

## 탄소블록과 동봉의 접지임피던스 비교 분석

서재석<sup>1</sup>, 박희철<sup>1</sup>, 길경석<sup>1,a</sup>, 오재근<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국해양대학교 전기전자공학부

<sup>2</sup> 국립과학수사연구원

### Comparative Analysis on Ground Impedance for a Carbon Block and a Copper Rod

Jae-Suk Seo<sup>1</sup>, Hee-Chul Park<sup>1</sup>, Gyung-Suk Kil<sup>1,a</sup>, and Jae-Geun Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

<sup>2</sup> National Forensic Service, Busan 626-810, Korea

(Received May 20, 2013; Revised May 24, 2013; Accepted May 24, 2013)

**Abstract:** This paper carried out the comparative analysis on ground impedance of a carbon block and a copper rod. Two types of grounding electrode were compared ; a carbon block (L : 1 m,  $\Phi$  : 245 mm) buried at a depth of 0.8 m and a three-linked copper rod (L : 1 m,  $\Phi$  : 10 mm) of equilateral triangles with 1 m spacing. Ground impedance depending on applied current source was evaluated by the application of a sine wave current with 60 Hz ~ 3.5 MHz, a fast-rise pulse with rising time of 200 ns, a standard lightning impulse of 8/20  $\mu$ s and a 600 Hz square wave. Ground impedance for both electrodes were almost the same value below 100 kHz, and increased rapidly afterwards. The maximum ground impedance appeared 400  $\Omega$  at around 1.5 MHz. Ground impedance of the carbon block was lower at the square wave and was higher at fast-rise pulse than that of the copper rod. Also, ground impedance as ages showed no difference for the last 8 months. From the results, it is likely that ground performance for both electrodes shows no difference against commercial frequency and lightning impulse current, while the copper rod shows better performance against a fast-rise pulse with rise-time of a few hundred ns.

**Keywords:** Ground impedance, Carbon block, copper rod, Current source, Sine wave, Standard lightning impulse, Fast-rise pulse, Square wave

### 1. 서론

접지시스템의 접지저항은 고장전류를 단시간 내에 대지로 흘려보내기 위해 가능한 낮은 저항이 요구되며, 이를 위한 다양한 형태의 접지극이 개발되고 있다 [1-3]. 접지설계 시 피접지체의 종류와 접지목적에 따라 접지극을 선정하며, 그 형상에 따라 동봉으로 설계하는 봉상접지, 동판 등을 이용한 판상접지 및 메쉬접지 등이 있다. 최근에는 접지 성능을 향상시키

a. Corresponding author; kilgs@hhu.ac.kr

기 위해 탄소접지, 전해질접지 등 다양한 형태의 접지극이 개발되고 있다. 동봉은 시공 방법과 경제적인 장점이 있어 가장 많이 사용되어 왔으며, 최근에는 흑연으로 접지극과 토양 사이의 접촉면적을 극대화시켜 전류의 흐름을 원활하게 하며 동봉에 비해 부식이 적다는 장점으로 탄소블록의 적용이 증가하고 있다 [4,5]. 그러나 현재 탄소블록과 동봉의 접지 성능에 대한 자료가 부족한 실정이므로, 본 논문에서는 이들 접지극에 대해 인가 전류원별 그리고 경년에 따른 접지임피던스의 변화를 비교·분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 접지극

본 논문에서는 건설 현장에서 접지극의 대부분을 차지하는 동봉과 탄소블록을 대상으로 실험하였다. 탄소블록은 탄소분말에 40% 정도의 도전성 콘크리트를 혼합하여 성형하고 전기적 접속을 위해 중앙에 구리(Cu)봉을 삽입한 것으로, 그림 1과 같이 길이 1 m, 직경 245 mm의 정육각형 블록을 깊이 0.8 m에 가로로 매설하였다. 동봉은 철(Fe)봉에 두께 0.3 mm ~ 0.5 mm의 구리를 피막한 것으로, 그림 2와 같이 길이 1 m, 직경 10 mm의 동봉 3개를 1 m 간격의 정삼각형으로 배치하여 깊이 0.8 m에 매설하였다.

