대지저항률이 낮은 토양에서의 길이가 더 길기 때문인 것으로 판단된다. 3[MHz]의 주파수에서 Low쪽에서 측정한 접지임피던스는 약 20[Ω]으로 나타났지만 High쪽에서 측정한 접지임피던스는 약 90[Ω]으로 그 차이가 4배 이상으로 나타났다. Low쪽에서 접지임피던스를 측정하는 경우

주파수가 증가하여도 대지저항률이 낮은 부분에서 전류가 대지로 모두 방류되고 대지저항률이 높은 접지전극의 후단으로는 전류가 거의 흐르지 않게 되어 높은 주파수까지 낮은 접지임피던스를 유지하는 것으로 판단된다. 따라서 매설지선을 시공할 때 접지도선을 대지저항률이 낮은 위치에 접속하는 것이 접지임피던스의 저감에 큰 효과가 있는 것으로 밝혀졌다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 대지저항률에 따른 매설지선의 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 길이의 매설지선에서 매설지선이 설치된 위치의 대지저항률이 낮을수록 더 낮은 주파수에서부터 접지임피던스가 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 매설지선을 대지저항률이 낮은 대지에 설치하는 것은 접지저항뿐만 아니라 접지임피던스의 저감에 효과적이다.
- (3) 매설지선의 길이가 긴 경우 인덕턴스의 영향으로 짧은 매설지선에 비하여 더 낮은 주파수에서부터 접지임피던스가 크게 나타난다.
- (4) 매설지선 주변의 대지저항률이 다를 경우 접지도선을 대지저항률이 낮은 곳에서 인출하는 것이 접지임피던스의 저감에 효과가 큰 것으로 밝혀졌다.

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.1~23, 1999.
- [2] R Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar, “Experimental Study of Transient Ground Impedances”, IEEE Tras. PAS, Vol.100, No.11, pp.4653~4660, 1981.
- [3] 이복희, 조성철, 엄주홍, “대지저항률의 주파수 의존성”, 한국조명·전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp.373~376, 2003.

- [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. 4~15, 1991.
- [5] 최종혁, 최영철, 이복희, "수직 접지전극의 접지임피던스 측정에서 도전유도에 의한 오차 평가", 전기학회 논문지, Vol. 58, No. 9, pp.1778~1783, 2009.
- [6] Masanobu Tsumura, Yoshihiro Baba, "FDTD Simulation of a Horizontal Grounding Electrode and Modeling of its Equivalent Circuit", IEEE Trans. on EC, Vol.48, No.4, pp. 817-825, 2006.
- [7] 김태기 외, "심매설 접지전극의 접지임피던스의 주파수 의존성", 한국조명·전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp.70~73, 2008.
- [8] H. B. Dwight, "Calculations of Resistance to Ground", Electrical Eng, Vol. 55, pp.1319, 1936.



**최영철**(崔泳喆)

1980년 6월 28일생. 2008년 8월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : babocyc@hotmail.com



**최중혁**(崔鍾赫)

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

◆ 저자소개 ◆



**김태기**(金泰己)

1970년 7월 12일생. 2008년 8월 인하대 공학대학원 정보전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.  
Tel : (02)3393-7671,  
Fax : (02)3393-7689  
E-mail : ktk@electricity.or.kr



**이복희**(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 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