

전기철도의 공용접지 시스템에 대한 안정성 평가에 관한 연구

論 文
51B-6-5

Safety Evaluation on Common Grounding System for Electric Railway

宋 晋 鎬* · 黃 有 模**
(Jin-Ho Song · Humor Hwang)

Abstract - We performed an safety evaluation on constructing of a common grounding system for electrical railway in view of its efficacy and technical fit. In order to compare the conventional grounding method, which has been individually conducted, with the common grounding with all ground wires connected in common to the counterpoise buried below the surface of the earth in parallel with rail, we set up scenarios with several cases of fault and load conditions in Chungbuk railway sections with the common grounding system.

Based on models for railway conductors including the grounded system, line parameters of railway power system are computed. The circuit model for power system with up and down lines, auto-transformers and railway substations is used to compute impedances of counterpoise and substation ground net. For each scenario with faults and operation conditions of railway, the induced potentials on signal and communication lines are also computed.

It is shown that the common grounding for Chungbuk railway is superior experimentally to the conventional method in three respects: (1) the lower rail potentials during operation of railway in line, (2) the lower rail potentials for short-circuit faults between catenary and rail, and (3) the lower stress voltages on signal and communication lines for short-circuit or ground faults.

The analysis results confirm that the grounding system for electric railway is required to be built by the common grounding and be evaluated on its safety in design.

Key Words : common grounding, electrical railway, fault and load conditions, rail potential, stress voltage

1. 서 론

현재 전기철도에서 시행하고 있는 접지시스템은 접지목적에 따라 필요한 개소에 개별적으로 구축되고 있다. 즉, 전철용 변전소는 변전소 자체의 안전을 고려하여 메시접지(mesh ground)를 하고 통신설비와 신호설비에서는 이들 자체의 보안을 위하여 접지봉을 시공하고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 접지방식에 대한 유효성이나 기술적 적합성에 대한 검증은 지금까지 시행된 적이 없었다.

전기철도 운행 중 낙뢰 서지(surge)가 전철선로에 침입하거나 지락 등의 사고가 발생하였을 때 고장점 부근의 전위 상승이 전철선로와 병행하고 있는 통신설비 및 신호설비 기기 등의 정격을 초과하게 되거나 병행하는 각종 설비에 유도현상이 발생하여 이들 기기나 설비가 소손되거나 장애를 받는 경우가 많다. 전철선로와 병행하고 있는 통신설비에 발생하는 유도현상에 대한 연구결과[1]에 따르면, 기존의 전기철도에서 시행되고 있는 접지방식으로는 계통에 고장이 발생하였을 때 고장전류로 인한 접지전위상승(ground potential rise: GPR)과 두 지점간의 전위경도를 적절하게 완화시키지 못하

는 경우가 있음을 의미한다.

따라서, 유럽이나 북미 등 선진국의 전기철도에서 채택하고 있는 공용접지(common grounding) 방식을 우리나라 전기철도에 도입하여 적용할 때 그 유효성이나 기술적 적합성에 대한 검증의 필요성이 제기됨에 따라 본 논문에서는 기존의 전기철도 접지방식, 즉 독립적으로 시행되어 온 접지방식과 레일과 병행하여 지중에 매설되는 매설지선(counterpoise)에 모든 접지선이 공통으로 접속되는 공용접지 방식을 비교 검토하기 위하여 공용접지 방식으로 설계된 충북선(조치원-음성간)의 전철구간에서 여러가지 고장 및 부하상태에 대한 시나리오를 상정하여 각 시나리오별 계통전류 및 전위분포를 구하고, 이 때 신호 및 통신선로의 기기에 가해지는 최대 전위차(stress voltage)의 영향을 평가했으며 그 결과를 토대로 공용접지 방식의 기술적 유효성과 적합성을 검토했다.

구체적으로는 충북선 전철구간에서 지락 및 부하시 전철계통의 전류, 전위분포 및 신호선에 가해지는 최대 전위차 예측과, 전철 변전소(substation: S/S), 구분소(sectioning post: SP) 및 보조구분소(subsectioning post: SSP)의 접지설계 및 안전성 평가를 위해 충북선 전철구간에 대한 공용접지 시스템을 해석했다. 그 내용으로는 접지계통을 포함한 전철시스템의 모든 도체에 대한 모델을 구성했고, 전철 전력계통의 선로 파라미터를 계산했으며, 상하선, 단권변압기(AT) 및 전철 변전소를 포함한 전력계통을 나타내는 회로 모델을 수

* 正 會 員 : 明知大學 情報制御工學科 博士課程

** 正 會 員 : 明知大學 情報通信工學系列 副教授

接受日字 : 2001年 12月 6日

最終完了 : 2002年 4月 12日

립했다. 또한, 매설지선과 변전소 접지망 임피던스를 계산했으며, 고장 및 열차운전 상태의 시나리오 구성과 각 시나리오별 접지계 및 전자기기 등에 가해지는 전압을 계산했다.

본 공용접지 시스템 해석을 위한 시뮬레이션은 접지 및 전자파방해(EMI) 해석 전용프로그램인 캐나다 SES社의 CDEGS[2] 중 토양의 대지저항률 측정결과 해석 및 등가토양 모델링은 RESAP, 전철변전소, 구분소, 보조구분소의 접지설계 및 안전성 평가는 MALT, 매설지선을 포함한 접지계통의 임피던스와 접지전위상승 및 스트레스 전압 계산은 MALZ, 전차선, 급전선, 레일, 통신 및 신호케이블 등의 모든 도체의 상호임피던스와 자기임피던스 계산은 TRALIN, 그리고 전철계통의 고장, 부하모의, 계통 전압 및 전류분포 계산은 SPLITS 모듈을 각각 사용하여 수행했다.

2. 변전소, 구분소 및 보조구분소의 접지설계

2.1 부지 대지저항률 측정 및 해석

대지저항률의 정확한 측정과 해석은 모든 접지시스템 설계에 있어 가장 중요하고도 기본적인 작업이다. 지표면 아래 매설된 접지도체를 통하여 대지로 누설되는 전류는 매설지점의 대지저항률 및 대지구조에 따라 현저하게 달라진다. 토양에 대한 전기적 특성을 접지목적에 적용하고자 할 경우 설계자는 실제의 토양구조에 유사한 등가적 모델을 결정해야 하나, 실제 토양구조는 매우 복잡하므로 쉬운 작업은 아니다.

