

전기 철도 시스템의 역사간 매설 지선 특성에 관한 연구

류청희*, 남승욱*, 조대훈*,
노이즈프리미어랩(주)*,

정호성**
한국철도기술연구원**

Study for the Characteristics a Buried Wire between Electric Railway Stations

Chung Hee Ryu*, Seung Wook Nam*, Dahoon Cho*,
Noise Premier Lab Co.Ltd*,

Hosung Jung**
Korea Railroad Research Institute **

Abstract - 전기 철도시스템에는 많은 계환 전류가 흐르고 이로 인하여 제어시스템의 오동작과 인명 손상의 위험이 따른다. 본 연구에서는 대용량의 노이즈 및 서지 전류로부터 인명과 설비를 보호를 위한 대책으로 역사간의 접지 매설 지선을 활용하여 안전성을 개선하기 위한 방안을 연구하였다. 본 논문에서는 역사내 전체의 통합접지를 구성하여 등전위를 확보하고, 역사간 매설지선과 일정 간격 접지봉으로 시공함으로써 전기철도 선로에서 지락사고 및 낙뢰등에 대한 위험전압을 감소시킬 수 있는 방안을 시뮬레이션하여 확인하였다.

1. 서 론

일반적으로 철도 시스템은 철도차량, 선로, 역 설비, 에너지 공급원, 신호 통신설비 등 종합적으로 시스템화 되어 운용되는 기본 구조를 가지며, 전기 철도 도입 이전에는 차량의 개발 차량 동력원의 개발 그리고 선로 시설물 개량이 주를 이룬 반면, 열차의 속도가 빨라지고 선로 용량이 증가함에 따라 안전한 열차 운행이 더욱더 중요하게 되었다.[6] 이에 따라 필요한 열차 운전제어시스템이 중요 요소로 대두되었고, 특히 전기철도의 전기설비 고장은 열차 운행 중단이라는 결과를 가져오게 되므로 그에 대한 대책은 매우 중요하다. 지락사고나 낙뢰 발생시 대용량 서지 전류가 전기설비 내부 시스템으로 유입되어 설비 손상을 가져오거나, 대지 전위를 상승시켜 전위차에 의한 설비 장애를 일으키게 된다. 이러한 전기 설비의 손상이나 오동작의 원인이 되는 서지나 전위차로 인한 순환전류를 안전하게 대지에 방전시키는 것은 전기 철도 운행의 안전성을 확보하는 중요 요소가 된다.[7] 최근에 전기차량의 출력증가로 전력사용의 수요가 급속하게 증가함에 따라 고장용량도 증가하고 상대적으로 고장 전류에 의한 대지전위의 상승폭이 커지고 있다. 이러한 대지전위 상승은 인체의 안전이나 설비의 절연 등에 미치는 위험성을 증가시키므로, 이러한 위험 요소를 감소시키고, 안정성을 확보하기 위해 철도 접지시스템 및 설비간 등전위 개선에 관한 대책이 요구된다. 전기철도시스템에 적용되는 접지시스템은 철로변의 대지 전위의 상승을 억제하고, 고장 전류의 방전시 전기철도 제어시스템에 영향을 최소화할 수 있는 접지방안이 필요하다.[7] 그러므로 인명과 각종 설비를 보호하기 위해서 전위상승 억제 및 전위차 발생 억제, 그리고 대용량 서지 전류의 안전한 대지 방전성을 고려한 철도 접지시스템의 연구가 필요하다.[6] 본 연구에서는 기존의 전기철도 설비의 접지구성 실태를 조사 분석하고 접지효과를 향상시키는 접지구조를 설계 시뮬레이션하였다. 이를 위해 현장 대지저항률을 측정 분석하여 적용하였고, 철도 역사의 통합접지구조를 바탕으로 역사간의 대지전위 상승과 매설 접지선의 전위분포 특성을 설계 시뮬레이션 하였다. 역사간의 통합접지를 매설 지선으로 연결하고 일정 간격마다 접지봉을 설치하여 서지전류 방전로를 확보하고, 낙전류 또는 지락 전류가 매설 접지선에 유입될 때 방전성 확보와 대지전위 상승을 억제하였다. 또한 매설 접지선을 통해 나타나는 인체 감전(Electric Shock)에 대한 위험특성을 확인하고, 제안된 접지 구조를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 프로그램은 SES사 CDEGS 프로그램을 이용하였고, 현장에서 측정된 대지저항률을 적용하여 계산하였다.[3]

2. 본 론

2.1 접지전극의 접속 전압 및 보폭 전압

접지전극의 안전 접속전압은 다음 식으로 구한다.