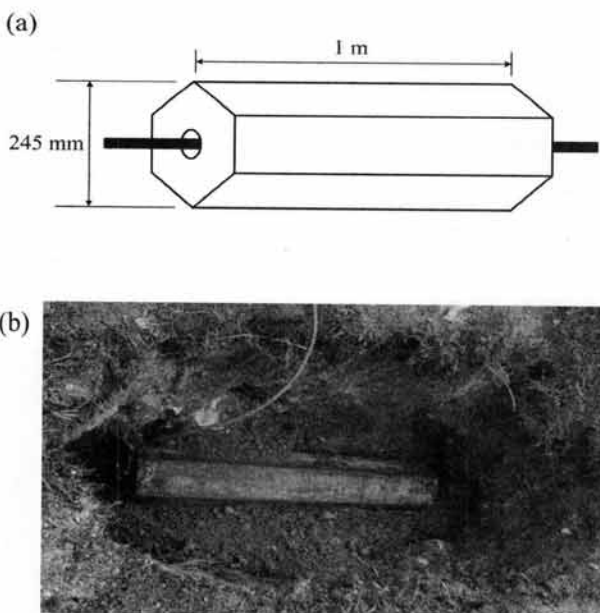


Fig. 1. Carbon block. (a) configuration, (b) photograph.

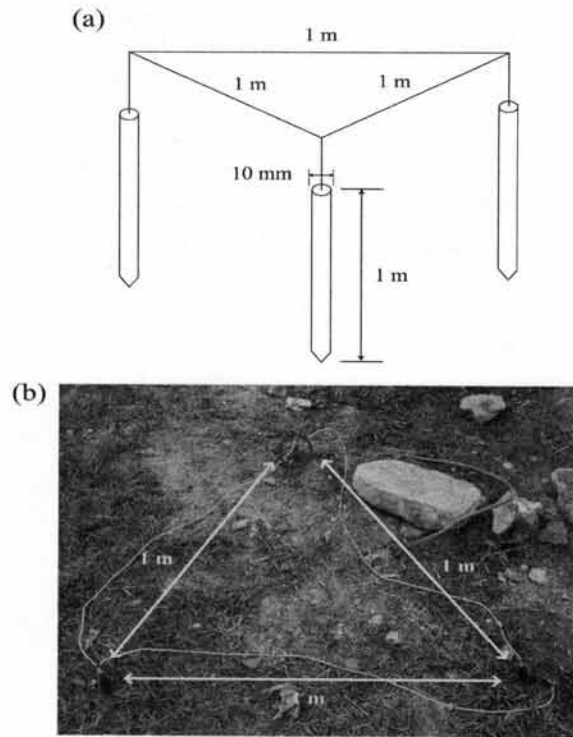


Fig. 2. copper rod. (a) configuration, (b) photograph.

### 2.2 전류원

일반적으로 접지저항은 1 kHz 이하의 상용주파수 전류를 인가하여 측정하며 고주파 영역에서는 접지임피던스로 측정된다. 접지저항과 접지임피던스는 접지극의 리액턴스 성분에 의한 영향이다.

단순히 저항성분으로 표시되는 것은 저주파로 리액턴스 성분의 영향이 매우 작기 때문이며, 고주파 즉, 낙뢰나 지락 등의 과도전류가 유입되면 접지극의 리액턴스에 의한 전압강하, 도체 간의 유도전압 및 대지의 캐패시턴스에 대한 영향이 매우 커져 접지임피던스로 측정된다. 이때 접지저항과 접지임피던스의 크기에 상당한 차이가 있어 전류원에 따라 전위상승이 달라지게 된다 [6-9]. 이와 같이 인가전류의 주파수 성분 또는 상승 시간에 따라 접지극의 전위 상승이 달라지므로 저주파 또는 상승 시간이 완만한 전류원을 인가하여 얻어진 접지저항으로 접지극의 성능을 평가하기는 어렵다. 따라서 접지성능은 저주파에서의 접지저항뿐만 아니라 수백 kHz 이상의 고주파 영역에서의 접지임피던스도 평가되어야 한다 [10-12].

본 논문에서 적용한 전류원의 사양은 표 1과 같으며, 이들 파형의 예를 그림 3에 나타내었다.

Table 1. Specification of the current source.