지금까지 대지저항률의 측정법[3]은 Wenner의 4전극법, Schlumberger 전극법이 가장 널리 이용되고 있다. Wenner 전극법은 2개의 전류전극과 2개의 전압전극을 등간격으로 변화시키면서 대지의 겉보기 저항을 측정하는 방법으로서 측정기가 다양하고 측정결과 해석법이 비교적 간단하기 때문에 대지저항률 측정법으로 많이 사용되고 있다. Schlumberger 측정법은 전극간격을 등간격이 아닌 부등간격으로 배치하는 방법인데 토양의 심층깊이까지의 정보를 얻는데 유리한 방법으로 유럽에서 선호하는 방법이다.

본 논문에서는 증평 S/S와 오송, 음성 SP 및 오근장, 내수, 보천, 청주 SSP 모두 7개소의 접지대상 부지에 대하여 시행한 토양 측정결과를 토대로 대지저항률을 해석하여 접지

설계에 반영하였다. 현장의 겉보기 대지저항률을 측정하여 등가 대지구조로 해석한 결과는 표 1과 같다. 해석결과로부터 각 부지의 특성을 살펴보면, 음성구분소 부지가 지표면이 높은 대지저항률을 나타내고 있을 뿐이고 나머지 6개소는 대체로 양호한 대지저항률을 가지고 있는 것으로 판단된다.

2.2 변전소, 구분소 및 보조구분소 접지설계

본 논문에서는 기존의 단층 토양모델에 기초한 수직접 설계방식과는 달리, 다층 토양모델과 엄격한 접지망 모델링에 기초한 접지설계 전용프로그램인 CDEGS를 이용함으로써 보다 정확하고 정밀한 접지설계를 실시하였다. IEEE Std. 80의 설계기준과 철차[4]에 따르면 중요한 요소인 토양의 대지저항률을 측정하고 표 1에서 보는 바와 같은 다층토양모델에 기초하여 토양특성을 정확하게 반영하였으며, 고장시 고장전류가 접지망에 유입되는 분류율을 토대로 설계하였기 때문에 최적설계가 가능하였다.

고장전류는 문헌[3]에서 제시한 계산결과를 참조한 결과, 증평 S/S의 경우 고장전류는 9.8775 KA이고, 나머지 2개의 구분소와 4개의 보조구분소는 모두 328.4 A 이다. 이 때, 증평 S/S만 분류율을 10 %로 하여 987 A의 고장 전류가 변전소 접지망으로 유입되며 나머지는 AT 중성점으로 흡수되어 급전선과 전차선을 통하여 전원단으로 귀환하게 된다. 한국 전력의 경우 이 분류율을 20 % 미만으로 설계에 반영하도록 하고 있으나, 전철의 경우는 고장전류의 대부분이 레일 등의 귀로를 통하여 전원측으로 되돌아가기 때문에 분류율을 10 %만 잡아도 충분하다고 판단된다. 접지설계시 정밀한 분류율을 고려하면 보다 경제적인 설계가 가능해진다. 나머지 구분소와 보조구분소는 328.4 A의 작은 고장전류를 갖기 때문에 모두가 접지망으로 유입된다고 가정하였다.

다음으로 접지설계에 적용한 파라미터를 보면 다음과 같다. 접지면적은 증평 S/S는 42m×66m, 오송 SP는 14m×50m, 음성 SP는 14m×38m, 나머지 보조구분소들은 14m×26m를 각각 선정했으며, 변전소, 구분소 및 보조구분소의 대지저항은 표 1의 해석결과를 적용했다. 또한, 고장 지속시간(fault clearing time)은 0.333 sec, 접지망 지표면 자갈두께는 15 cm, 자갈의 고유저항은 3000 Ω·m, 신발의 고유저항은 4000 Ω·m, 인체 체중은 50kg, 그리고 인체저항은 1000Ω을 적용했다.

이 파라미터들에서 고장지속시간은 계전기 동작시간을 기준으로 하였고, 자갈두께 또한 설계의 기본조건을 적용하였으며, 인체의 체중은 IEEE 기준에 준용하였다. 이와 같은 기본 설계조건을 토대로 본 논문에서는 증평 S/S의 설계 내용만 자세히 상술하고 나머지 구분소는 그 결과만 기술한다.

식 (1)은 IEEE Std. 80에서 제정한 용단방지를 위한 접지도체 굵기 산정식[4] 이다.

$$A_{mm^2} = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \cdot 10^4}{TCAP \ln\left(1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)\right)}} \quad (1)$$

여기서 I 는 실효치 전류(KA), T_m 과 T_a 는 각각 최대허용 온도 및 주위온도(°C), t_c 는 고장지속시간(sec), α_r 와 ρ_r 는

표 1 대지저항률 해석결과

Table 1 Analysis results of equivalent sub-surface layer resistivity

대상 대지	대지 특성	등가대지 구조	지층별 대지 저항률[Ω.m]			지층높이[m]		
			제1층	제2층	제3층	제1층	제2층	제3층
증평 S/S	2층 수평	105.78	203.14	-	3.91	∞	-	
오송 SP	3층 수평	141.70	12.20	1147.1	1.63	3.26	∞	
음성 SP	2층 수평	1600.98	311.78	-	0.82	∞	-	
오근장 SSP	3층 수평	93.80	20.90	1341.5	2.93	1.95	∞	
내수 SSP	3층 수평	417.60	118.20	235.00	0.96	12.5	∞	
보천 SSP	3층 수평	486.58	162.20	453.23	1.20	3.10	∞	
청주 SSP	2층 수평	29.30	64.20	-	2.17	∞	-	

각각 0℃ 및 기준온도에서의 열저항계수, ρ_r 는 기준온도에서의 접지도체저항(Ω), TCAP는 열용량계수 ($J/cm^2/^\circ C$), 그리고 $K_0 = 1/\alpha_0$ 이다.

식 (1)에 상기한 설계조건과 나연동선 정수를 대입하여 용단방지를 위한 최소도체 굵기는 구하면 식 (2)와 같다. 여기서 고장지속시간은 안전여유를 고려하여 1 sec로 가정하였다.

$$A_{mm^2} = 9.8775 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 0.00393 \cdot 1.7241 \cdot 10^4}{3.422 \cdot \ln\left(1 + \left(\frac{350 - 40}{234 + 40}\right)\right)}} \quad (2)$$

식 (2)의 계산결과는 48.17 [mm^2] 이다. 본 설계에서는 기계적인 강도를 고려하여 접지도체(나연동선) 굵기는 100[mm^2]로 결정한다.