(1) 접속 전압 및 보폭 전압 한계치

$$E_{Touch50} = (1,000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} [V]$$

(2) 보폭 전압 한계치

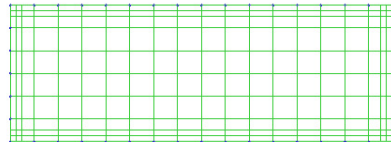
$$E_{Step50} = (1,000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} [V]$$

여기서, 대지저항률 감쇄 요소, C_s 대지저항률 $\rho = \Omega \cdot m$, ρ_s 는 표면대지저항률, h_s 는 지표층의 두께, t_s 는 고장지속시간. 접지 설비의 접촉 및 보폭 전압을 계산하여 접지설비의 안전성을 확보한다. 특히 매설접지선을 통해 연결된 역사간의 안전 전압을 분석하여 전기철도의 통합접지구조에 대한 안전성을 확인할 수 있다.[2,4]

2.2 통합접지와 매설접지선의 전위분포

본 연구에서는 각각 통합접지로 설계된 3개 역사를 매설지선으로 연결하여 전위특성을 설계 시뮬레이션을 하였다. 역사간 매설 접지선을 통해 연결할 때 일정한 간격마다 접지동봉을 설치하며, 설치되는 접지동봉의 간격은 50m, 100m, 250m, 400m 등의 간격으로 각각 적용하였고, 이를 위해 먼저 역사의 전체를 통합접지로 구성하여, 각 역사 간의 연결은 나동선 BC70SQ와 일정한 간격으로 설치한 접지동봉과 접속 후 연결하였다. (그림1)은 역사 통합접지의 설계 시뮬레이션 구조를 나타낸다.[3]

ALLIED SIGNALS (RESAP) (RESAP)



<그림 1> 역사내 통합접지 구조

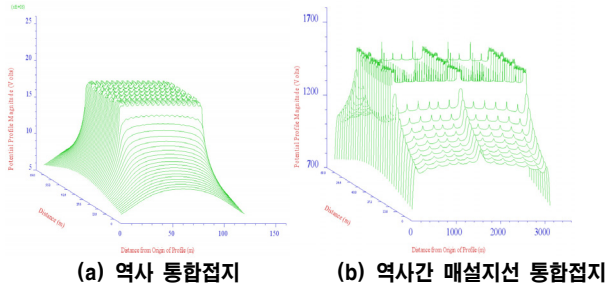
접지 시뮬레이션은 CDEGS 프로그램을 이용하였으며, 시뮬레이션 조건은 표1과 같다. 대지저항률은 4-점 Wenner 측정법을 활용하여 현장에서 얻었고, 지락전류 크기는 전력 계통을 고려하여 임의의 대표 값으로 선정하였고, 분류율은 IEEE std 665를 활용하여 선정하였다. 매설접지선의 굵기는 전류 방전성과 부식성을 고려하여 BC70BC70SQmm를 선택하였다.[2]

<표 1> 접지 설계 시뮬레이션 파라미터

대지저항률	상층-150, 하층-250ohm.m, 두께 1m	비고
지락전류	10,000Amp	
분류율	0.6	
매설지선길이	15,000m	
접지동봉	Ø18/1800L	
매설접지선	BC70SQmm	
확인사항	현장 대지저항률은 CA6470을 이용하여, Wenner 4-전극법으로 측정. 대지저항률 지층 분석은 CDEGS RESAP 모듈을 이용하여 분석.	

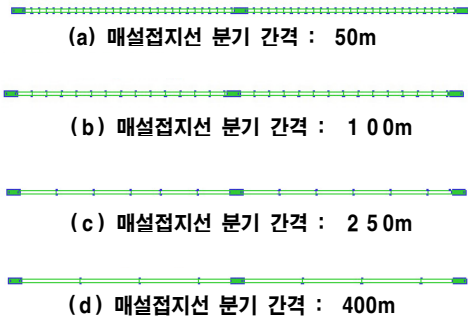
철도 역사 전체의 접지구조는 (그림1)에서 보는 바와 같이 통합접지(Global Earthing)로 구성한다. 먼저 역사 전체에 대한 접지전위 상승을 억제하고, 외부 시스템과의 접지 전위차를 제거하는 등전위 접지로 구성한다. 역사내의 통합접지 구성을 통해 일차적으로 역사 인근의 지락전류나 서지에 대한 위험성을 줄이고 매설접지선을 통해 유입될 수 있는 서지전류를 제거한다. 역사내 접지전극과 절결구조물을 등전위 분담함

으로써 더욱 안정된 등전위 면을 얻을 수 있고, 역사 전체의 전위를 낮고 안전하게 유지할 수 있다. [3]
 역사 내의 통합접지의 접지전위분포 특성은 (그림2a)에 나타나 있다. (그림2b)는 역사간 매설접지선의 통합접지 전위 분포를 보여준다. (그림2)에서 매설접지선으로 부터의 접지전위 상승 특성을 알 수 있다. 이와 같이 매설접지선을 이용하여 역사간 접지전위 상승을 줄이고 철로선의 여러 설비에 대한 안전성을 확보할 수 있다.