Current source	Specification
Sine wave	60 Hz ~ 3.5 MHz, 100 mA <sub>max</sub>
Fast-rise pulse	$t_r$ : 200 ns, 500 A <sub>max</sub>
Standard lightning impulse	8/20 $\mu$ s, 2.1 kA <sub>max</sub>
Square wave	600 Hz, 30 mA <sub>max</sub>

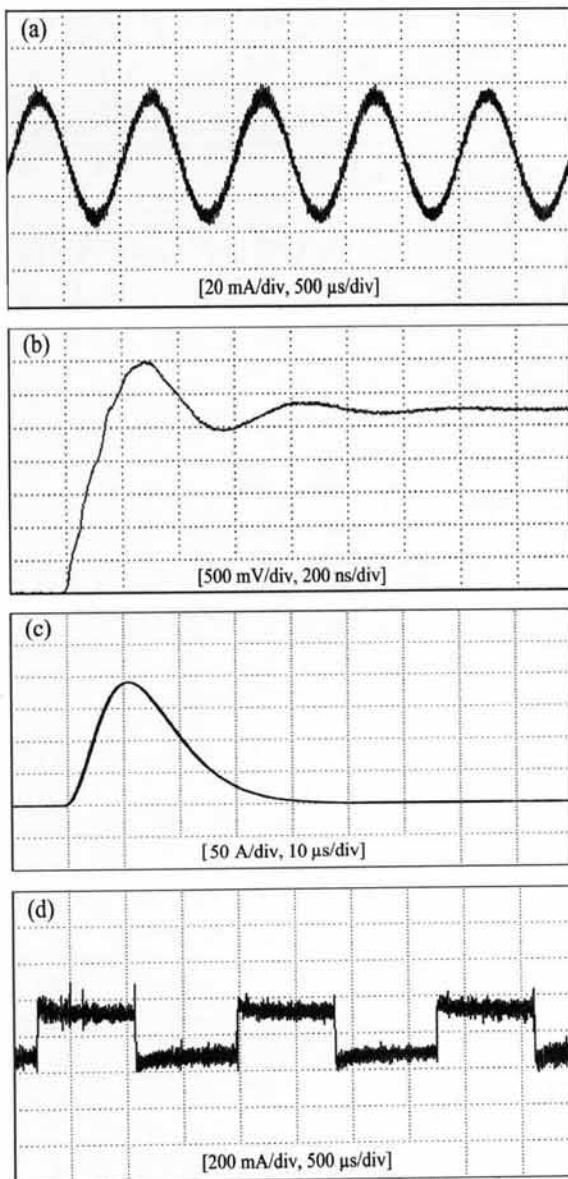


Fig. 3. Typical waveforms of current source. (a) sine wave, (b) 200 ns fast-rise pulse, (c) 8/20  $\mu$ s standard lightning impulse, (d) 600 Hz square wave.

주파수 대역이 60 Hz ~ 3.5 MHz인 정현파 전류로 접지극의 주파수 상승에 따른 임피던스 변화를 분석하였다. 접지계에 발생할 수 있는 전류로 상승시간 200 ns인 급준파 펄스, 8/20  $\mu$ s 표준 뇌 충격 전류 및 600 Hz 구형파를 모의하여 전류원에 대한 접지임피던스와 8개월 간 주기적인 측정으로 경년에 따른 접지극의 물리화학적 변화를 비교하였다.

### 2.3 측정

그림 4와 같이 실험계를 구성하고 IEEE Std. 81에 제시된 전위강하법으로 접지임피던스를 측정하였다 [13]. 접지극 및 보조전극은 일직선 형태로 배치하였으며, E극-C극의 간격은 10 m이고, E극-C극 사이의 61.8%인 지점에 P극을 위치시켰다. C극과 E극을 통해 전류를 인가하여 P극과 E극의 대지전위상승을 측정함으로써 접지임피던스를 산출하였다.

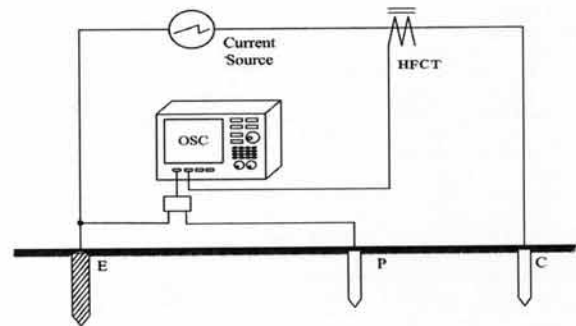


Fig. 4. Configuration of the measurement system.