접지방 제한은 도체간 간격 5.25 m의 9개의 가로방향 도체, 도체간격 5.07 m의 14개의 세로방향 도체, 길이 1 m와 구경 14 ϕ 의 42개 접지봉으로 구성된다. 접지봉을 포함한 도체 총길이는 1224 m이고, 접지그리드 매설깊이는 지표면 아래 1m로 한다.

접지방 제한을 적용하여 계산한 결과, 예상 접지저항은 1.3704 Ω 이고, 고장전류가 접지방에 유입될 때 최대 GPR은 1374 V로 나타났으며, 안전한계치인 접촉전압(touch voltage)과 보폭전압(step voltage)은 표 2와 같이 계산되었다.

표 2 접촉전압[V]과 보폭전압[V]의 안전한계치

Table 2 Maximum allowable values of touch voltage[V] and step voltages[V] for safety

차갈 저항률 ($\Omega \cdot m$)	고 장 지 속 시 간						신발 저항: 1 foot (Ω)
	0.125 sec		0.250 sec		0.333 sec		
	접촉 전압	보폭 전압	접촉 전압	보폭 전압	접촉 전압	보폭 전압	
3000.0	1702.0	5982.4	1302.9	4579.4	1145.6	4020.2	6366.1

중평 S/S의 접지설계에서 고장 지속시간 0.333 sec일 때 최대 접촉전압은 475.3 V이고, 최대 보폭전압은 205.6 V로 계산되었으며, 이 값은 표 2의 안전한계치 계산결과인 접촉전압 1145.6 V와 보폭전압 4020.2 V 보다 훨씬 낮게 나타났다. 최대 GPR 또한 기준치[3]인 3000 V 보다 낮은 1374 V로 계산되었다. 따라서, 중평 S/S의 접지설계 결과는 IEEE 80의 기준을 모두 충족하는 것으로 나타났다. 이하의 구분소와 보조구분소 접지설계는 중평변전소의 설계절차와 동일한 절차에 의하였기 때문에 계산과정은 생략하기로 한다.

표 3은 대상 부지별 고장지속시간 0.333 sec 일 때 계산된 최대 접촉전압, 최대 보폭전압 및 GPR 의 계산 값과 안전한계치들을 나타내는데, 모든 경우의 접지설계 결과는 IEEE 80의 기준을 충족하는 것으로 나타났다.

표 3 고장지속시간 0.333 sec 일 때 최대 접촉전압, 최대 보폭전압, GPR의 계산값 및 안전한계치

Table 3 Computed maximum values of touch voltage, step voltage, GPR and their maximum allowable values for safety with fault clearing time of 0.333 sec

대지 특성 대상 부지	최대값(V)			안전한계치(V)		
	접촉전압	보폭전압	GPR	접촉전압	보폭전압	GPR
중평 S/S	475.3	205.6	1374	1145.6	4020.2	3000
오송 SP	179.7	45.3	704	1150.7	4040.6	3000
음성 SP	658.9	96.2	2138	1321	4722	3000
오근장 SSP	168.4	27.5	1423	1197	4255.7	3000
내수 SSP	485.4	72.3	1389	1188.1	4190.1	3000
보천 SSP	425.9	74.04	2290	1197	4255.7	3000
청주 SSP	64.25	10.43	363	1197	4255.7	3000

3. 중복선 공용 접지시스템 해석을 위한 시뮬레이션

3.1 공용 접지시스템 기본모델

중복선 전철구간에서 레일과 병행하여 매설지선을 매설하고 레일과 AT의 중성선, 전철변전소와 구분소, 보조구분소의 접지그리드를 일점으로 접속한 공통접지로 했을 때의 접지효과에 대한 유효성 검증을 위한 공용 접지시스템 모델은 문헌 [3]의 조치원-봉양간 기존선 전철 급전에 따른 전차선로 및 접지계통 회로도들을 기본으로 하여 구성하였다.

매설지선을 이용한 공용접지시스템 해석을 위한 시뮬레이션에서는 순차적으로 전철시스템의 등가회로 수립, 급전선로 모델 수립, 전철변전소 접지그리드 모델 수립, 전철부하 시나리오 설정, 지락고장 시나리오 설정, 시나리오별 전차선 전압, 전류 및 레일전류, 전압 계산, 통신선/ 및 신호선에 가해지는 최대 전위차 계산, 그리고 안전성 검토 등의 절차가 필요하다

3.2 전철시스템의 등가회로

그림 1은 AT급전방식(2 x 25 KV AT) 및 급전선로의 구성방식을 회로모델로서 표현한 것이다. 상하선의 전차선, 레일, 급전선, 매설지선, 보호도체 및 신호·통신케이블로 구성되어 있으며, 변전소 메시접지와 레일 및 보호도체는 모두 매설지선과 접속되어 있다. 급전계통의 전압은 전차선과 레일간에 25 KV, 급전선과 레일 사이에 25 KV가 인가되어 전체적으로는 전차선과 급전선간에 50 KV의 전압이 걸리게 되나, 안정적인 견인력 유지를 감안하여 실제 시뮬레이션에서는 25 KV를 27.5 KV로 모의하였다.

전력공급은 중평 S/S와 충주 S/S에서 이루어지며, 음성 SP를 기준으로하여 전기적으로 구분하여 운전된다. 즉, 오송 SSP와 음성 SP 사이의 구간은 중평 S/S로부터, 음성 SP와 봉양 SP 구간은 충주 S/S로부터 전원공급이 이루어진다. 대전위차 계산, 그리고 안전성 검토 등의 절차가 필요하다.

