

임펄스전류의 인가위치에 따른 매설지선의 과도접지임피던스 특성

(Characteristics of Transient Grounding Impedances of Counterpoises Relevant to the Injected Point of Impulse Currents)

이 봉* · 정동철 · 김종호 · 유재덕 · 김동규 · 이복희**

(Feng Li · Dong-Chul Jung · Jong-Ho Kim · Jae-Duk Yoo · Dong-Kyu Kim · Bok-Hee Lee)

요 약

본 논문은 매설지선의 과도접지임피던스의 임펄스전류의 인가위치와 대지구조에 대한 의존성에 관한 것으로 다른 저항률을 가지는 토양에 매설된 길이 25, 50[m]인 매설지선의 과도접지임피던스와 규약접지 임피던스를 임펄스전류의 상승시간에 따라 측정하고 분석하였다. 그 결과, 매설지선의 과도접지임피던스는 유도성을 나타냈으며, 규약접지임피던스는 과도접지임피던스와 비슷한 경향성을 보였다. 매설지선의 접지저항은 임펄스전류의 인가위치에 관계없지만 특히 과도접지임피던스와 규약접지임피던스는 짧은 시간영역에서 임펄스전류의 인가위치와 대지저항률에 의존적이었다.

Abstract

This paper presents the dependences of transient grounding impedances of counterpoises on the soil structures and the injected point of impulse currents. The transient and conventional grounding impedances of the 25 and 50[m] counterpoises buried in the soil with different resistivity were measured and analyzed as a function of the rise time of impulse currents. As a result, the transient grounding impedances give an inductive behavior, and the trend of the conventional grounding impedances is similar to that of the transient grounding impedances. The ground resistance of counterpoises is irrespective to the injected of impulse current, but the transient and conventional grounding impedances in a short time range especially depend on the soil resistivity and position of the injected point of impulse currents.

Key Words : Impulse Current, Transient Grounding Impedances, Conventional Grounding Impedances, Soil Resistivity, Counterpoises

* 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 7일
1차심사 : 2010년 1월 8일
심사완료 : 2010년 2월 1일

1. 서 론

상용주파수 영역의 감전방지용 접지는 주로 접지저항의 크기로 성능평가가 이루어진다. 그러나 통신용 접지나 뇌임펄스, 개폐임펄스전압에 대한 방호를 목적으로 하는 접지에 대해서는 접지임피던스의 평가가 필요하다[1-3]. 접지시스템의 접지임피던스는 토양의 특성, 접지도체의 형상과 치수, 대지저항률, 대지의 함수정도, 대지구조 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 접지임피던스의 변동을 정량적으로 분석하기는 매우 어렵다. 현재 피뢰설비용 접지시스템의 뇌저지에 대한 성능평가의 연구는 아직 미흡한 실정이다. 대지표면으로부터 어느 정도의 깊이의 지표면에 대해서 수평으로 설치하는 접지전극을 매설지선이라 하며, 피뢰설비용 접지나 송·배전 지지물의 피뢰접지에 많이 이용되고 있다[4-6].

본 논문에서는 매설지선의 길이별 대지구조와 임펄스전류의 인가위치에 따른 과도접지임피던스의 특성을 상호 비교하여 평가할 목적으로 2층 대지구조에 길이 25, 50[m]인 매설지선을 각각 설치하고 임펄스전류의 상승시간을 변화시키면서 과도접지임피던스와 규약접지임피던스를 측정하고 분석하였다. 특히 고주파수에 상응하는 상승시간이 짧은 영역에서의 과도적 특성에 대하여 집중적으로 검토하였다.

2. 실 험

2.1 실험계의 구성

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

임펄스전류에 의한 접지임피던스의 측정방법으로는 전자유도에 의한 측정오차를 최대한 줄이기 위하여 IEEE Std 81.2-1991에서 권고하고 있는 전류보조전극(C)을 전위보조전극(P)과 90° 혹은 180°가 되도록 설치하는 수정된 전위강화법을 적용하였다[7]. 임펄스전류의 크기는 10[A]로 하였으며, 임펄스전류발생장치의 커패시터의 정전용량에 따라 임펄스전류의 상승시간을 1~60[μs]의 범위에서 실험하였다. E극과 C극

사이의 전선은 인덕턴스의 영향을 줄이기 위하여 단면적 10[mm²]인 4심 케이블을 일괄하여 사용하였다.

