

국내 도시철도 전식방지 기술기준에 따른 시험사례 비교분석

논 문
59P-3-11

The Comparison Analysis of Field Test Cases on Technical Specifications of Electrolytic Corrosion in Urban Railway

김재문[†] · 정호성* · 김양수**
(Jae-Moon Kim · Ho-Sung Jung · Yang-Su Kim)

Abstract - DC electricity feeder system operating in the urban railway is typically a feedback circuit consisted of the contact wire and electric railway vehicle via rail. But stray current is flowed on a structure that is not part of the intended electrical circuit with respect to a given structure.

This paper presents comparison analysis of field test cases based on criteria of electrolytic corrosion protection of buried metallic structures adjacent to DC traction systems. As a result of it, we confirmed that measurement methods are different from each other about the same tests. Therefore measurement methods to prevent electrolytic corrosion need to establish electrical facilities standards to be applied domestic.

Key Words : Urban Railway, Stray Current, Electrolytic Corrosion, Metallic Structures, Technical Specifications

1. 서 론

국내 경제성장과 더불어 인구의 집중화 현상이 심화되고 이로 인해 대도시 지자체를 중심으로 교통 혼잡 및 환경오염 등을 해소하기 위한 신교통수단으로 도시철도와 경량전철을 적극적으로 증설하고 있다. 그러나 도시철도와 경량전철의 보급 확대에 인하여 직류 급전시스템으로부터 발생하는 누설전류에 의해 도시철도, 가스배관, 송유관 및 상수도관 등과 같은 주요 기간시설물의 전식 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 특히 도시철도 차량기지 인근의 매설배관에서 누설전류에 의한 간섭이 심하며 배관관리자들은 대책을 마련하기 위하여 노력하고 있으나, 전식대책 관련 기술력 부족과 기술기준의 미비로 인해 어려움을 겪고 있는 실정이다.

일반적으로 도시철도의 직류 급전시스템은 승객을 수송하는 전기철도차량이 부하가 되므로 차량이 운행 중에 전류가 가공 급전선과 철도차량을 경유하여 레일을 통한 귀환 회로로 구성된다. 그러나 레일과 대지 사이에 완벽하게 절연되어 있지 않을 경우 레일을 통해 흐르는 귀환전류의 일부는 대지로 흘러 들어간다. 만약 레일을 기준으로 대지 속에 배관과 같은 금속시설물이 매설되어 있는 경우 대지로 유출된 누설전류(漏洩電流 ; Stray Current 또는 미주전류)는 매설

된 금속시설물에 유입되었다가 도시철도의 변전소 부근에서 유출하여 레일로 되돌아온다. 이때 누설전류는 지중에 매설된 금속시설물의 전식(Electrolytic Corrosion 또는 Stray Current Corrosion)을 포함하여 여러 가지 문제를 일으킬 수 있기 때문에 오랫동안 현안이 되어 왔다[1-6].

철도 선진국에서는 전식에 따른 문제점을 해결하기 위해 누설전류를 원천적으로 감소시키거나 배류법을 대체할 수 있는 새로운 기술을 도입하려는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 또한 전식방지 대책을 수립하기 위해 도시철도, 전력, 통신, 가스, 수도, 송유 및 이와 관련된 사업자들이 모여 전식방지 위원회(Electrolysis Committee)를 구성하여 전식관련 문제가 발생할 때마다 현상분석, 피해방지 및 대책실시 등의 제반문제에 대하여 모든 관계자들이 상호 협의를 기본으로 기술적인 해결을 꾀하고 있다[2,7-10].

반면 국내에서는 서울 지하철 2호선이 개통되면서 지하철 누설전류가 송유관에 미치는 영향이 조사되어 선택배류기를 설치한 것이 전식대책의 시발점이 되었다. 이때부터 지하철 누설전류의 영향을 받는 가스배관과 상수도관 등 지하 매설 금속시설물에 대한 배류법의 적용이 확산되었다. 현재 도시철도 누설전류에 의한 전식방지를 위해 대부분 배류법에 의존하고 있으며, 관련 유관기관이 참여하는 체계적인 전식방지 대책 수립방안이 마련되어 있지 않는 실정이다.

본 논문에서는 전기설비기술기준 및 판단기준에 따라 국내 도시철도에서 적용되고 있는 전식방지와 관련한 시험사례들을 살펴보았다. 전기설비기술기준에 따른 측정방법이 구체적으로 제시되지 않아 운영기관마다 제각기 측정시험을 하고 있는 것으로 조사되었다. 이러한 문제점을 도출하여 향후 도시철도 운영기관, 지하매설 금속시설물 운영기관 등 이해 당사자가 함께 사용할 수 있도록 보다 구체적인 전식방지 기술기준(안) 표준화 정책수립에 반영하고자 한다.