전철부하 및 지락사고 모의시 전원단 전압강하를 표현하기

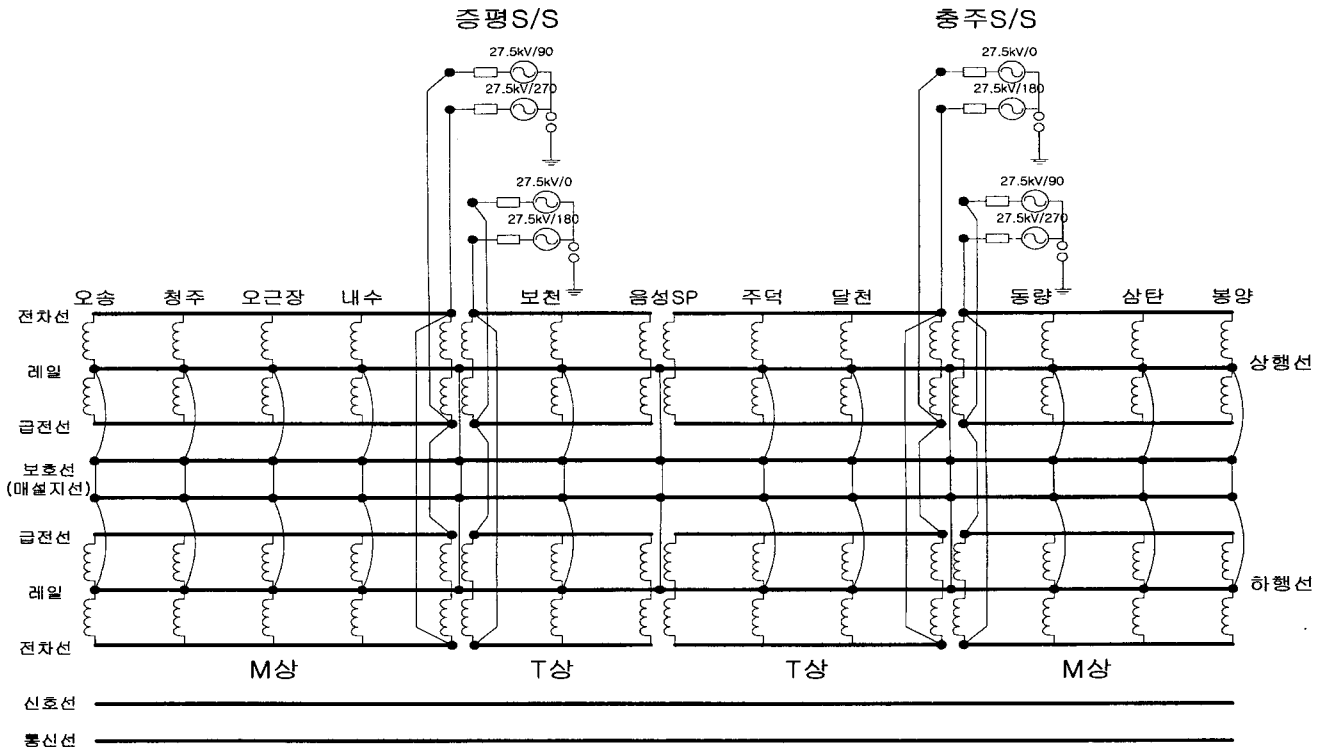


그림 1 전철급전계통 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of railway feeder system

위한 전원임피던스는 문헌[3]를 참조하여 다음의 값으로 가정하였다. 증평변전소의 경우 Scott 2차측까지의 전원임피던스는 $0.73569 + j 36.84267 \%$ 로서, 계통 임피던스 $0.508 + j 2.583 \%$ (단락용량 3,799 MVA, 100 MVA, 154 kV 기준), 송전선로 임피던스 $0.228 + j0.926 \%$ (ACSR 240 mm², 4.5 km), 그리고 Scott 변압기 임피던스는 33.3 %(30/40 MVA, 상별 15 MVA, %Z=10%, 2대 병렬운전)로 구성된다.

충주변전소의 경우 Scott 2차측까지의 전원임피던스는 $0.29085 + j 35.10546 \%$ 로서, 계통 임피던스 $0.278 + j 1.675 \%$ (단락용량 5,890 MVA, 100 MVA, 154 KV 기준), 송전선로 임피던스 $0.01285 + j0.09713 \%$ (ACSR 240 mm², 0.5 km), 그리고 Scott 변압기 임피던스 33.3 %(30/40 MVA, 상별 15 MVA, %Z=10%, 2대 병렬운전)로 구성된다.

3.3 급전선로 모델

그림 2는 급전회로를 구성하는 전차선로 도체 배치 단면도를 나타낸 것이다.

전차선로 도체는 급전선, 전차선, 조가선, 레일, 매설지선, 신호 및 통신 케이블이며 각 도체의 굵기는 다음과 같다. 급전선은 ACSR 160 mm², 조가선 MgSnCu 80 mm², 전차선 Cu 110 mm², 보호도체 ACSR 90 mm², 레일 50 kgN, 매설지선 Cu 80 mm², 신호케이블 $\varnothing 0.9$ mm, 그리고 통신케이블은 $\varnothing 0.9$ mm 도체이다.

그림 1에서 제시한 회로모델을 완성하기 위하여, 3.2절에서 가정한 선로정수 외에 레일과 매설지선의 누설 콘덕턴스(또는 저항)를 구하여야 한다. 그러나, 누설 콘덕턴스는 선로 주변의

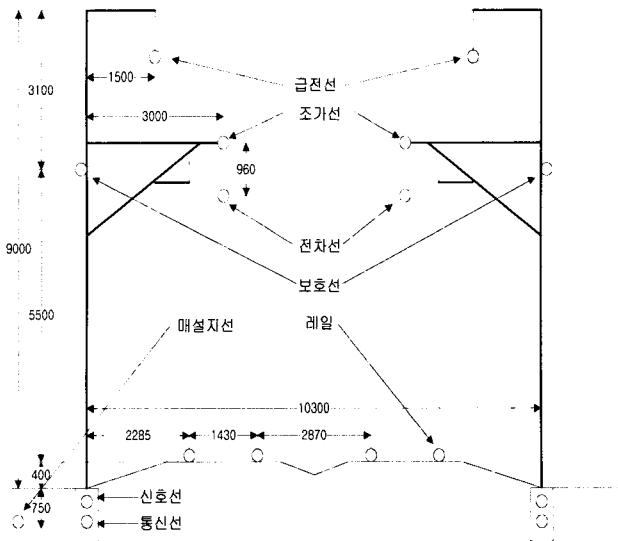


그림 2 전차선로 도체 배치 단면도
Fig. 2 Cross section of layout for catenary conductors

토양 구조와 주변환경의 영향을 많이 받으며 노반의 종류, 침목의 종류, 기온, 습도 및 기후에 따라 매우 큰 변화폭(0.1~100 Ω/km)을 갖는 것으로 알려져 있다[5].