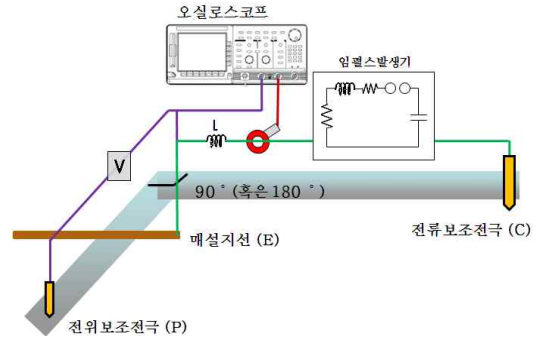
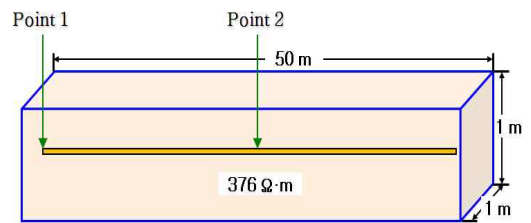
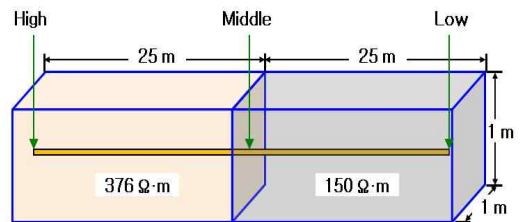


그림 1. 실험계의 개략도

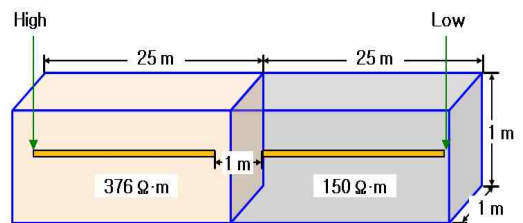
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup



(a) 균질 대지에 설치된 50[m] 매설지선 및 전류인가점



(b) 수직 2층구조 대지에 설치된 50[m] 매설지선 및 전류인가점



(c) 25[m] 매설지선 및 전류인가점

그림 2. 매설지선의 설치 및 전류인가점

Fig. 2. Installation of counterpoises and the injected point of test current

대지구조를 고려한 임펄스전류에 따른 접지임피던스의 분석을 위하여 그림 2 (a)와 같이 대지저항률이 376[Ω·m]인 균질인 대지에 단면적 25[mm²]인 나동선 50[m] 길이의 매설지선을 깊이 0.5[m]에 시설하였다. 균질인 대지에서 50[m] 매설지선의 실험을 실시한 후 그림 2 (b)와 같이 50[m] 매설지선의 중앙을 기준으로 절반인 25[m]에 대한 토양을 폭 1[m], 깊이 1[m]만큼 도전율이 높은 탄소를 혼합하여 2층 구조로 만들었다. 또한 그림 2 (c)와 같이 50[m] 매설지선의 중앙을 절단하여 다른 대지저항률의 토양에 매설된 길이 25[m] 매설지선 2개를 실험의 대상으로 하였다.

2.2 실험방법

임펄스전류를 매설지선의 끝단에 인가하는 경우, IEEE Std 81.2-1991에서 권고하는 바와 같이 그림 3 (a)에서 C극을 P극과 90[°]로 설치하였고, 임펄스전류를 매설지선의 중앙에 인가하는 경우는 그림 3 (b)와 같이 C극과 P극을 180[°]로 설치하였다.

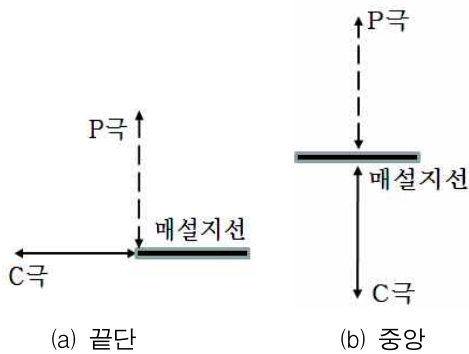


그림 3. C극과 P극의 배치도
Fig. 3. Arrangement of the C and P auxiliary electrodes

또한 측정대상 접지전극(E극)으로부터 P극 또는 C극 사이의 이격거리를 도전유도에 의한 오차가 5[%] 이하가 되도록 측정대상 접지전극(E극)으로부터 P극과 C극을 각각 75[m] 이격시켰다. 접지전극의 정상상태 접지저항은 도전유도의 영향이 없는 61.8[%]범위로 측정하였다.

