

## 경부선 전철화 구간에서의 공동접지에 의한 귀선전류 분석

김용규<sup>1</sup>, 백종현<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국철도기술연구원

### Analysis of Return Current by Common Earth on Electrical Line of the Gyeongbu Line

Kim Yong Kyu<sup>1</sup> and Baek Jong Hyen<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Railroad Research Institute

**요약** 전기철도는 전차선을 통해 차량을 구동할 수 있는 전력을 공급하며, 공급된 전류는 선로 및 접지망을 통해 변전소로 귀환한다. 국내의 경우, 이러한 귀선전류에 영향을 주는 접지망 구성은 대부분 단독 접지방식을 사용하였으나, 경부고속선의 도입과 함께 공동 접지방식의 개념이 전기철도에 적용되었다. 본 논문에서는 고속철도의 기존선 운영을 위한 전철화 구간에서 측정, 분석한 귀선전류를 기반으로 전철화 구간에 있어서의 접지방식과 귀선전류의 관계를 분석하였다. 이러한 분석은 경부고속선 궤도회로에서 측정된 귀선전류 분석값과 경부고속선과 기존선 전철화 구간의 접지방식 비교에 따른 귀선전류의 예측값을 활용하였다.

**Abstract** Electrical Railroads provide electric power, which can operate vehicles, via feeder wires. And the supplied current returns to the transformer substation through lines and ground net. In domestic cases, the configuration of ground net affecting such a return current mostly uses an exclusive earth method. However, along with the introduction to Gyeongbu HSL(High Speed Line), the concept of Common Earth was applied to Electrical Railroads. In this paper, based on the return currents analyzed to be measured in the electrified sections for the operation of High Speed Rails in existing lines, we analyze the relations between earth methods and return currents in electrified sections. For analysis, we utilize the measured values of return currents measured in track circuits in Gyeongbu HSL, and predictive values of those compared to the earth methods between Gyeongbu HSL and the existing electrified sections.

Key Words : Common Earth, Return Current, Gyeongbu Line, Electrical Railroad

### 1. 서론

녹색 에너지를 사용함에 따라 최근에 재조명되고 있는 전기철도의 접지망 구성은 단독 접지방식과 공동 접지방식으로 분류되며, 국내에서는 일본 철도의 영향에 의해 주로 단독 접지방식을 적용함으로써 전체 보호 대상 시스템 중에서 일부의 설비 및 직원의 보호가 이루어졌다. 이에 따라, 단독접지가 설치되지 않은 설비나 주변의 단독접지에 비해 성능이 저하되는 접지 설비의 경우에는 안전 및 지락 피해 등과 같은 다양한 문제점이 제기되었

다[1].

그러나 경부고속선의 도입에 따라 적용된 유럽의 공동 접지방식은 선로변 전만에 등전위를 구성함으로써 이러한 문제점을 개선할 수 있었다. 다만 초기 설치비용이 매우 증가하는 현실적인 문제점이 고려되어야 했다[2]. 이러한 문제에도 불구하고 공동 접지방식은 현장 적용 및 장애 발생빈도 등의 실질적인 통계 지표를 통해 직원의 안전과 선로변 전기 설비에 가장 큰 영향을 인가하는 귀선전류의 문제점을 해결할 수 있는 최상의 방식으로 평가되고 있으며[3], 공동 접지망 구성은 기존의 전력 공급 시스템에 기본을 두고, 전철화에 따라 선택된 궤도 회로

본 논문은 한국철도기술연구원 기본연구사업 “초고속 튜브철도 급전 및 신호 핵심기술개발” 과제로 수행되었음.

\*교신저자: 백종현(jhbaek@krii.re.kr)

접수일 10년 10월 05일

수정일 (1차 10년 11월 17일, 2차 10년 11월 23일)