본 논문에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 수평2층의 등가 토양모델을 가정하고, 자갈층에 반경 2.5 cm의 도체(레일)가 매설되어 있으며, 레일도체의 전기적 특성은 철과 같다고 가정하였다(예를들면, 구리에 대한 비저항율이 17, 구리에 대한 비투자율이 250). 자갈층의 대지저항은 5000 Ω·m이고,

대지저항률은 200 Ω·m를 가정하였다. 매설지선의 누설콘덕턴스 계산시는 자갈층이 없는 200 Ω·m의 균일도양모델을 사용하였고 매설깊이는 0.9 m로 가정하였다. 다층도양 내에 매설된 충전된 도체의 응답특성을 시뮬레이션할 수 있는 해석프로그램인 CDEGS의 MALZ 모듈을 이용하여 시뮬레이션 결과, 레일과 매설지선의 누설임피던스(저항)는 각각 3.54 Ω/km, 0.74 Ω/km 로 계산되었다.

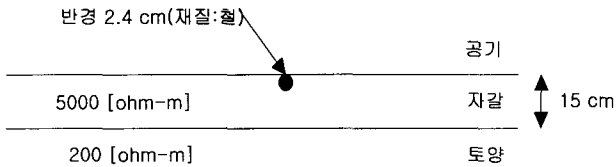


그림 3 레일의 누설저항 계산모델

Fig. 3 Model for computation of leakage resistance of rail

급전선로의 구성은 그림 4와 같으며, 각 선로는 8개의 상(phase)을 갖는 도체군으로 구별하였으며, 각 상은 동전위를 갖는다고 가정한다.

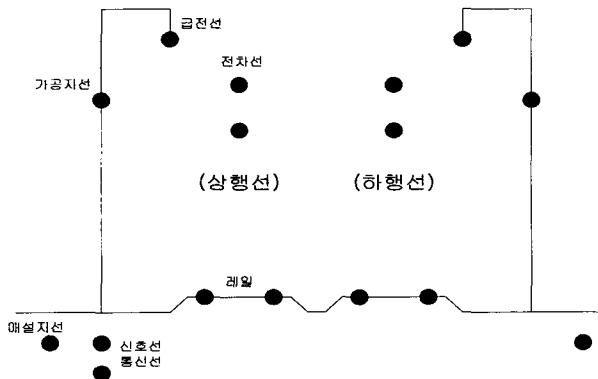


그림 4 급전선로 구성방식

Fig. 4 Configuration of feeder line

대지저항률을 200 Ω·m 를 가정하여 매설지선 유·무의 경우에 대하여 도체군 선로정수와 상호임피던스를 계산하였으며, 그 중 하나를 표 4에 나타냈다.

표 4 급전선로 도체군 선로정수(매설지선 있음)

Table 4 Line constants of conductor group of feeder line (with counterpoise)

상 번호	급전선로	직렬 임피던스 [ohm/km]	비 고
1	전차선	0.15361 + j0.73942	상행선
2	레일+매설지선+가공지선	0.10558 + j0.55497	
3	급전선	0.33291 + j0.93583	
4	전차선	0.15357 + j0.73935	하행선
5	레일+매설지선+가공지선	0.14848 + j0.56979	
6	급전선	0.33282 + j0.93590	
7	신호선	1.75750 + j0.99656	
8	통신선	1.75810 + j0.99588	

다음 단계에서 고려할 전철변전소 접지망 설계는 2장에서 기술한 설계 결과를 사용한다.

3.4 전철부하 및 급전계통 단락사고 시나리오

그림 5는 음성 SP와 봉양 SP 사이의 전철운행구간을 나타낸다. 전철은 7800 kW의 정전력부하(열차종류는 화물, 기관차는 8004호, 열차편성은 2P + 40T)로 가정하였으며, 정전력부하를 유지하도록 전차선과 레일간의 임피던스(약 97 Ω ≃ E²/P = (27.5 KV)² / 7800 kW)로 표현하였다. 전철은 충주 S/S T상 급전구역인 음성 SP와 주덕 SSP 사이 10.5 km 구간에 위치하는 것으로 가정하였으며, 충주 S/S로부터 거리는 약 13~23 km 이다.

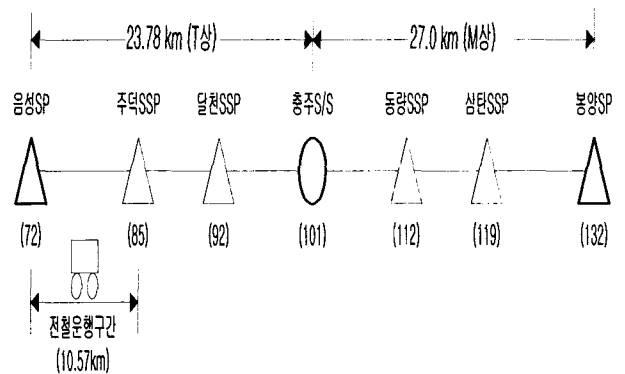


그림 5 전철운행구간(괄호안의 숫자는 구간번호)

Fig. 5 Railway operation sections(section numbers in parenthesis)

전차선과 레일간 단락사고 시나리오는 그림 6에서 표시한 것과 같이 다음 두 가지 즉, 전원공급원인 증평변전소로부터 먼 지점에서 단락사고가 난 경우(고장점-1)와 전원단과 가까운 곳(고장점-2)에서 사고가 난 경우를 가정하였다. 사고는 모두 신호선과 가까운 상행선에서 발생한다.

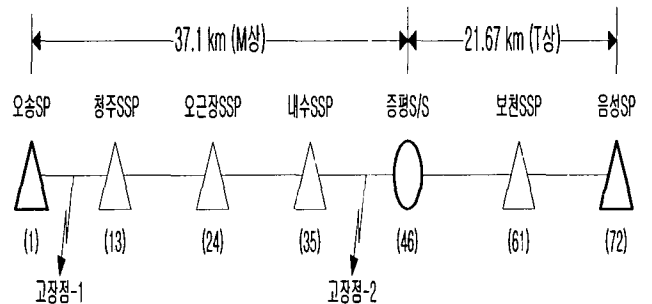


그림 6 전차선-레일간 단락사고(괄호안의 숫자는 구간번호)

Fig. 6 Short-circuit faults between catenary and rail (section numbers in parenthesis)

4. 전철 급전계통 해석결과

4.1 전차선-레일간 단락사고시 고장전류 분포

급전회로에서 고장전류 I_r 는 다음과 같다.

$$I_f = \frac{V}{Z_s + Z_{TL}} \quad (3)$$

여기서 V는 전원전압, 그리고 Z_s 와 Z_{TL} 는 각각 전원임피던스와 선로임피던스이다.