[†] 교신저자, 종신회원 : 한국철도대학 철도차량전기와 조교수 · 공박
E-mail: goldmoon@krc.ac.kr

* 정 회 원 : 한국철도기술연구원 선임연구원 · 공박

** 종신회원 : 한국철도대학 철도차량전기와 부교수 · 공박

접수일자 : 2010년 8월 2일

최종완료 : 2010년 8월 23일

<본 논문은 본 학회 2010년도 전기설비전문위원회 춘계학술대회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회에서 심사 후 본 논문에 게재 되었음>

2. 도시철도 전식방지시스템

2.1 전식발생의 개요

대도시에서 직류급전시스템으로 운행되는 도시철도차량의 전차선 전압은 대부분 DC 1,500[V]를 사용하고 있으며, 정 급전선로는 가공전차선(지상구간) 또는 강제 전차선로(지하구간)를 사용하고 부 급전선로는 레일(Rail)을 귀로로 사용하고 있다.

부 급전선로로 사용하는 레일이 대지에 대한 절연이 불충분할 경우 레일에 흐르는 전류의 일부가 임의의 지점에서 지중으로 누설된다. 그림 1에서 보듯이 레일에 접근하여 금속체가 매설되어 있는 경우 누설전류는 매설된 금속체와 같은 저저항의 금속체에 유입되어 부 급전점인 변전소 부근에서 유출하여 변전소 부 급전선로로 귀환한다. 이에 따라 매설금속체를 기준으로 레일에서 누설된 전류가 토양으로부터 매설 금속체에 전류가 유입되는 지점에서는 레일보다 전위가 낮아 전기방식(電氣防蝕; Cathodic Protection)을 받는 상태가 되어 금속체의 부식이 억제되나 반대로 매설금속체를 따라 흐르던 누설전류가 변전소 부근에서 매설금속체로부터 토양을 통해 레일로 귀환하므로 매설금속체는 레일보다 전위가 높은 양극이 되어 전식(電蝕; Electrolytic Corrosion)이 발생하게 된다.

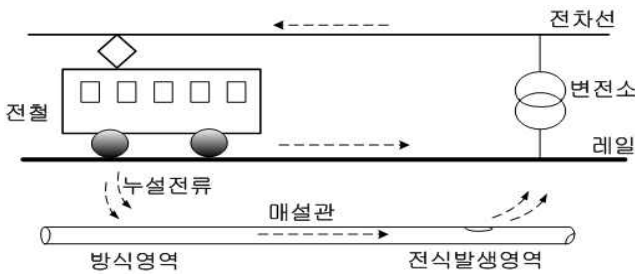
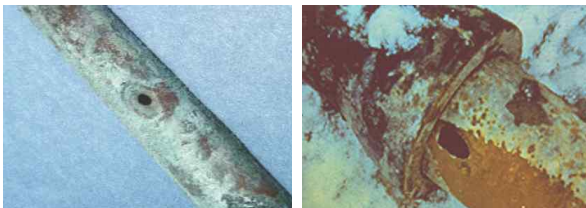


그림 1 도시철도 전식발생 개요

Fig. 1 The overview of electrolytic corrosion in DC railway



(a)연속적인 배관

(b)비연속적인 배관

그림 2 전식영향에 따른 배관 사진

Fig. 2 The photo of pipeline in case of electrolytic corrosion

일반적으로 전식은 그림 2와 같이 금속체의 한 부분에 집중하여 발생하는 것이 특징이며 단기간동안 금속체에 구멍이 뚫려 사고가 발생한다. 특히 매설관의 피복장에 결함이 발생한 경우 누설전류가 고전류 밀도를 절연성 도장의 결함부에서 유출하므로 관의 국부적 부식을 급속히 촉진시키는 경우가 있다[10].

누설전류는 매설금속체가 주성분인 철이 2가의 산화물 또는 이온으로 부식되는 것을 가정하면 측정된 누설전류를 적분하거나 평균전류(I_{mean})에 시간을 곱하여 식 (1)의 패러데이 법칙에서 연간부식량(m)을 계산할 수 있다. 즉, 1[A]의 전류가 1년간 흐를 경우 철은 약 9.12[kg]이 부식함을 알 수 있다[2,10].

$$m = M \times \frac{Q}{nF} \tag{1}$$

$$= M \times \frac{I_{mean} \times 3,600 \times 24 \times 365}{nF}$$

여기서 M : 철의 원자량(=55.8), Q : 연간 전하량 [C], n : 철의 산화에 필요한 전자수(=2), F : 패러데이 상수(=96,485[C/mol])

한편 누설전류가 교류인 경우 이에 인한 부식은 실험결과를 통해 직류에 의한 부식보다는 아주 경미한 것으로 알려져 있으며, 상용 주파수의 교류에 의한 철의 부식은 동일한 크기의 직류에 의한 부식에 비해 1% 미만으로 알려져 있다.