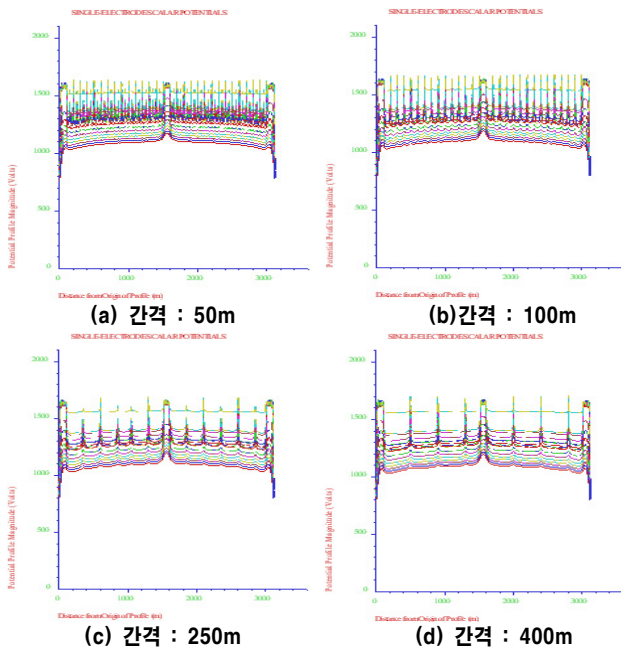
<그림 2> 역사내 통합접지 접지전위 분포

(그림3)는 역사간의 매설 접지선을 통해 연결된 설계 시뮬레이션 구조를 보여준다. (그림3)에서 거리는 양측의 매설접지선을 분기해서 접속하는 분기간격이며, 이때 분기지점에 접지봉을 설치하여 라인 임피던스를 줄이고 서지전류의 방전성을 확보한다..



<그림 3> 철도 역사간 매설접지선의 통합 접지

(그림4)는 역사간 매설접지선을 통해 연결한 접지구조의 접지전위 분포 특성을 나타낸다.

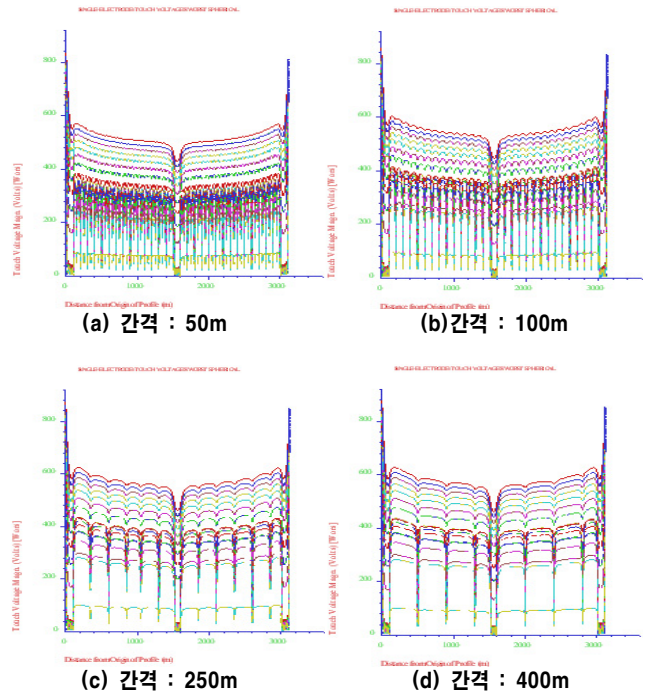


<그림 4> 매설접지선 분기 간격에 따른 접지 전위 분포

(그림4)에서 매설 접지선의 분기 거리가 가까우면 매설접지선 내의 접지 전위차가 크게 발생하지 않고, 분기 거리가 더 멀어지면 접지 전위면에 전위차 발생 구간이 현저하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 접지전위상승(Ground Potential Rise)은 접지매설선의 분기 거리를 작게 하면 할수록 더 억제할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 안전 전압이 낮으면 철도 레일을 따라 움직이는 여러 철도 제어시스템의 안전성을 확보할 수 있게 된다.[7]