식 (3)에서 고장전류를 구하려면 전원전압과 전원임피던스 및 선로임피던스를 구해야 한다. 중평S/S의 Scott 2차측까지의 전원 임피던스(%)는 문헌[3]의 전철급전계통 시뮬레이션 계산값을 적용하였다. 여기서, %임피던스를 전원임피던스로 환산하기 위한 과정은 다음과 같다.

$$S = \sqrt{3} VI \quad (4)$$

식 (4)에서 I의 기준전류는 $I_{Base} = 100 \text{ MVA} / (\sqrt{3} \times 55) \text{ KV} = 1049 \text{ A}$, 그리고 기준임피던스 $Z_{Base} = 100 \text{ MVA} / (3 \times I_{Base}^2) = 30.29 \Omega$ 이다. 따라서 전원임피던스는 다음과 같게 된다.

$$Z_s = \frac{(0.73569 + j36.84267)}{100} \times Z_{Base} = 0.22 + j11 \Omega \quad (5)$$

전철계통의 선로임피던스 Z_{TL} 은 CDEGS의 TRALIN 모듈을 이용하여 구하였으며, 고장전류는 SPLITS를 이용하여 구하였다. 해석결과 매설지선 유·무의 경우 고장점-1(전원단으로부터 원거리 단락사고시), 고장점-2(전원단으로부터 근거리 단락사고시) 부근의 전류분포를 구할 수 있었으며, 그 중 매설지선이 없는 경우의 고장점-1의 전류분포를 그림 7에 나타냈다. 여기서, 화살표는 전류의 방향을 나타내며, "/"의 좌우 수치는 전류의 크기와 위상각을 표시한다.

4.2 전철부하시 전차선 및 레일 전압 해석 결과

7800 kW의 전철부하가 음성 SP와 주덕 SSP 사이 구간에 위치했을 때의 전차선 전압과 레일전압을 계산한 결과를 각각 그림 8과 그림 9에 나타냈다.

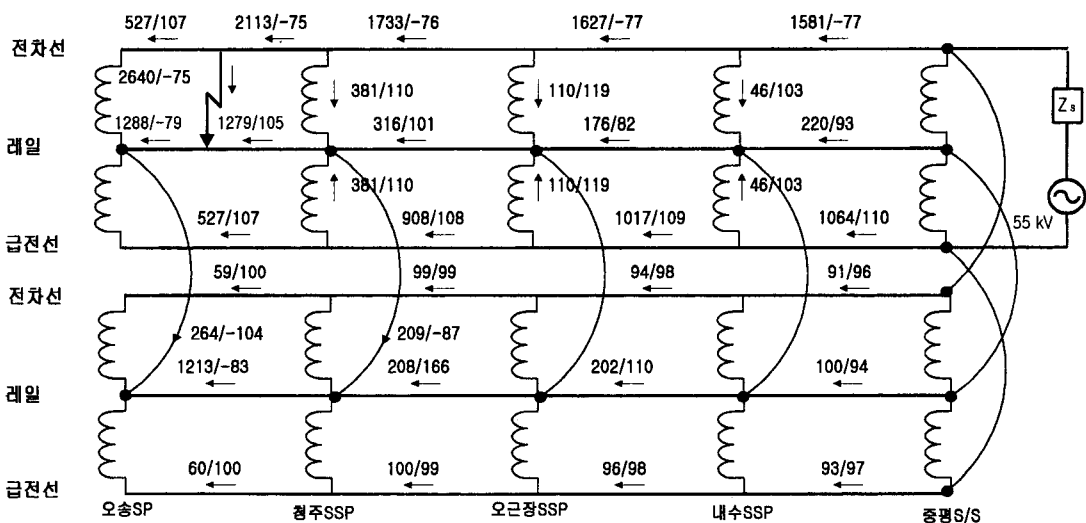


그림 7 전철계통 전류분포 ; 고장점-1(전원단으로부터 원거리 단락사고시-매설지선 없음)
 Fig. 7 Current distributions of railway system; fault point-1(far short-circuit fault from power supply without counterpoise)

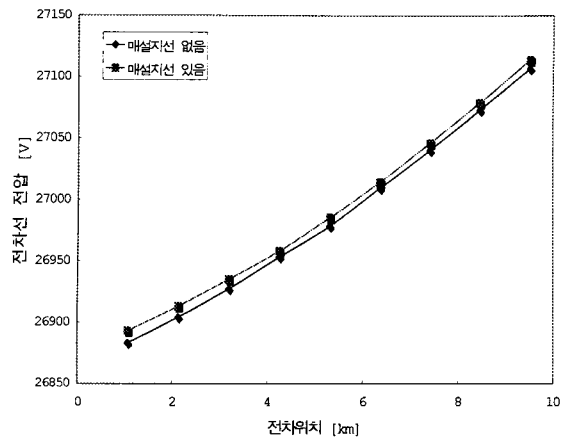


그림 8 음성 SP로부터의 거리에 따른 전차선 전압
 Fig. 8 Catenary potentials vs distances apart from Umsong SP

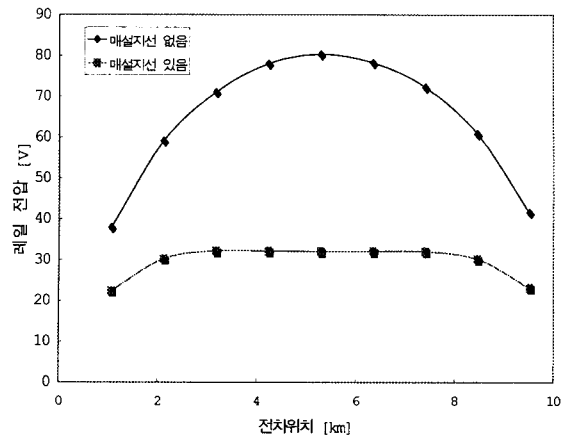


그림 9 음성 SP로부터의 거리에 따른 레일전압
 Fig. 9 Rail potentials vs distances apart from Umsong SP

매설지선이 있는 경우와 없는 경우를 비교한 결과, 전차선 전압은 큰차이를 보이지 않으나, 레일전압은 매설지선이 없는 경우가 높은 것으로 나타났다. 이러한 레일전압은 전차선 전류(부하전류)를 반영하는 값으로, 열차가 두 AT의 정 가운데에 위치했을 때 열차에서 바라본 열차의 양쪽 전차선 또는 레일의 병렬 임피던스가 가장 작으므로 정전력을 유지하기 위하여 열차 임피던스는 작아지고 열차전류는 커지는 데 따른 현상이다. 이와 같은 전차위치에 따른 전차선과 레일전압의 변화경향은 참고문헌 [6]-[8]의 AT방식 전철계통의 모의 결과와도 잘 일치하였다.