2.2 전식방지를 위한 배류기 설치 현황

국내에 적용되고 있는 배류법은 전식방지를 위한 전기설비기술기준의 판단기준에 따라 설치되고 있으며, 종류로는 레일과 지중매설배관을 전기적으로 연결하고 전압 인가 없이 레일과 배관 사이의 전위차에 의해 선택적으로 누설전류를 귀환시키는 선택 배류법과 레일과 지중매설배관 사이에 전압을 인가하여 배관으로 유입된 누설전류를 강제로 레일로 귀환시키는 강제 배류법으로 나뉜다. 선택 배류기는 제어불가능한 반도체 소자인 다이오드를 사용하여 지중매설배관의 전위가 레일전위보다 높을때만 배류기를 통해 흐르도록 하고 있으며, 강제 배류기인 경우 제어가능한 사이리스터(Thyristor) 직류 전원장치 등을 이용하여 강제로 지중매설배관으로부터 레일 방향으로 전류가 흐르도록 제어한다. 그림 3과 그림 4는 선택 배류법과 강제 배류법의 누설전류 흐름도를 보여준다[2,3].

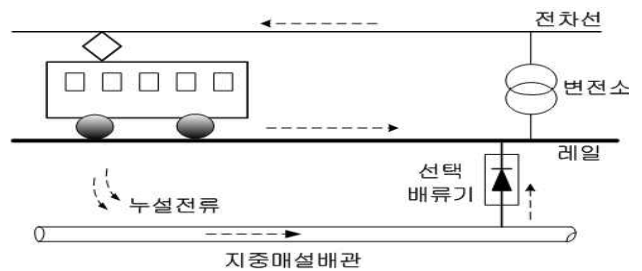


그림 3 선택 배류법 원리

Fig. 3 The principle of polarized electric drainage method

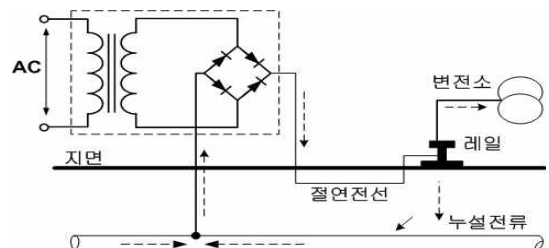


그림 4 강제 배류법 원리

Fig. 4 The principle of forced drainage method

배류전류의 크기는 누설전류의 실태를 분석하는데 매우 유용한데, 특히 레일의 부식속도와 직접적인 상관관계를 가지므로 배류전류의 크기를 측정하여 지중으로 흐르고 있는 누설전류의 간접실태를 정량적으로 산출할 수 있다.

한편 국내에서 운행 중인 도시철도 배류기 설치현황을 살펴보면, 서울지역의 경우 지하철 노선의 신설 및 확장에 따라 지속적으로 증가되어 왔다. 신설되는 배류기의 형태는 선택 배류기에서 강제 배류기로 전환되어 왔는데, 1980년대에는 주로 선택 배류기를 설치하였으나 간섭영향이 증가함에 따라 1990년대 이후 강제 배류기의 적용이 증가하였고 기존에 설치되어 있던 선택 배류기를 강제 배류기로 교체한 사례도 17건으로 조사되었다.

서울과 부산지역에서 운행 중인 지하철의 호선별 배류기 운영 현황에서 배류법이 적용되어 있는 시설물로는 가스배관이 83개소, 상수관이 24개소, 송유관이 5개소 및 지하철 운영기관이 2개소로 조사되었다. 그리고 사용 중인 배류법은 선택 배류기가 21대, 강제 배류기가 93대로써 강제 배류기의 비중이 큰 것으로 나타났다.

표 1 배류기 설치 현황(2003년말 기준)

Table 1 The installation status of drainage methods

구분	선택 배류기	강제 배류기	계
서울 1호선	2	3	5
서울 2호선	11	28	39
서울 3호선	5	18	23
서울 4호선	1	11	12
서울 5호선	0	14	14
서울 6호선	1	1	2
서울 7호선	1	3	4
서울 8호선	0	0	0
부산 1호선	0	7	7
부산 2호선	0	8	8
합계	21	93	114

그러나 최근에 배류효율의 저하 문제와 배류법의 위해성에 대한 인식이 부각되어 기존 설비를 철거하거나 외부 전원법으로 전환하는 사례도 있으며 강제 배류기를 선택 배류기로 변경하여 운영하는 개소도 늘어가고 있는 추세이다.