인가전류 및 대지전위 상승의 측정에는 고주파 변류기 (HFCT, 0.1 V/A, 20 MHz)와 디지털 오실로스코프 (500 MHz, 1 GS/s, 2 Ch.)를 사용하였다. 접지임피던스는 인가전류에 따른 대지전위 상승의 최댓값의 비인 실효값으로 산출하였다. 이는 뇌 충격 전류에 의한 접지시스템의 보호 종류와 보호 수준을 결정하는 중요한 요소이다. 접지극을 설치한 후 접지임피던스를 8개월 간 주기적으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 주파수 의존성

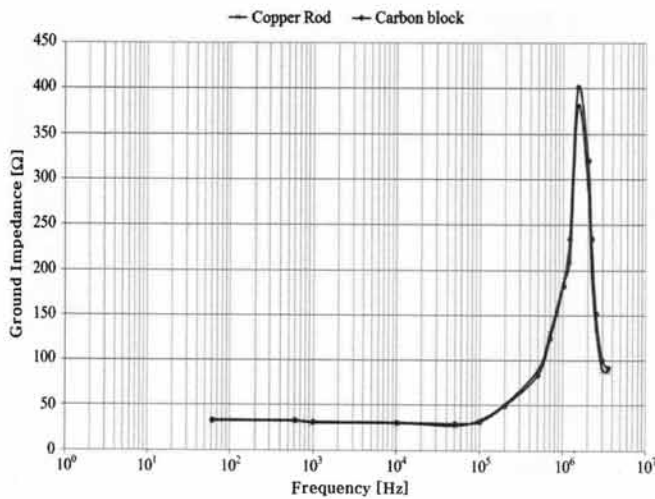


Fig. 5. Changes of ground impedance as a function of frequency.

그림 5에 주파수 증가에 따른 접지임피던스를 나타내었다. 두 접지극 모두 100 kHz까지 변화가 없었으나, 그 이후 유도성으로 전환되면서 접지임피던스가 급격하게 상승하였다. 1.5 MHz 부근에서 400 Ω로 저주파에 비해 10배 정도 증가하였으며, 다시 급격하게 감소하는 용량성을 나타내었다. 두 접지극에서 주파수 증가에 따라 동일한 변화를 보였으며, 1.5 MHz에서 동봉의 접지임피던스는 탄소블록에 비해 20 Ω 정도 낮았다.

### 3.2 전류원 의존성

그림 6과 그림 7은 인가전류에 대한 전위상승 파형의 예이며, 표 2에 각각의 전류원에서 측정된 접지임피던스를 나타내었다.

두 접지극의 임피던스는 높은 주파수 성분을 포함하는 전류원에서 크게 증가하였으며, 200 ns의 상승 시간을 가지는 급준파에서 가장 높게 나타났다. 600 Hz 구형파 전류 인가 시의 접지임피던스와 비교해 급준파 전류 인가 시 탄소블록은 약 3.6배, 동봉은 약 2.7배 증가하였다. 특히, 동봉의 임피던스가 급준파 전류 인가 시 탄소블록 보다 오히려 낮게 측정되었다. 이는 고주파 전류에 대해 동봉이 낮은 임피던스로 작용하여 대지전위 상승을 억제하는데 더 효과적인 임피던스를 보여주는 것이다.