전차선 전압의 경우, 전원단인 충주변전소에 가까이 위치할수록 높으며, 멀어질수록 낮아진다. 그러나 레일전압은 전원단과의 거리에 상관없이 AT에 가까울수록 낮고, 멀어질수록 높아지며 매설지선이 없는 경우는 이러한 경향이 더욱 두드러졌다.

그림 10은 전철부하에서 가공지선이 있는 경우에 열차위치에 따른 전차선 전류의 크기를 나타낸 것이다.

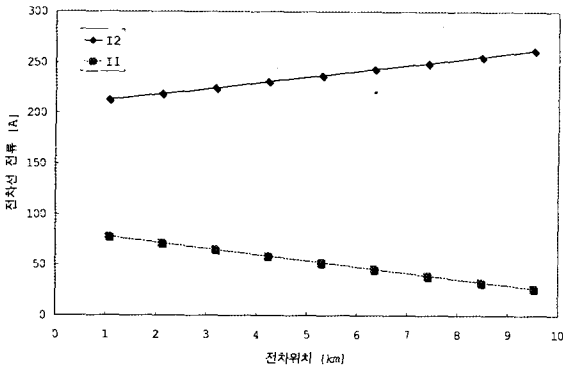


그림 10 음성 SP로부터 거리에 따른 전차선 전류크기
Fig. 10 Catenary currents vs distances apart from Umsong SP

전원단인 충주변전소에 가까운 주덕 SSP에 열차가 가까울수록 주덕 SSP 쪽으로부터 공급되는 전차선 전류 I_2 가 커지며, 반대로 충주변전소에서 멀어질수록 이 전류는 작아지는 대신 음성 SP 방향에서 공급되는 전류 I_1 은 커져서, 부하전류는 약 290 A 정도로 유지되었다.

4.3 전차선-레일간 단락사고시 해석 결과

고장점에 따른 고장전류의 크기와 레일전압을 계산한 결과를 표 5에 요약하였다. 앞에서 전차선-레일간 단락사고시 고장전류 분포에서 알 수 있듯이 전원단인 충주변전소에서 가까운 곳에서 사고가 발생한 경우가, 그렇지 않은 경우에 비하여 고장전류, 즉 전차선과 레일간 단락전류가 2배 이상 크다. 그러나 대지와 접하고 있는 레일 또는 매설지선의 누설 콘덕턴스, 즉 접지저항 또는 대지귀로 임피던스는 계통임피던스에 비하여 매우 작으므로 매설지선의 있고 없음에 따른 단락시 고장전류 크기는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 레일 또는 매설지선을 통하여 대지로 전류가 누설될 때의 접지전위, 즉 레일전위는 매설지선이 있는 경우가, 매설지선이 없는 경우에 비하여 절반정도 낮은 것으로 계산되었다.

표 5 고장전류, 레일전압 및 스트레스 전압 비교

Table 5 Comparisons of fault current, rail potential and stress voltages

시뮬레이션 조건		고장 전류	레일 전압	스트레스 전압
매설지선 있음	고장점-1 (오송SP-청주SSP간)	2669 A	306 V	983 V
	고장점-2 (내수SSP-중평S/S간)	5630 A	625 V	714 V
매설지선 없음	고장점-1 (오송SP-청주SSP간)	2640 A	591 V	1464 V
	고장점-2 (내수SSP-중평S/S간)	5471 A	1583 V	1585 V

표 5에서 스트레스 전압은 인명 또는 기계기구나 장치의 임의 지점들 간의 전위차를 말한다. 여기서는 통신 및 신호선로와 이에 접속된 전자기기의 외함과의 전위차를 의미하며, 통신 및 신호선로와 레일간의 전위차를 스트레스 전압으로 간주하여도 무방하다.

그림 11와 그림 12는 각각 구간 6와 구간 40에서의 고장시 구간 번호에 따른 신호선의 스트레스 전압을 매설지선 유·무의 경우에 따라 측정된 결과를 나타낸다.

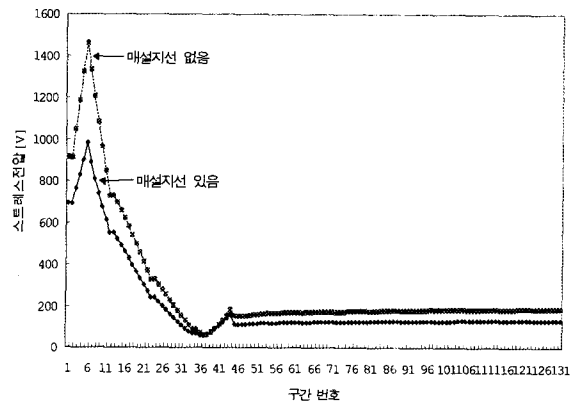


그림 11 고장시 신호선의 스트레스 전압(구간 6에서 고장시)
Fig. 11 Stress voltages of signal line(fault at section 6)

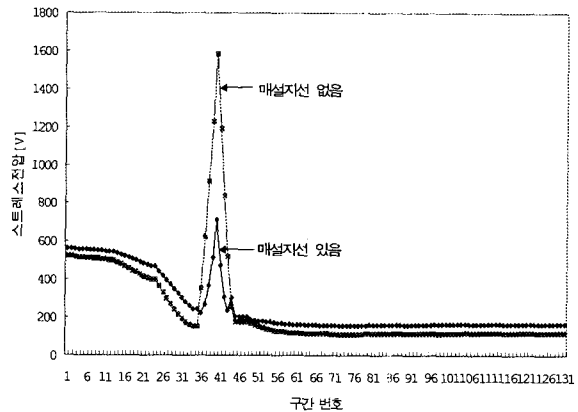


그림 12 고장시 신호선의 스트레스 전압(구간 40에서 고장시)
Fig. 12 Stress voltages of signal line(fault at section 40)

4.4 레일전압과 스트레스 전압에 대한 안전기준과 안전 평가

레일전압은 레일을 귀로 하는 전철회로에서 누설전류로 인해 유도되는 전압을 말하며, 국제 전신전화 자문위원회(CCITT)에서 정한 제한전압의 기준[9]은 대부분의 유럽국가에서 채택되어 적용되고 있는데 열차가 정상상태로 운전중일 때는 60 V, 전차선로의 단락고장상태일 때는 0.2초내 650 V를 구체적 기준으로 정하고 있다. 스트레스 전압은 통신 및 신호 케이블과 대지간에 유기되는 유도기전력(유도전압)을 말하는 것으로 통상적으로 기기의 절연내력 전압의 한계치로서 2 KV를 안전기준으로 정하고 있다.