3. 전식방지 시험사례

전식방지와 관련한 시험사례는 국내 지자체의 가스관, 상수도관에 대한 전식영향에 대한 사전조사가 대부분을 차지하고 있는 가운데, 지하철 주변의 상수도관, 대전지하철, 인천지하철, 대구지하철, 용인경전철 등 신설되고 있는 경전철과 지하철에 대한 전식방지 사전조사를 수행했던 것으로 조사되었다.

전식방지 대책설비 적용범위는 표 2와 같이 설비별, 구간별, 시기별로 나눌 수 있으며 설비별, 구간별 적용범위인 경우 전기설비 기술기준 및 판단기준에 제시되고 있으나, 시기별 관련 기술기준은 동경전식방지위원회 기술기준 및 미국, 영국 등 해외기준을 적용하고 있는 것으로 조사되었다. 시

험 항목은 지전위, 대지 고유저항, 토양 산성도 등 현장 측정을 통한 사전조사와 레일대전위, 레일저항 등 현장 측정 또는 계산을 통한 운행 중 조사로 나뉘어 이루어졌다.

표 2 전식방지 대책설비 적용범위

Table 2 The application area of electrolytic corrosion protection system

구분	적용범위	비고
설비	- 전원시스템 - 궤도시스템	- 전기설비기술기준 및 판단기준 · 261조(절연), 262조(이격거리) · 263조(귀선의 시설) · 264조(귀선용 레일의 시설 등) · 243조(시설), 265조(배류접속) - KS C IEC 62128-2 부속서 A · 레일 단위길이당 컨덕턴스 측정
구간	- 본선 - 차량기지	- 전기설비기술기준 및 판단기준 · 264조 4항 - KS C IEC 62128-2 부속서 C · 터널 구조물의 두 지점사이의 종방향 전압
시기	- 설계 및 시공 (사전조사) - 운행	- 동경 전식방지대책위원회 기술기준 - KS C IEC 62128-2 · 누설전류 평가

3.1 전식방지를 위한 사전조사

전식방지를 위한 사전조사는 지전위 측정, 대지의 고유저항 측정, 토양의 산성도 측정, 선로인근 지하매설물의 관대전위 측정 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 전식방지 시험사례를 사례 1(서울 메트로 9호선)과 사례 2(용인, 김해, 대전, 송도, 서울 7호선 연장선)의 한하여 비교하였다.

가) 지전위 측정

내부저항이 높은 전압계를 이용하여 두 전극간의 누설전류를 측정한다.

표 3 지전위 측정

Table 3 The measurement of earth potential

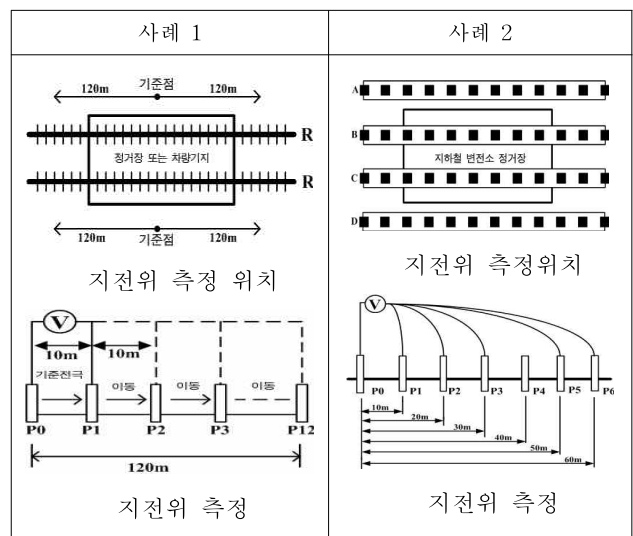


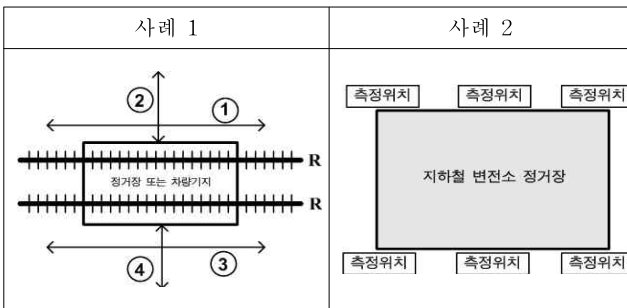
표 3에서 보듯이 측정하고자 하는 장소에 대해 사례 1의 경우 중심부위를 중심으로 장소 외측에서 10m 간격으로 120m까지 좌우를 측정하고 있는 반면, 사례 2의 경우 가장 자리를 기준으로 외측뿐만 아니라 부지 중심부를 지나면서 측정하고 있음을 알 수 있다.