임펄스전류는 측정대상 접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하였고, 접지전위상승은 측정대상 접지전극(E)과 전류보조전극(P)간의 전위차로 측정하였다. 이때 인가전류는 주파수 대역이 0~5[MHz]인 전류프로브로 측정하였으며, 접지전극의 전위는 최대 75[MHz]까지 측정할 수 있는 능동형 차동프로브로 측정하였다. 인가전류와 전위파형은 디지털 오실로스코프로 관측하여 과도접지임피던스와 규약접지임피던스를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

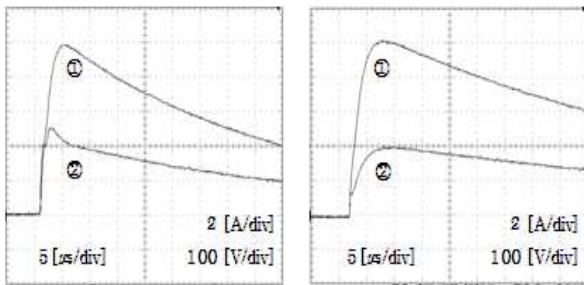
3.1 임펄스전류의 인가위치에 따른 과도접지임피던스 특성

균질인 대지구조와 2층 대지구조에 설치된 50[m]인 매설지선의 접지저항은 각각 27[Ω]과 10[Ω]이었다. 대지구조에 따른 50[m] 매설지선에 인가된 임펄스전류와 전위상승의 전형적인 파형의 예를 그림 4에 나타내었다. 인가된 임펄스전류의 피크 값은 약 10[A]이며, 상승시간은 1~60[μs] 범위이다.

임펄스전류를 접지전극에 인가하였을 때 저항률이 균질인 대지보다 2층 대지구조로 변경 후 설치한 50[m] 매설지선의 전위상승이 낮게 나타났다. 그리고 2층 대지구조에서 그림 4 (b)와 같이 Low 인가점보다 High 인가점의 전위상승이 더 높게 나타났다. 이는 Low 인가점 주위의 대지저항률은 약 150[Ω·m]이고, High 인가점 주위의 대지저항률은 약 376[Ω·m]으로 측정점 근방의 대지저항률의 영향을 크게 받을 것을 알 수 있다. 또한 대지구조와 상관없이 인가전류가 한 방향으로 흐르는 끝단보다 전류가 양방향으로 분기되는 중앙점에 임펄스전류를 인가할 때 전위상승이 낮게 나타났다.

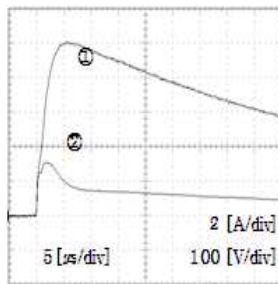
50[m] 매설지선의 대지구조에 따른 임펄스전류에 대한 과도접지임피던스($Z-t$ 곡선)를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 ①과 ②는 각각 저항률이 균질인 대지에 설치된 50[m] 매설지선의 끝단(Point 1)과 중앙(Point 2)에 임펄스전류를 인가하였을 경우 과도접지

임피던스곡선이며, ③, ④, ⑤는 2층 대지구조에 설치된 50[m] 매설지선의 대지저항률이 높은 인가점(High), 중앙점(Middle), 대지저항률이 낮은 인가점(Low)에 임펄스전류를 각각 인가하였을 경우의 과도접지임피던스 곡선이다.

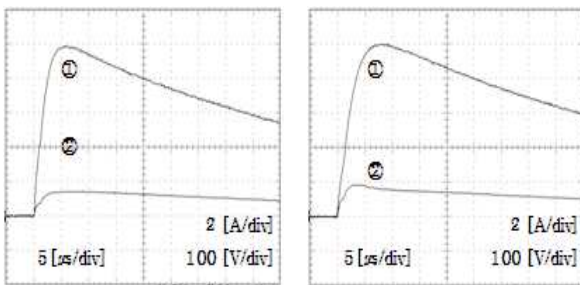


Point 1 Point 2

(a) 균질 대지구조



High



Middle

Low

(b) 수직 2층구조 대지

① 인가전류 ② 전위상승

그림 4. 임펄스전류의 인가위치에 따른 전류와 전위상승 파형의 예

Fig. 4. Typical waveforms of the current and potential rise according to the injected point of impulse current