게재확정일 10년 12월 17일

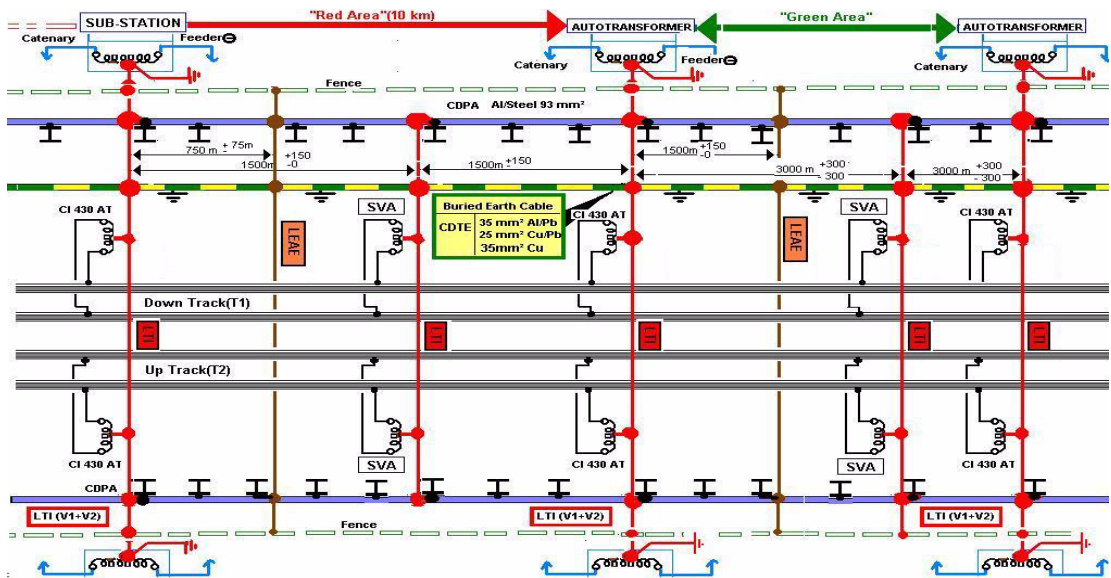
의 특성에 의해 변화되는 모든 설계 변수를 고려한 것으로서 전기 누설 및 낙뢰로부터의 선로변 직원 및 장비 보호, EMI(Electro Magnetic Interference) 영향 방지 또는 EMI 영향 최소화를 가능하게 하는 최적의 시스템으로서 프랑스철도청의 경험에 의해 검증되었다[1].

일반적으로 공동 접지망은 그림 1과 같이 상·하행선 두 개의 선로에 있어서 각각의 선로에 설치된 궤도 회로 임피던스 본드의 중성점, 전차선 보호를 위한 각각의 공중보호선(CPW : Contact Protective Wire), 선로변 금속 장벽, 건물, 교량, 터널의 모든 금속재 구조, 각각의 전력용 변압기 및 단권 변압기의 중성점, 매설 접지 케이블(BEC : Buried Earth Cable) 등으로 구성된다. 공동 접지망의 연결은 연결하는 방식에 따라, 반건넌선(LEAE : Liaison Equipotentielle between CPW & BEC) 및 건넌선(LTI : Liaison Transversale Integrale)의 개념이 적용되며, 주로 귀선 전류의 평형 및 각각의 궤도에 인가되는 선로 및 접지 전압의 감소를 위해 적절한 방법을 선택, 사용한다.

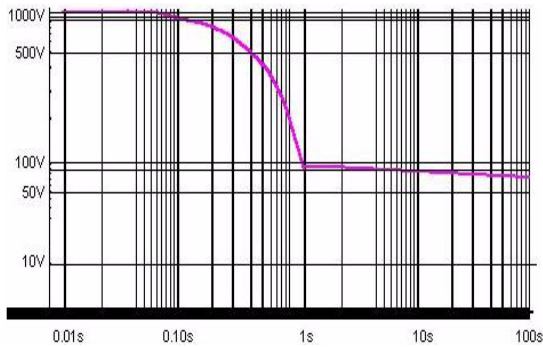
여기서 LEAE는 상행선과 하행선을 분리하여 각각의 설비를 접지망에 연결함에 따라 “1/2 횡단 접속”으로, LTI는 상행선과 하행선을 통합하여 각각의 설비를 함께 접지망에 연결함에 따라 “횡단 통합 접속”의 의미로 사용된다. 이러한 공동 접지망 구성은 경부고속선과 함께 국내에 처음으로 도입됨으로서 주로 프랑스철도청의 경험에 의한 설치 규정 및 규격을 국내 규정으로 사용하고 있다.