2.2 철도 역사간 매설접지선의 분기 간격에 따른 접촉전압

(그림5)에서 설명한 매설접지선의 분기 거리에 따른 매설 접지선의 접촉전압은 (그림5)와 같다. IEEE Std 80-2000 기준에 50kg, 인체 저항이 1000Ω 바닥 및 콘크리트 층의 두께는 0.15m 저항은 3000Ω, 고장 지속시간은 0.5로 하였을 때, 기준 접촉전압은 743.9V 로 계산된다.[3] 역사간 매설접지선의 설계는 계산된 접촉전압을 기본으로 만족하도록 설계하며, 시뮬레이션을 통해 최적의 접지설계 구조를 찾는다.

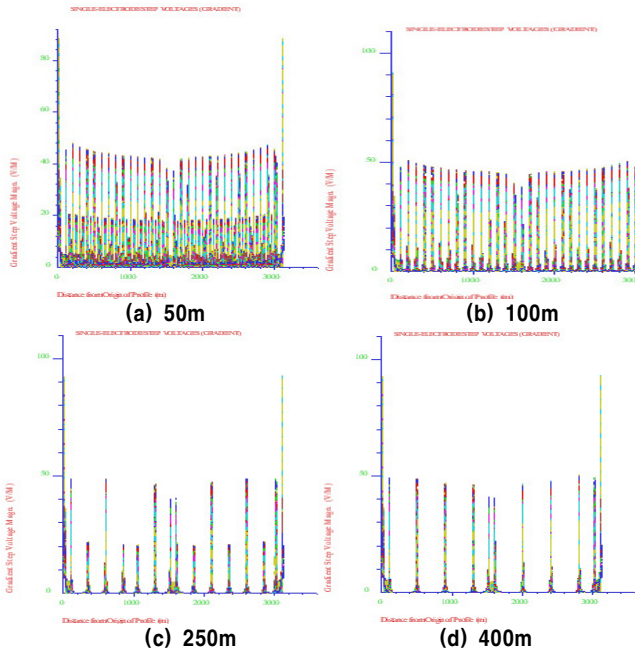


<그림 5> 매설접지선의 접촉전압

(그림5)는 역사간 접지를 연결한 매설접지선의 분기 간격에 따른 접촉전압을 나타낸다. (그림5)에서 보는 바와 같이 매설 접지선의 분기 간격에 따라 전위차가 발생한다. 여기서 매설접지선의 최적의 분기 간격의 결정은 유입 전류 용량의 크기, 전류의 주파수 특성, 매설접지선의 길이 등과 같이 여러 가지 요인에 의해 결정된다.[5] 최적의 매설접지선의 분기 간격과 접지동봉의 설치 위치는 역사 내는 물론 역사 간의 철도제어 시스템의 운용 품질을 높여 위험성을 최소화한다. (그림 5)에서 보듯이 매설 접지선의 분기 간격이 가장 작은 50m 가 안정성에서 가장 좋은 것으로 나타났고, 분기 간격이 가장 큰 400m 특성이 4가지 조건 중에 가장 나쁘다.

2.3 철도 역사간 매설접지선의 분기 간격에 따른 보폭전압

(그림6)은 동일하게 매설접지선의 분기 거리에 따른 매설 접지선의 보폭전압을 나타낸다. IEEE Std 80-2000 기준에 50kg, 인체 저항이 1000 Ω, 바닥 자갈 및 콘크리트 층의 두께는 0.15m 저항은 3000Ω, 고장 지속시간은 0.5로 하였을 때 기준 보폭전압은 2471.5V 이다.[3,6] (그림6)에서의 보폭전압은 기준 보폭전압을 모두 만족하지만 매설접지선의 분기 간격에 따라 전위차가 발생하는 것을 알 수 있다, 만일 낙뢰와 같은 임펄스 전류가 매설 접지선에 유입된다면, 매설 접지선의 라인 임피던스는 크게 변화하게 되고, 그에 따라 접촉전압 및 보폭 전압 특성도 크게 달라진다. 따라서 매설접지선의 분기 간격은 성능과 작업성을 고려하여 결정하여야 한다.[3]