빠른 시간영역에서 2층 대지구조에 설치된 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스는 임펄스전류를 끝단보다 중앙에 인가할 때 낮게 나타났으며, 대지저항률이 높은 High 인가점보다 낮은 Low 인가점에서 과도접지임피던스가 낮게 나타났다. 이런 특성은 빠른 시간영역에서 전류가 주로 인가위치 근방에 흐르기 때문에 인가위치 근방의 대지저항률에 크게 의존한다고 판단된다. 2층 대지구조의 대지와 균질인 대지에 설치된 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스를 비교한 결과, 2층 대지구조에 설치된 50[m] 매설지선의 High 인가점(③)과 대지저항률이 균질인 대지에 설치된 50[m] 매설지선의 끝단(①)에서 과도접지임피던스의 곡선이 0.4[μs]이전에 거의 일치하였다.

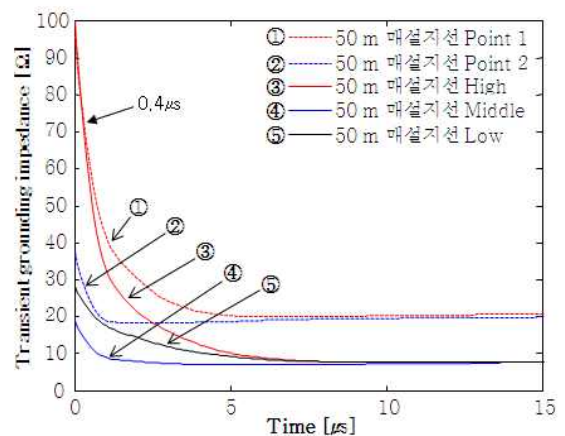


그림 5. 대지구조에 따른 50[m] 매설지선의 과도접지 임피던스

Fig. 5. Transient grounding impedances of the 50[m] counterpoise according to the soil structures

2층 대지구조에 설치된 50[m] 매설지선의 Low 인가점은 균질인 대지에 설치된 50[m] 매설지선의 끝단(Point 1)보다 과도접지임피던스의 곡선이 5[μs]이전에 낮게 나타났다. 2층 대지구조에 설치된 50[m] 매설지선의 Middle 인가점에서도 균질인 대지에 설치된 50[m] 매설지선의 중앙(Point 2)보다 과도접지임피던스가 낮게 나타났다. 5[μs] 이후에서는 접지저항에 점차 수렴하는 것을 알 수 있다.

뇌서지전류에 대한 과도접지임피던스를 표기함에

있어 입사전류와 전위는 동위상이 아니므로 특정의 값으로 과도임피던스를 나타내는 것이 곤란하다. 따라서 접지전극에 서지전류가 입사한 경우 과도임피던스의 해석에 있어서 전위피크 값과 전류피크 값의 비를 이용한 규약접지임피던스가 널리 사용되고 있다 [6]. 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. 이 때 전위와 전류의 피크 값의 비 즉,

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

를 규약접지임피던스(conventional grounding impedance)라 정의한다[6,8-10]. 여기서 V_{max} 는 접지전극의 전위 파형의 최대값이며, I_{max} 는 전류 파형의 최대값이다.

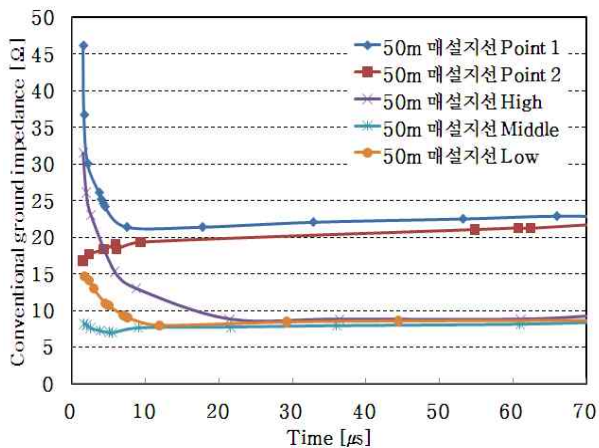


그림 6. 대지구조에 따른 50[m] 매설지선의 규약접지 임피던스

Fig. 6. Conventional grounding impedance of the 50[m] counterpoise according to the soil structures