고속철도의 기존선 연계 운행이 경부선 동대구-부산 구간과 호남선 구간으로 결정됨에 따라 이들 구간에 전철화를 추진하면서 고속선과 동일한 공동 접지망의 원리를 적용하였다. 공동 접지망 설계를 위한 초기의 검토는 고속철도의 소비 전력 측면에서 LTI와 LEAE를 분석하였다[4]. 분석 결과, 동대구-부산 구간의 사용 전력이 45MW로, 이는 프랑스철도청에서 사용하는 고속선 전력과 유사함에 따라 경부선의 기존선 전철화 구간은 프랑스철도청의 고속선과 동일하게 취급하였으며, 동대구-부산 구간은 모두 LTI를 사용하여 공동접지망을 구성함은 물론 LTI와 LTI 사이의 거리도 고속선과 동일하게 평균 1500m 이하로 설계하였다. 만약 경부선의 LTI 연결이 2000m인 경우, EMI의 관점에서 선로와 접지 사이의 전위차가 선로변 Staff 보호를 위한 그림 2의 안전 기준 전압 값 650V를 초과하게 된다. 즉 두 개의 LTI 사이의 거리가 2000m이고, 단권 변압기가 설치된 두 장소의 거리가 10km인 경우, LTI 사이의 전압은 안전을 위한 규정 전압 650V를 초과하며, 두 개의 LTI 사이에 설치된 선로변 기기는 위험 전압에 직면하게 된다. 이를 해결하기 위한 유일한 방법은 LTI 사이의 거리를 감소함으로써 규정 전압 650V보다 작은 값을 갖도록 조정해야 한다.

이러한 경우, 기존선 전철화 구간에서의 LTI 간격은 최대 1500m로 주어지며, LEAE는 설치할 수 없게 된다 [5].

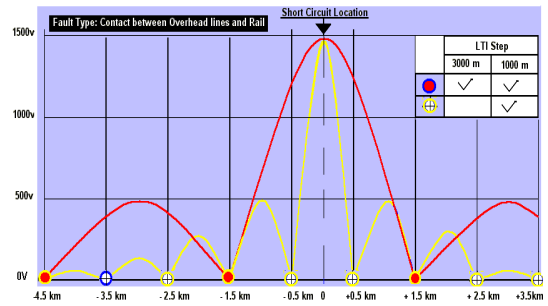


[그림 1] 공동 접지망 구성 예(Configuration of common ground net)



[그림 2] Staff 안전을 위한 규정전압 한계(Limit of normal voltage for the safety of staffs) (EN50122.1)

궤도회로 측면에서 LTI와 LEAE를 분석할 경우, 기존 선 전철화 구간의 궤도 회로는 600~800m로, 최대 LTI의 거리는 두 개의 궤도 회로에 따라 주어진 간격 1200m~1600m가 된다. 따라서 앞에서 언급한 1500m의 LTI 간격 한계치로 인해 LTI의 거리가 1600m인 경우에는 궤도 회로의 축을 이동하거나 관련 궤도 회로의 길이를 보완하는 방법이 적용되어야 한다. 변전소 또는 자동변압기 부근에서는 선로를 흐르는 모든 귀선 전류가 집결함에 따라, 위에서 주어진 1500m의 길이는 안전을 위한 EN 규정 전압 한계값인 650V 이하가 되도록 조절하여 설계되었다[1]. 만약 공중보호선과 궤도간에 단락 회로가 형성되는 경우에는 궤도와 접지간의 전압차는 1000V까지 상승할 수 있다. 그러나 견인력 차폐 장치가 1초 미만의 시간에 작동하기 때문에 이러한 위험 상황은 매우 짧은 시간 간 지속된다. 이는 2개의 LTI 사이에서 단락이 발생한 경우, Staff와 선로변 기기에 대해 효율적인 보호를 실행한다. 그러나, 어떠한 종류의 선로변 설비에 관계없이 단락 회로가 발생한 위치에 근접해 있는 선로변 설비는 궤도와 접지간의 과전압에 의한 피해가 발생한다. 한 예로 단락 회로가 LTI에서 발생한 경우, 단락 회로의 영향이 거의 존재하지 않음에 따라, 단락 회로의 영향은 매우 크게 감소한다. 그러나, 두 개의 LTI 사이에서 단락 회로가 형성된 경우, 이의 영향은 두 개의 LTI간의 거리에 의존한다. 그림 3은 LTI의 간격이 3km인 경우 보다는 LTI의 간격이 1km인 경우가 단락회로에 따른 전압차를 최소화할 수 있음을 나타낸다[2].