이와 같이 수백 kHz 이상의 고주파 전류에 대해 동봉의 접지임피던스가 탄소블록보다 낮은 이유는 접

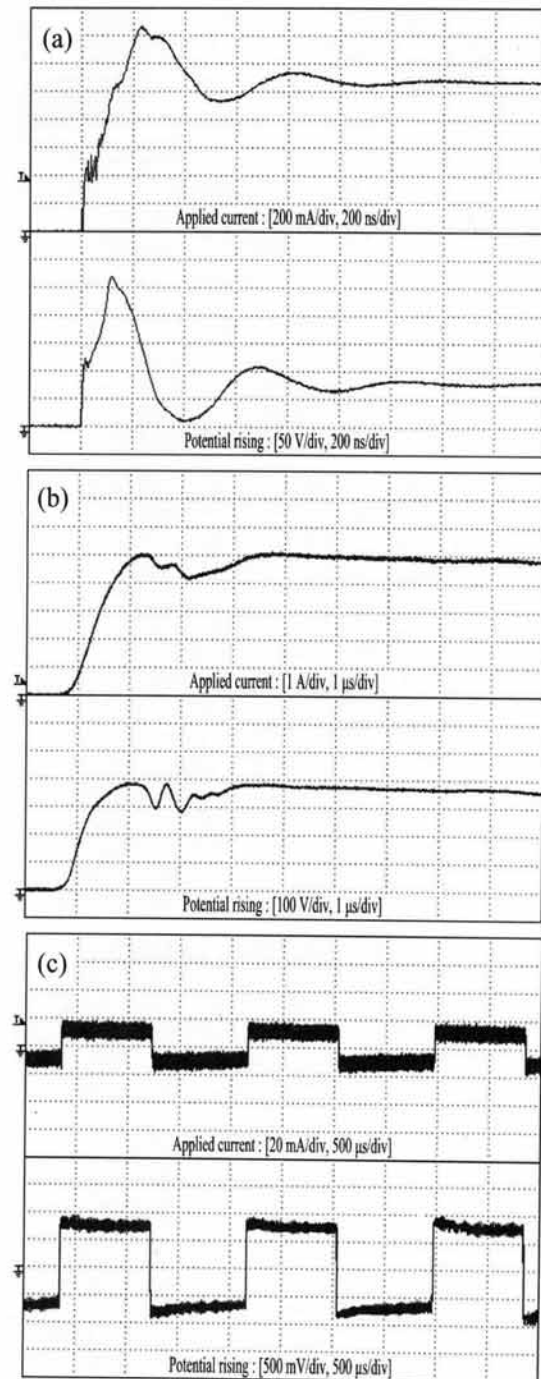


Fig. 6. Typical waveforms of applied current and potential rise for the carbon block. (a) fast-rise pulse, (b) standard lightning impulse, (c) square wave.

지극에서 고주파 전류에 대한 표피 효과에 의한 것으로, 동봉의 표면 저항률이 탄소블록에 비해 매우 낮아 전류를 대지로 빠르게 방출시킬 수 있기 때문이라고 판단된다.

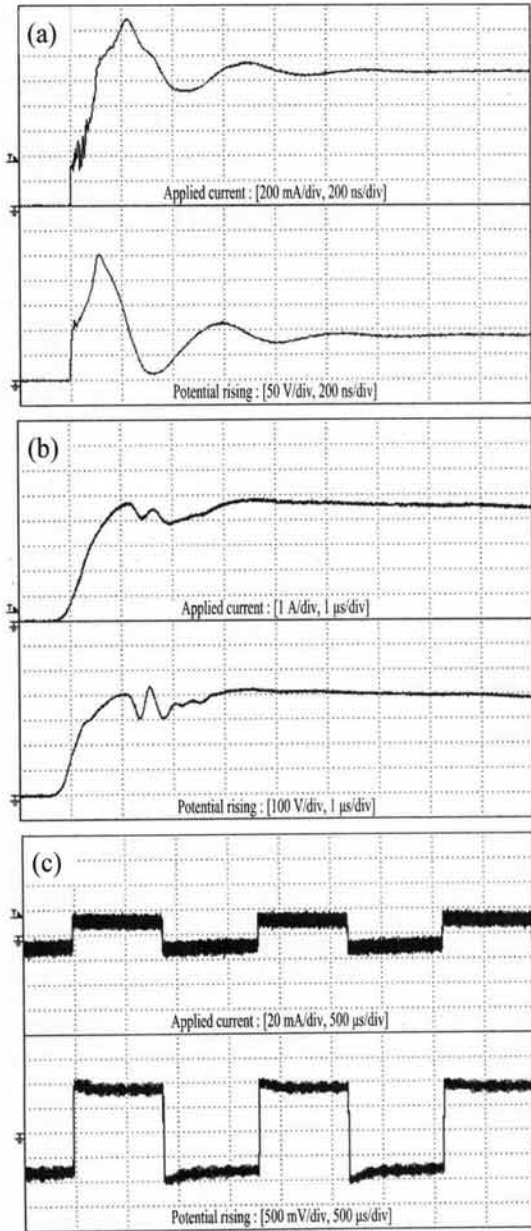


Fig. 7. Typical waveforms of applied current and potential rise for the copper rod. (a) fast-rise pulse, (b) standard lightning impulse, (c) square wave.

Table 2. Ground impedance for applied current.

Current source	Ground impedance (Ω)	
	Carbon block	copper rod
Fast-rise pulse	184.9	168.9
Standard lightning impulse	76	91.7
Square wave	51.1	62.7

### 3.3 경년변화

전류원별로 두 접지극의 접지임피던스를 8개월 간 주기적으로 측정하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 최초 설치 시 탄소블록의 접지임피던스는 동봉에 비해 높게 나타났으나 9월과 10월 사이에 내린 비로 탄소블록과 대지가 흡착함으로써 안정되었다. 전류원과 측정 시점의 대지 상태 및 기후 조건에 따라 접지임피던스에 차이가 있었지만, 경년에 따라서는 현재까지 큰 변화는 없었다.