대지구조에 따른 50[m] 매설지선의 규약접지임피던스를 측정하여 임펄스전류의 인가위치별로 도시한 결과를 그림 6에 나타내었다. 임펄스전류의 상승시간

의 변화에 따른 규약접지임피던스의 특성은 그림 5의 과도접지임피던스의 특성과 비슷한 양상으로, 대지구조에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 저항률이 균질인 대지에 매설한 경우 임펄스전류를 중앙점에 인가한 경우 규약접지임피던스는 용량성으로 나타났다. 전류 인가위치가 끝단 또는 대지저항률이 높은 쪽보다 낮은 쪽이 접지임피던스가 낮았다. 과도접지임피던스의 저감효과를 얻으려면 접지도선의 접속위치를 전류가 양방향으로 분기되어 흐르는 중앙을 선정하여야 한다.

3.2 매설지선의 길이에 따른 과도접지임피던스 특성

인위적으로 구성된 2층 대지구조에 그림 2 (b)와 (c)와 같이 길이 50[m], 25[m]인 매설지선을 설치하여 접지임피던스를 측정하였다. 매설지선의 길이별 인가전류와 전위상승의 전형적인 파형의 예를 그림 7에 나타내었다.

대지저항률이 약 150[Ω·m]인 위치에 설치된 25[m] 매설지선, 대지저항률이 약 376[Ω·m]인 위치에 설치된 25[m] 매설지선, 그리고 2층 구조인 대지에 매설된 50[m] 매설지선의 접지저항은 각각 11.8[Ω], 29.5[Ω], 10[Ω]이다.

인가된 임펄스전류의 피크 값은 약 10[A], 상승시간은 1~60[μs] 범위이며, 접지전극의 임피던스에 따라 약간 다르게 나타났다. 대지저항률이 낮은 인가위치에서 전위는 대지저항률이 높은 인가위치보다 낮게 나타났다. 25[m], 50[m] 매설지선의 Low 인가점에서 전위를 비교할 경우, 동일한 크기의 임펄스전류를 25[m], 50[m] 매설지선에 각각 인가하면 25[m] 매설지선에서 50[m] 매설지선보다 높은 전위상승을 나타냈다. 그리고 High 인가점에서 전위를 비교할 경우, 25[m] 매설지선에서 50[m] 매설지선보다 전위가 훨씬 높게 나타났다. 이와 같이 매설지선의 전위상승은 대지구조에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 보인다.

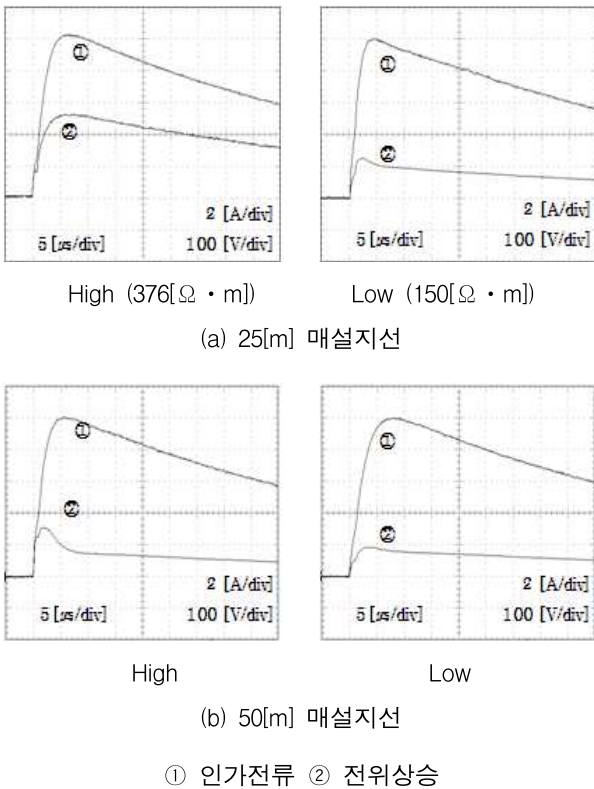


그림 7. 25[m], 50[m] 매설지선의 인가전류와 전위상승 파형의 예

Fig. 7. Typical waveforms of the injected current and potential rise of the 25 and 50[m] counterpoises