[그림 3] 단락회로 발생시의 LTI에 따른 전위차(Voltage differences depending on LTI, when a short-circuit occurs)

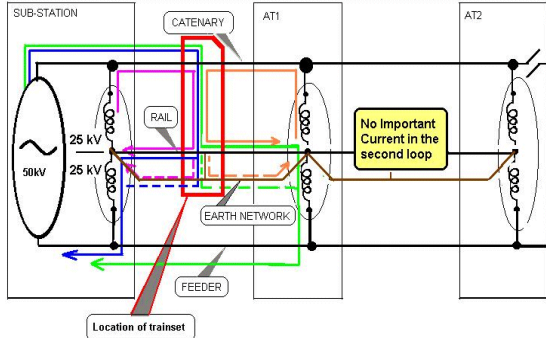
경부고속선 궤도회로는 프랑스 Ansaldo의 UM71 AF 궤도회로로 열차 검지와 함께 선로에서 차량으로 열차 운행 관련 정보를 전송하며, 기존선 전철화 구간의 궤도 회로는 단지 열차 검지의 역할을 하며, 이러한 목적을 위해 역구내에서는 임펄스 궤도회로가, 그리고 역 간에는 스웨덴 Bombardier (ex-Adtranz)의 TI51 AF 궤도회로가 설치되어 있다. 임펄스 궤도 회로는 200A 또는 430A 유형의 임피던스 본드를 사용하여 귀선 전류가 변전소로 귀환하며, TI21 AF 궤도 회로는 IN500 임피던스 본드를 통해 동일한 기능을 수행한다[9,10].

본 논문에서는 이러한 궤도회로에 있어서 귀선전류의 영향을 분석하기 위하여 고속철도의 기존선 운영을 위한 전철화 구간에서 측정, 분석한 귀선전류를 기반으로 전철화 구간에서의 접지방식에 따른 귀선전류의 관계를 도출하였다. 이러한 분석은 경부고속선 궤도회로에서 측정된 귀선전류 값과 경부고속선과 기존선 전철화 구간의 접지방식 비교에 따른 귀선전류의 예측 값을 활용하였다.

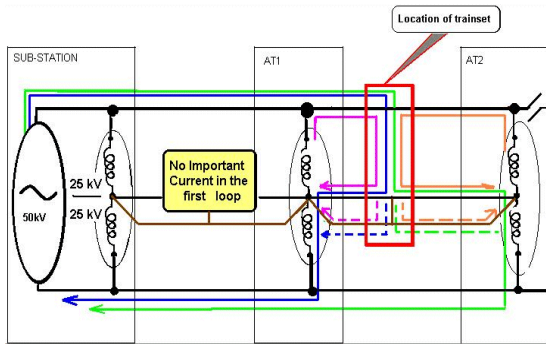
## 2. 귀선 전류 분석

귀선 전류는 주로 변전소, 급전 구분소 및 전력 관련 구분소와 관련 궤도의 임피던스 본드 위치에 의존하며, 궤도 회로의 임피던스 본드를 통해 흐르는 귀선 전류의 크기는 해당 역보다는 인근 변전소에서 더욱 중요한 역할을 한다. 귀선 전류의 크기는 주어진 영역에 설치된 병렬 선로의 수에 의존하며, 각각의 궤도 회로의 임피던스 본드 중성점은 상호 연결된다. 또한 선로를 통해 흐르는 전체적인 귀선 전류 값을 측정하기 위해서는 동일 장소에서 동시에 운행되는 열차의 수 및 이들 열차에 의해 소모되는 소비 전력을 충분히 고려해야 하며, 접지 전류는 변전소에서 가장 작고 변전소로부터 멀어질수록 비례하

여 증가하지만, 귀선 전류는 변전소에서 가장 크고 변전소로부터 멀어질수록 거리에 따라 감소하는 것으로 프랑스철도청의 귀선 전류 관련 규정에 따라 제시되었다[3].



a) 열차가 변전소 부근에 위치할 경우  
(Train located near a substation)