〈그림 6〉 매설 접지선의 접촉전압 보폭전압

2.4 접지극 시공 간격 당 보폭전압 및 접촉전압

(표 2)는 역사간 연결 매설 접지선의 분기 간격에 따른 안전전압의 크기를 나타낸다. 보폭 및 접촉전압은 매설접지선의 전체 길이와 분기 간격 그리고 분기 위치에 설치되는 접지봉에 의해 크기가 결정된다. (표2)에서 접촉 및 보폭전압은 4가지 조건의 분기 간격에서 모두 만족한다.[2,4]

〈표 2〉 보폭전압 및 접촉전압

분기 간격	50m	100m	250m	400m
기준값	961V	979V	992V	996V
계산 접촉전압	834V	857V	872V	876V
계산 보폭전압	88V	90V	92V	93V

매설 접지선의 분기 간격은 단순히 안전전압의 크기만으로 결정할 수 없다. 매설접지선에 높은 주파수의 서지 전류가 유입되면 라인 임피던스가 크게 증가하여 전류의 방전 특성이 매우 악화되며, 좁은 분기 간격은 현장의 시공성과 작업성을 어렵게 만들게 된다. 철도 역사 간의 매설접지선 통합접지는 외부 전기철도 제어 시스템과 역사 전기설비 시스템간의 등전위 구성을 통해 전기철도 제어시스템을 보호한다. 또한 외부 낙뢰나 지락사고 발생시 전체 통합접지시스템에 의해 위험 전압이 과급되는 것을 방지함으로 서지 유입을 막는 장점도 있다.[7]

본 연구를 통해 역사 간의 매설접지선의 분기 간격이 작을수록 좋지만 낙뢰나 서지등과 같은 위험 전기 환경과 임펄스 및 서지 임피던스와 같은 주파수 환경을 감안하여 250m 이하가 적절함을 제안한다. 또한 매설 접지선의 분기 위치에 시공되는 접지봉은 단순한 접지봉이 아닌 서지임피던스 저감 및 고성능의 뇌전류 방전성을 갖는 서지저감 접지봉을 제안한다. [7]

3. 결 론

전기철도설비에서 역사 및 전철선을 통해 흐르는 귀한 전류와 서지의 영향으로 제어설비 및 운영시스템에 문제가 발생할 수 있다.[6]

본 연구에서는 기존 철도의 매설지선 구성 특성을 시뮬레이션 분석하고, 원거리 매설지선의 라인 임피던스로 인해 발생하게 되는 전위상승을 감소시키고 매설지선을 통해 지락 및 귀환전류를 보다 효율적으로 대지에 방전시키기 위한 개선 구조를 제안하였다. 위험 전류를 단순히 매설지선을 통해 대지에 방전시키는 것이 아니라 일정한 간격으로 수직 접지봉을 설치하여 대용량 전류의 방전성을 확보함으로써 역사 혹은 전기철도로부터 유입될 수 있는 서지를 사전에 차단하는 효과를 얻을 수 있는

구조를 접지봉의 설치 위치 특성 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 매설접지선의 분기 위치는 시뮬레이션 결과를 통해 매설 접지선의 분기 간격이 작으면 작을수록 좋지만 유입 전류 용량의 크기, 전류의 주파수 특성, 매설접지선의 길이 등과 같이 여러 가지 요인을 감안하여 250m 이하가 적절한 것으로 분석되었다. 설계 시뮬레이션 결과는 향후 현장 설치를 통해 그 특성 결과를 확인할 예정이며, 향후에는 매설지선에 낙뢰 발생시 임펄스 전류에 대한 특성 연구가 지속적으로 수행되어야 하겠다.[5]

[참 고 문 헌]

- [1] Ronal P. O “Electrical Grounding : Bringing Grounding back to Earth”, DELMAR, ,pp.40-43, 2002
- [2] “IEEE Std 80 2000 IEEE guide for safety in AC substation Grounding.”,
- [3] SES (Safe Engineering Services & technologies ltd.), CDEGS (Current and Soil structure analysis) 사용자지침서. Version 2000 for Windows.
- [4] “IEEE Std 81-1995, ”IEEE guide for Generating Station Grounding”,
- [5] IEEE Std. 81, “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Groud System”, 1983
- [6] 정호성, 창상훈, 김형철, 박영, 조대훈, 류청희, “직류전기철도 공용접지 적용사례를 통한 표준화 방안 연구”, 대한전기학회 추계학술대회는문집, p472~477, 2010
- [7] “인천도시철도 2호선 차량운행시스템 접지설계보고서”, 노이즈프리미어랩(주), 2010

[감사의 글]

본 연구는 국토해양부 도시 철도 표준화 2단계 연구 개발사업의 연구비 지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.