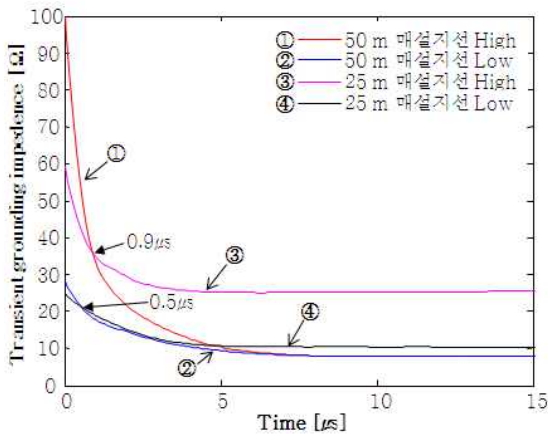


그림 8. 25[m], 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스

Fig. 8. Transient grounding impedances of the 25[m] and 50[m] counterpoises

2층 대지구조에서 대지저항률이 낮은 쪽의 25[m] 매설지선, 대지저항률이 높은 쪽의 25[m] 매설지선, 50[m] 매설지선의 대지구조에 따른 임펄스전류에 대한 과도접지임피던스곡선을 그림 8에 나타내었다.

2층 대지구조에서 대지저항률이 높은 쪽에 매설된 25[m] 매설지선과 50[m] 매설지선의 High 위치에 임펄스전류를 인가하여 산출한 과도접지임피던스를 비교한 결과, 25[m] 매설지선과 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스는 약 0.9[μs]에서 교차점이 나타났다. 0.9[μs] 이전에서는 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스가 25[m] 매설지선의 과도접지임피던스보다 크며, 0.9[μs] 이후에는 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스가 25[m] 매설지선의 과도접지임피던스보다 낮게 나타났으며, 시간이 길어짐에 따라 각각 접지저항에 수렴하는 것을 알 수 있다. 50[m] 매설지선의 접지저항이 25[m] 매설지선의 접지저항보다 작지만 빠른 시간영역에서는 50[m] 매설지선의 인덕턴스 성분이 크게 작용한 것으로 보인다. 25[m] 매설지선과 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스는 약 0.5[μs]에서 교차점이 나타났으며, 0.5[μs] 이전에서는 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스가 25[m] 매설지선의 과도접지임피던스보다 높으며, 0.5[μs] 이후에는 반대로 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스가 25[m] 매설지선의 과도접지임피던스보다 낮게 나타났으며, 시간이 길어짐에 따라 각각 접지저항에 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 2층 대지구조에서 50[m] 매설지선의 Low와 High 위치에서의 과도접지임피던스는 약 8[μs] 이전에서 시간이 짧을수록 Low 인가점보다 High 인가점에서 더 크게 나타났으며, 약 8[μs] 이후에서 시간이 길어짐에 따라 접지저항에 수렴하는 것을 알 수 있다.

2층 대지구조에서 대지저항률이 낮은 쪽의 25[m] 매설지선, 대지저항률이 높은 쪽의 25[m] 매설지선, 그리고 50[m] 매설지선의 규약접지임피던스를 그림 9에 나타내었다. 2층 대지구조에서 대지저항률이 높은 쪽(High) 인가점에서 길이 25[m] 매설지선과 50[m] 매설지선의 규약접지임피던스는 약 2[μs] 이전에 유사한 추세를 나타냈으며, 이것은 2[μs] 이하의 상승시간을 갖는 뇌서지전류에 대해서는 길이가

25[m]보다 짧은 매설지선의 길이가 유효함을 알 수 있다. 대지저항률이 낮은 쪽(Low) 인가점에서 길이 25[m] 매설지선과 50[m] 매설지선의 과도접지임피던스는 약 3[μ s] 이전에 유사한 추세를 나타내었다. 3[μ s] 이하의 상승시간을 갖는 뇌서지전류에 대해서는 길이가 25[m]보다 짧은 매설지선의 길이가 유효함을 알 수 있다.