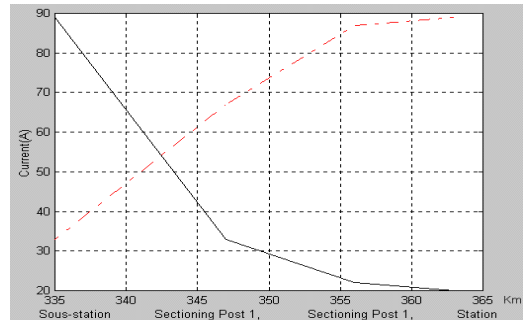
b) 열차가 AT(단권 변압기) 사이에 위치할 경우  
(Train located between AT's)

[그림 4] 귀선 전류 귀환 회로도  
(Schematic on return currents)

하나 또는 여러 대의 열차가 동일 선로 상에서 운행될 경우, 전차선 및 급전선에 의해 전송되는 견인 전류는 주어진 구간에 위치한 레일 수, 공중보호선(CPW), 접지선으로 구성된 그림 4와 같은 귀선 전류 귀환 통로에 의해 변전소로 귀환된다. 그림 4의 a)에서 열차가 변전소 부근에 위치할 경우, 변전소와 AT1, AT1과 AT2 사이의 귀선 전류 루프가 형성되며, AT1과 AT2 사이의 루프는 변전소의 귀선 전류에 영향을 주지 않게 된다. 따라서 대부분의 귀선 전류는 변전소와 AT1 사이의 루프를 통해 변전소로 귀환되며, 공동접지망의 크기는 상대적으로 작아지기 때문에 귀선 전류가 높게 나타나게 된다. 또한 그림 4의 b)에서 열차가 AT1과 AT2 사이에 존재하는 경우, 변전소와 AT1 사이의 루프는 귀선 전류에 영향을 거의 주지 않고 접지 전류망은 변전소와 AT1, AT2를 통합하는

루프로 형성된다. 따라서 이러한 경우, 귀선 전류는 그림 4의 a)에 비해 상대적으로 작아지지만, 접지 전류는 증가하게 된다. 특히 전철화 구간에서의 귀선 전류의 흐름을 예측하는 것은 매우 복잡하며, 선로변 자갈 도상의 임피던스, 공중보호선(CPW)의 길이, 전력 공급 장소에 대한 열차의 상대적인 위치에 의존한다[8]. 전차선 전류에 따른 최대 귀선 전류 예측시 필요로 하는 기본 자료는 예측을 실행하려는 구간에 적용될 견인 전력에 의존한다.

본 논문과 같이 동대구-부산간 전력 설비 설계 보고서에서 제시된 내용에 따라, 열차의 운행 속도, 사용 전력 및 역률을 150km/h, 4500kW, 및 0.9로 가정할 경우, 전차선 전류는 200A로 주어진다[9]. 따라서 SNCF의 귀선 전류 예측 방법에 의해 예상되는 귀선 전류와 접지 전류에 대한 값은 그림 5와 같이 주어질 것으로 예상된다. 그림 5의 시뮬레이션 결과를 보면 귀선 전류는 변전소에서 높게 나타나는 반면, 접지 전류는 변전소에서 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 역 구내의 경우에는 이와 대조적으로 접지 전류값이 최대가 되는 반면, 귀선 전류는 최소가 된다.



(실선 : 귀선 전류, 점선 : 접지 전류)

[그림 5] 귀선 전류와 접지 전류 예측값(Predicted values of return currents and earthing currents)

### 3. 기존선 구간의 귀선 전류 측정

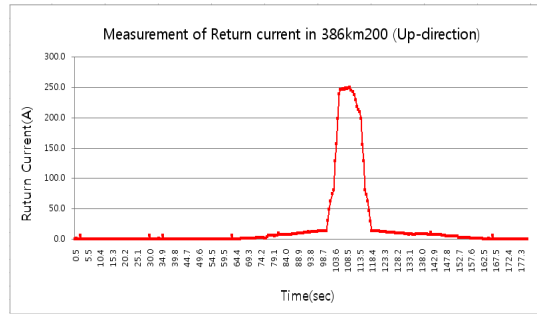
2009년 8월 10일 상선과 하선에서 운행 중인 전기기관차를 대상으로 귀선전류를 측정하였다. 측정 장소는 밀양 변전소를 중심으로 미전과 청도 방향으로 귀선전류의 특성 확인을 위해 역간, 변전소 전방, 구분소 전방에서 실시하였으며, 관련 최대 전류 값과 그래프는 표 1과 그림 6과 같이 측정되었다. 여기서 그림 6의 b)는 전기기관차(EL8200)의 경우이고, 나머지는 모두 고속열차(KTX) 운행 중에 측정하였다.