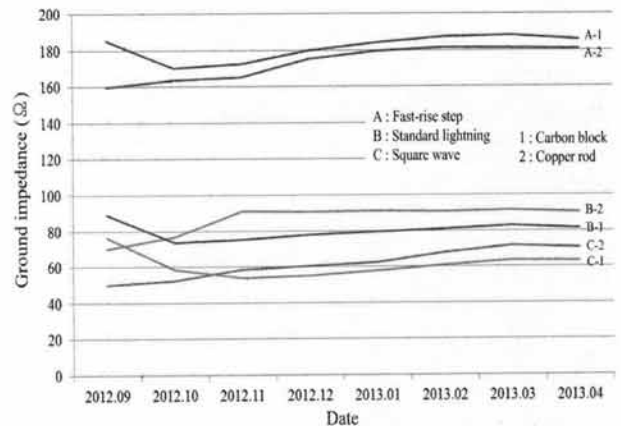


Fig. 8. Monthly changes of round impedance.

### 4. 결론

본 논문에서는 탄소블록과 동봉에 대한 주파수 의존성과 전류원에 따른 접지임피던스 및 경년변화에 대하여 연구하였다.

두 접지극에서 주파수 의존성을 분석한 결과, 접지 임피던스는 100 kHz 이하에서 약 40 Ω, 100 kHz ~ 1.5 MHz에서는 증가하는 유도성, 그리고 1.5 MHz 이상에서는 감소하는 용량성을 나타내었다. 전류원의 주파수 증가에 따라 동일한 경향을 나타내었으며, 1.5 MHz에서 동봉은 탄소블록에 비해 20 Ω 정도 낮았다. 전류원에 대해서는 주파수 성분이 높을수록 접지임피던스가 증가하였고, 탄소블록의 접지임피던스는 동봉에 비해 구형파에서 낮게, 그리고 급준파 펄스에서는 높게 나타났다. 또한 접지임피던스는 경년에 따라 일반적으로 증가하는 추세를 보이지만, 본 연구에서는 측정 시점의 기상에 따른 변화는 있었지만 전반적으로 차이가 없었다.

실험 결과로부터 상용 주파수에서 낙뢰와 같은 뇌 임펄스 전류 영역까지 탄소 블록과 동봉의 접지 성능에는 차이가 없었으며, 수백 ns의 급준과 펄스와 같은 수 MHz 이상의 전류에 대해서는 동봉이 이상 전류를 대지로 빠르게 방출하여 전위 상승을 낮출 수 있을 것으로 생각된다.

## REFERENCES

- [1] A. Geri, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 14, 3 (1999).
- [2] G. Vijayaraghavan, M. Brown, and M. Barnes, *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection* (Newnes, London, 2004) p. 62.
- [3] R. P. O. Riley, *Electrical Grounding: Bringing Grounding Back to Earth* (Delmar Publishers, New York 2002) p. 40.
- [4] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, *IEEE Trans. on Power Delivery*, PWRD-2, 4 (1987).
- [5] R. Elarbi, S. Kato, and K. Mizobe, *JIEE*, 117-B, 3 (1997).
- [6] G. S. Kil, K. S. Rhyu, I. K. Kim, B. D. Moon, H. K. Kim, and C. Y. Park, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10, 645 (2007).
- [7] R. Morrison and W. H. Lewis, *Grounding and Shielding in Facilities* (John Wiley & Sons, New York, 1990) p. 44.
- [8] T. Hiyama, T. Miyake, T. Kita, and H. Andou, *Trans. IEE of Japan*, 118-B, 37 (1998).
- [9] A. P. S. Meliopoulos and G. Cokkinides, *IEEE Trans. on Power Delivery*, PWRD-8, 1095 (1993).
- [10] I. D. Lu and R. M. Shier, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, 1918 (1981).
- [11] R. L. Stoll, G. Chen, and N. Pilling, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 151, 2 (2004).
- [12] G. S. Kil, D. W. Park, U. Y. Jang, J. S. Han, and H. J. Gil, *J. KIEEME*, 23, 10 (2010).
- [13] IEEE Std. 81, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (2012).