그림 9에서 보는 바와 같이 열차가 정상적으로 운전중일 때 나타나는 레일전압을 보면, 매설지선을 설치하는 경우는 최대 30 V 이하로 안전전압인 60 V 미만으로 나타났으나 매설지선이 없는 경우 전차의 위치에 따라 60 V를 초과하여 최대 약 80 V에 이르고 있다.

전차선로가 고장상태인 경우 결과인 표 5와 비교할 때 매설지선이 없는 경우의 고장점-2(내수SSP-증평SS) 레일전압이 1583 V로서 기준치 650 V를 훨씬 초과하고 있음을 알 수 있다. 스트레스 전압의 경우는 매설지선의 유무에 관계없이 기준한계치인 2 KV 이하를 충족하고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전철 접지시스템에서 새롭게 도입되는 공용 접지시스템, 즉 전차선로 보호선, 레일, 변전소 등의 접지그리드를 매설지선에 일정한격으로 접속하는 접지시스템의 기술적 타당성에 대하여 시뮬레이션과 철도시스템의 접지에 관한 외국자료를 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

변전소와 구분소, 보조구분소 부지에 대한 접지설계에 CDEGS 프로그램을 사용함으로써 기존의 단층도양모델에 기초한 개략설계를 지양하고, 실제도양구조와 유사한 다층도양 모델 및 접지계의 전자계모델링에 기초한 보다 정확한 접지설계가 가능하였다. 그 결과, IEEE Std. 80에서 규정하고 있는 안전성 기준인 접촉전압과 보폭전압을 만족하면서도 지금까지 접지설계 보다 재료비와 시공비를 많이 절감할 수 있을 것으로 기대할 수 있었다.

또한, 변전소와 구분소, 보조구분소에 설치되는 컴퓨터 등의 각종 전자기기의 접지는 주접지전극 즉, 메시접지에 접속하는 공용접지를 실시하면 지락 등의 상용주파수 영역 고장시 보다 더 안전하게 된다. 그러나, 외부로부터의 낙뢰서지 등 과도상태의 고장인 경우에는 보호대상 주요기기를 차폐하거나, 본당을 실시하는 등 별도의 조치를 강구해야 한다.

특히, 충북선 전철에 매설지선을 설치하여 레일과 보호도체 및 변전소, 구분소, 보조구분소의 접지망을 이에 접속하는 공용접지시스템을 도입했을 때의 효과를 기존의 전철접지시스템과 비교하였을 때 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 선로에 전차가 운행중일 때 레일전압은 공용접지 방식으로 했을 때가 기존 접지방식 보다 전차위치에 관계없이 전반적으로 낮게 나타났으며, 최대 50V 정도 낮아지고 있어 공용접지 방식의 접지효과가 더 우수함을 알 수 있다.

(2) 전차선과 레일간에 단락사고가 발생했을 때 레일전압은 공용접지 방식으로 했을 때 기존의 접지방식보다 약 50% 정도 낮아지는 것으로 나타났다.

(3) 단락이나 지락사고시 통신 및 신호선에 가해지는 스트레스 전압은 공용접지 방식으로 했을 때 기존의 접지방식보다 최대 33% 정도 낮게 절리는 것으로 나타났다. 이때 통신 및 신호선로에 접속되어 있는 통신설비나 기기의 외함을 매설지선에 접속하는 등 등전위를 유지하기 위한 접지를 실시하면 훨씬 효과적인 것으로 사료된다.

공용접지의 단점이라면 기존 접지방식에 비해 매설지선을 추가로 포설하여야 함으로 시공비용은 증가하나, 시설후 유지보수 측면에서 고장으로 인한 파급효과, 즉 신호통신계통의 전자장비 손상 등을 완화할 수 있으므로 전체 비용으로 보면, 보다 경제적이라 할 수 있다. 프랑스의 고속철도는 이미 이 접지방식을 채택하여 유지보수비용이 획기적으로 감소하고 있다.

이상의 결과를 토대로, 공용접지시스템이 기존의 접지시스템에 비해 접지효과가 우수하기 때문에 향후 전기철도의 접지시스템은 새로운 접지방식으로 시행하는 것이 요망되며, 신설되는 전기철도는 설계단계에서 안전기준에 충족되는지의 여부에 대한 안전성 평가가 절대 필요함을 알 수 있었다.

따라서, 향후 전기철도 시스템에서 지락고장 등으로 인한 전기 및 통신 및 신호설비의 손상과 위험성으로부터 전기적 안전성을 보장하기 위한 설계기준의 작성이 요망되며, 특히, 통신 및 신호설비에 대해서는 공용접지시스템의 도입이외에 노이즈, 전자파 등으로부터 방호하기 위한 전자적합성(EMC)에 관한 설계기준의 작성이 바람직함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] H.S. Lee, J.H. Song, K.B. Ryu, and S.H. Chang, "Computation of Inductive Coupling Between Electrified Railways and Communication Cables", World Congress on Railway Research(WCRR) '99, Tokyo, Japan, Oct. 19-22, 1999.

[2] F. P. Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding, EMF and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, pp. 19-24, 1993.

[3] 한국철도기술공사, "충북선 조치원~봉양간 전철, 전력설비기본설계보고서(변전설비)", 1997, 11.

[4] IEEE Standard 80, "IEEE guide for safety in AC substation grounding", 1986.

[5] 한승진, 정용운, 천기하, 이기서, 박영수, 유광균, "케도회로의 전기적 특성에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, 1996.7.

[6] R. J. Hill, "On-line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 3, Aug., 1993.

[7] B. Mellitt, J. Allan, Z. Shao, W. Johnston, C. Goodman, "Computer-based methods for induced-voltage calculations in AC railways", IEE proc., Vol. 137, No. 1, Jan., 1990.

[8] R. J. Hill, I.H. Cevik, "Parallel Computer Simulation of

Autotransformer-Fed AC Traction Networks”, Railroad Conference, 1990.

[9] CCITT Directives, “Inducing-currents and Voltages in Electrified Railway System”, Geneva, 1989.

저 자 소 개

송 진 호(宋 晉 鎬)

전기학회 논문지 제 49D권 5호 참조

황 유 모(黃 有 模)

전기학회 논문지 제 49D권 5호 참조