밀양 변전소 상선 386K200의 경우, 측정값은 그림 6

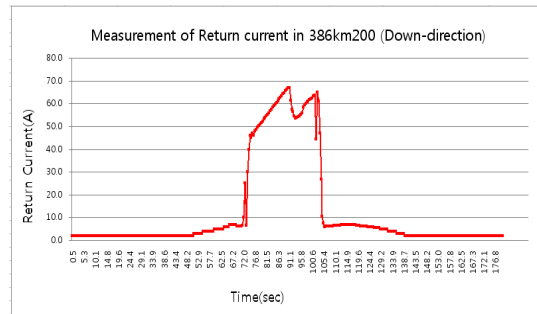
의 a)와 같으며, 200A 임피던스 본드의 가용성 범위인 180A를 기준으로 할 때 측정값은 8초 이상 180A를 초과하였다(최대치 : 249.5A). 특히 귀선전류의 폭선이 시간에 대해 서서히 증가해야 함에도 불구하고, 35.3초 ~ 41초에서 순간적으로 변화되었다. 밀양 변전소 하선 386K200의 경우, 측정값은 그림 6의 b)와 같으며, 200A 임피던스 본드의 가용성 범위인 180A에 대해 최대 67A로 측정되었다. 이는 운행 열차의 부하 용량이 고속열차(KTX)에 비해 상대적으로 작은 전기기관차(EL8200)가 운행된 결과로 예상된다. 또한 동일한 구간에 있어서 고속열차(KTX)가 운행되는 경우에 측정된 값도 그림 6의 c)와 같이 최대치가 173.2A로 확인됨으로서, 예측된 귀선전류 값의 범위를 크게 이탈하지 않았다. 밀양 변전소 상선 386K200에서 재측정한 결과는 그림 6의 d)와 같으며, 관련 값은 8초 이상 최대 266.5A까지 증가하였다. 특히 이 구간의 귀선전류 값은 타 구간에 비해 가장 높게 측정되었다. 귀선전류가 측정 위치에 따라 얼마만큼 큰 폭으로 변화되는지를 확인하기 위해 밀양 변전소 상선 384K600에서도 귀선전류를 측정하였다. 첫 번째 측정값은 그림 6의 e)와 같으며, 최대치는 135.3A로 확인되었으며, 두 번째 측정값은 그림 6의 f)로 주어지며, 최대치는 191A로 확인되었다. 다음은 전력구분소에서 귀선전류 영향을 분석하기 위해 밀양 변전소에서 약 22km 북쪽에 위치한 청도 구분소 전방 364K600에서 귀선전류를 측정하였다. 첫 번째 측정값은 그림 6의 g)와 같으며, 최대치는 93A로 주어진 반면, 두 번째 측정값은 그림 6의 h)와 같이 최대 244.4A까지 상승하였다. 그러나 세 번째 측정값은 최대치가 105.7A로 그림 6의 i)와 같이 주어짐으로서 이론적으로 검토된 귀선전류 값에 일치함을 확인하였다.

[표 1] 최대 전류값 검토

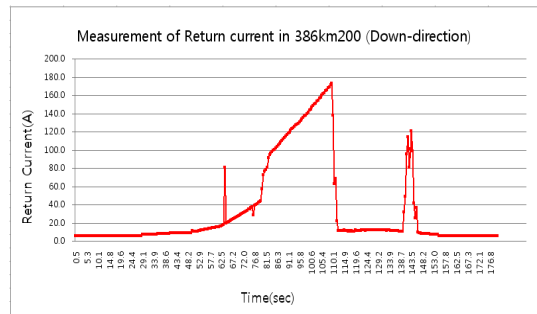
구간			위 치	최대 전류(A)
변전소	구분소	일반구간		
밀양	-	밀양~미전	상선(386k200)	249.5
밀양	-	밀양~미전	하선(386k200)	<b>60</b>
밀양	-	밀양~미전	하선(386k200)	173.2
밀양	-	밀양~미전	상선(386k200)	<b>266.5</b>
밀양	-	밀양~미전	상선(384k600)	135.3
밀양	-	밀양~미전	상선(384k600)	180
-	청도	청도~상동	상선(364k600)	93
-	청도	청도~상동	상선(364k600)	244.4
-	청도	청도~상동	상선(364k600)	105.7