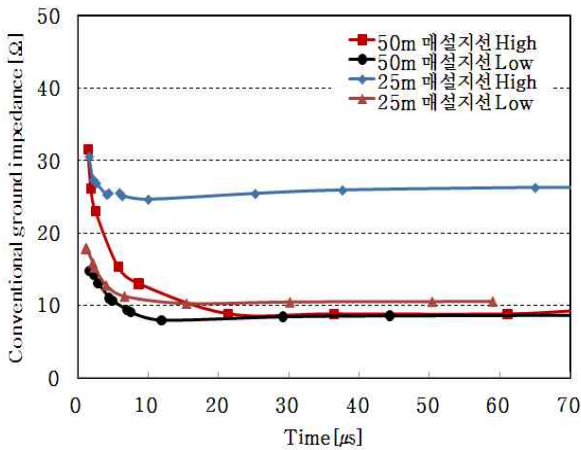


그림 9. 25[m], 50[m] 매설지선의 규약접지임피던스
Fig. 9. Conventional grounding impedances of the 25 and 50[m] counterpoises

4. 결 론

본 논문에서는 매설지선에 임펄스전류를 인가한 경우 매설지선의 길이별 대지구조에 따른 과도접지임피던스를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 상승시간이 짧은 임펄스전류에 대한 매설지선의 과도접지임피던스는 중앙점에 인가한 경우 작게 나타났으며, 대지저항률이 낮은 쪽에 인가한 경우 작게 나타났다.
- (2) 임펄스전류에 의한 과도접지임피던스의 크기는 규약접지임피던스와 유사한 경향을 가지므로 임펄스전류에 의한 과도접지임피던스로부터 접지임피던스의 주파수의존성을 추정할 수도 있다.
- (3) 매설지선의 과도접지임피던스는 임펄스전류의

인가위치 근방의 대지저항률에 크게 의존함으로, 매설지선을 시공할 장소의 대지구조를 정확히 파악하여 대지저항률이 낮은 곳에 접지전극을 시공하고 접지도선을 접속하는 것이 바람직하다.

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

References

- [1] N.Fujimoto, E. P. Dick, S. A. Boggs and G. L. Ford, "Transient Ground Potential Rise in Gsd-Insulated Substations-Experimental Studies", IEEE Trans. on PAS., Vol.PAS-101, No.10, pp.3603~3609, 1982.
- [2] S. Karaki, et al, "Transient Impedance of GIS Grounding Grid", IEEE Trans., Vol.PD-10, No.2, pp.723~738,1995.
- [3] 이복희, 이수봉, 장근철, "형상이 다른 접지전극에 접속된 삼매설 봉상접지전극의 임펄스접지임피던스 특성", 조명전기설비학회논문지, Vol. 19, No.2, pp.63~69, 2005.
- [4] S. Visacro, "A didactic general approach of grounding behavior for lightning currents", Proc. the 27th ICLP, Avignon, France, Vol. 1, pp. 508~513, 2004.
- [5] 이복희: 접지의 핵심 기초 기술, 도서출판 의제, pp.81~92, 1999.
- [6] KS C IEC 62305-1, 피뢰시스템-제1부: 일반원칙, pp.3~20, 2007.
- [7] 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.
- [8] T. Takahashi, T. Kawase, "Calculation of Earth Resistance for a Deep-driven rod in Multi-layer Earth Structure", IEEE Trans. on PD, Vol.6, No.2, pp.608~614, 1991.
- [9] B. H. Lee, D. C. Jeong, S. B. Lee and K. C. Chang, "Effective Impulse Impedances of Deeply Driven Grounding Electrodes", KIEE Int. Trans on EA, Vol.4-C, No.5, pp.207~214, 2004.
- [10] B. H. Lee, J. S. Park and S. C. Lee, "Experimental Investigations of Transient Impedances of Some Grounding Systems", Proc. Korea Joint Syms. ED&HVE, pp.237~240, 1997.

◇ 저자소개 ◇



이 봉(李 峰)
2006년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : lifeng197895@hanmail.net



정동철(鄭東喆)
1964년 9월 18일생. 1989년 2월 영남대 전기공학과 졸업. 2002년 2월 고려대학교 산업대학원 졸업(석사). 2010년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(박사).
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : dcjeong2000@korea.com



김종호(金鍾昊)
1981년 9월 8일생. 2007년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : alchemic98@naver.com



유재덕(兪在德)
1982년 11월 26일생. 2009년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : jaedok1126@nate.com



김동규(金東奎)
1983년 3월 14일생. 2009년 2월 호서대 공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : electric02@naver.com



이복희(李福熙)
1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 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