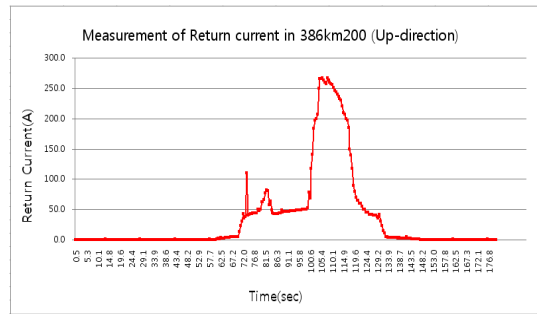
a)



b)

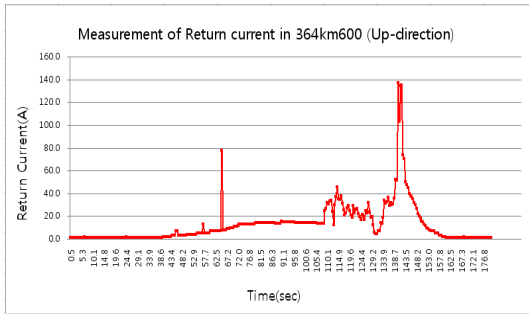


c)

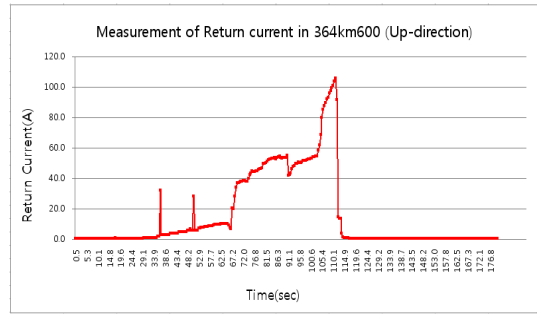


d)



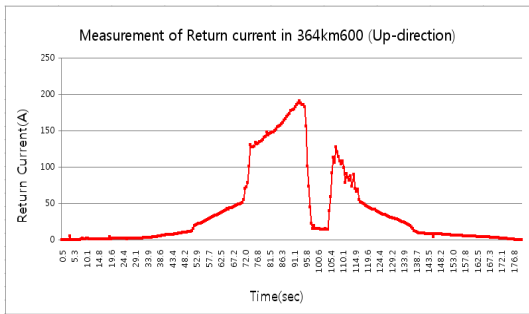


e)

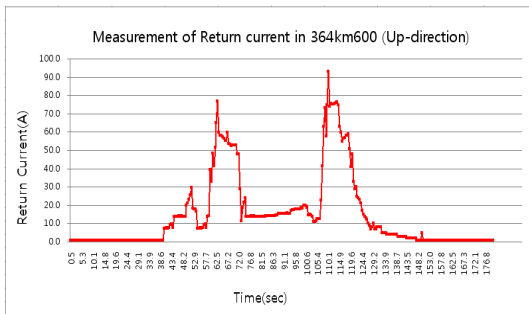


i)

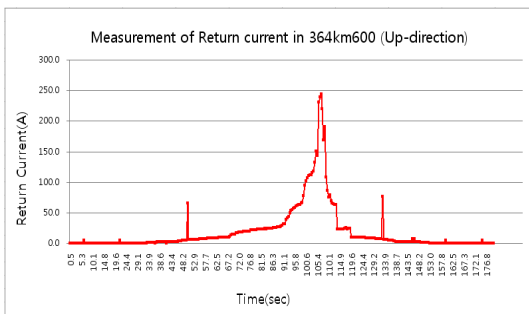
[그림 6] 귀선전류 측정값  
(Measured value of return currents)



f)



g)



h)

#### 4. 결론

경부고속선과 기존선 전철화 구간의 경우에는 공동접지망을 구성함에 따라 귀선전류의 값은 이론상 전차선 공급전류의 1/2을 초과할 수 없으며, 대부분의 귀선 전류는 접지망을 통해 변전소로 귀환하게 된다. 그러나 경부선 전철화 구간에서의 측정 결과는 전차선 전류가 대부분 귀선전류로 흐르는 것을 확인할 수 있지만, 일부 특정 구간 또는 특정 열차의 경우에는 정상적인 귀선 전류의 흐름이 통과하는 차량의 특성에 따라 약간씩 가변적으로 주어지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 기관차의 운전 형태 및 주변에 운행중인 차량은 이러한 귀선전류에 큰 영향을 인가할 수 있지만, 이론상 완전한 공동접지를 구성하는 경우에는 귀선전류 측정값이 전차선 공급전력의 1/2 이하이어야 한다. 그러나 일부 구간과 같이 귀선전류가 크게 주어지는 경우에는 규정상 1본이 아닌 단지 몇 초만 귀선전류가 순간적으로 증가하는 형태로 안전에는 큰 문제점을 유발하지 않지만, 측정된 귀선전류의 형태를 분석한 결과는 공동 접지망에 대한 상세한 검토 및 조사가 필요한 것으로 확인되었다. 한 예로 LTI 유형의 공동 접지망과 LEAE 유형의 공동 접지망의 경우, 귀선 전류의 크기가 상대적으로 다르게 주어짐으로서 현재 운행중인 열차의 전력 소모량을 검토하여 주어진 LTI 설계와 LEAE 설계의 정확한 판단을 제시해야 할 것으로 예상된다. 또한 현재 LEAE로 구성된 구간에서의 귀선전류 측정과 이를 LTI 방식으로 변경시의 귀선전류 측정값을 비교, 분석함으로써 전기 기관차의 운행에 따른 인명, 시설물 보호 및 낙뢰, 지락으로 부터의 철도시스템 보호 등을 위한 최적화된 접지 및 귀선전류 시스템 구축 및 보안을 실시할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- [1] 김용규외 1인, “2×25kV 급전방식에서의 공동접지방 적용에 따른 귀선전류의 영향”, 대한전기학회논문지 제51B권 제9호, pp.509-514, 2002.
- [2] 이길노외 3인, “전기철도시스템의 접지유형에 따른 귀선전류 비교”, 2005 정보 및 제어 학술대회 논문집, pp.53-55.
- [3] 김용규외 2인, “경부선 전철화 구간에서의 귀선전류 및 임피던스 예측”, 2001 대한전자공학회하계학술대회 논문집, pp.123-126.
- [4] 김용규외 2인, “기존선 전철화에 따른 궤도회로 특성 연구”, 2004 대한전기학회 하계학술대회 논문집.
- [5] Y.K, KIM and al, “Estimation and Measurement of the traction return current on the electrified Gyeongbu line”, 2001 Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1458-1461.
- [6] 이길노외 3인, “궤도회로에서의 공동접지와 단독접지 인터페이스”, 2005년 한국철도학회 추계학술대회 논문집.
- [7] 김용규 외 2인, “궤도회로의 유지보수 효율화를 위한 동조 유니트 특성 분석”, 한국산학기술학회 논문지 제10권 제12호, pp.3594-3599, 2009.
- [8] 철도청(1999), “경부선 동대구-부산간 전철화에 따른 신호 설비 실시 설계 보고서”.
- [9] 철도청(1999), “경부선 동대구-부산간 전철화에 따른 전력 설비 실시 설계 보고서”.

## 백 종 현(Jong-Hyen Baek)

[정회원]



- 1995년 2월 : 전북대학교 제어계측공학과 학사
- 1997년 2월 : 광주과학기술원 메카트로닉스공학과 석사
- 2009년 8월 : 전북대학교 메카트로닉스공학과 박사
- 1997년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실 선임연구원

<관심분야>

현대제어, 지능형시스템, 시스템엔지니어링

## 김 용 규(Yongkyu Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 단국대학교 전자공학과 석사
- 1993년 9월 : DEA in Control Engineering from Institute National Polytechnique de Lorraine, France
- 1997년 7월 : Ph.D in Control Engineering from Institute National Polytechnique de Lorraine, France
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실장

<관심분야>

자동제어, 지능형시스템, 제어계측