나) 대지의 고유저항 측정

대지의 고유저항은 토양의 전류가 통하기 쉬운 성격의 지표로서 대지 고유저항율이 낮은 지역일수록 누설 전류가 많을 것으로 예상되므로 레일 절연 작업 시 유의하여 시공되도록 하기 위하여 측정된다. 표 4에서 보듯이 현장상황에 따라 측정방향을 달리하고 있으며 측정위치도 서로 다르게 측정되고 있음을 알 수 있다.

표 4 대지 고유저항 측정

Table 4 The measurement of earth specific resistance



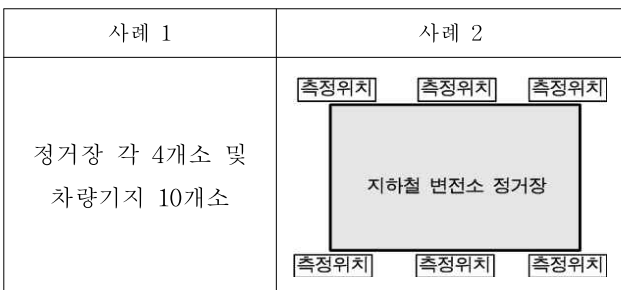
다) 토양의 산성도 측정

일반적으로 산성의 지층은 적고 대부분 pH 5~pH 8의 범위 내에 있기 때문에 직접 부식에 영향을 미치는 경우는 드물다. 그러나 전식영향이 우려되는 지역에서 일반적인 부식성을 살펴보기 위해 토양의 산성도를 측정하게 된다.

표 5에서 보듯이 사례 1의 경우 측정하고자 하는 장소에 따라 측정개소의 개수가 다르며, 사례 2의 경우 정거장의 경우 측정장소 시.종점부 4개소와 중앙부 2개소에서 측정하고 있다. 이는 측정하는 개소 위치에 대한 기준이 제시되지 않고 현장상황에 따라 이루어지고 있음을 알 수 있다.

표 5 토양 산성도 측정

Table 5 The measurement of earth acidity



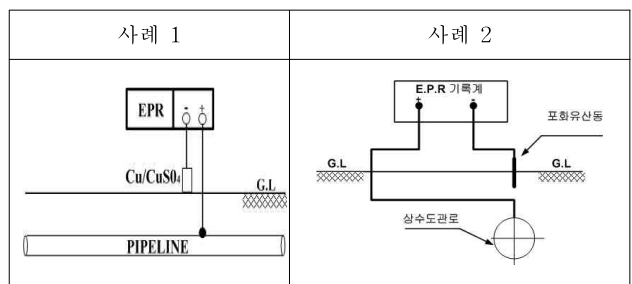
라) 지중 매설체의 관 대지전위 측정

직류 전기철도 선로부근에 매설되어 있는 금속체의 현재 상태에서 전식의 영향을 받고 있는지 여부를 확인하고자 측정이다. 이 측정을 통해 전철 운행 시 지중 매설관과 대지

간의 전위차에 의한 전식의 정도를 비교 검토할 수 있는 기본 자료로 활용된다. 매설되어 있는 배관은 입으로 굴착하여 확인할 수 없으며, 전기방식이 적용된 배관은 전위 측정을 위하여 측정함이 설치되므로 측정함에서 전위측정을 실시하여 확인하고, 전기방식이 적용되어 있지 않은 배관으로 전식 영향이 클 것으로 판단되는 배관에 대해서는 측정 가능한 밸브에서 측정한다. 사례 1의 경우 300m 이내 지점으로 선로와 금속체가 병행이 장거리인 경우에 측정하고 교차일 때 교차지점에서 300m 이내 간격으로 밸브에서 측정한다. 사례 2의 경우 측정하고자 하는 부지로부터 300m 이내 측정대상 관로의 Test Box 및 Valve를 기준으로 측정간격은 30m로 하고 있음을 확인할 수 있었다.

표 6 관 대지전위 측정

Table 6 The measurement of pipeline-earth potential



3.2 도시철도 운행 중 전식조사

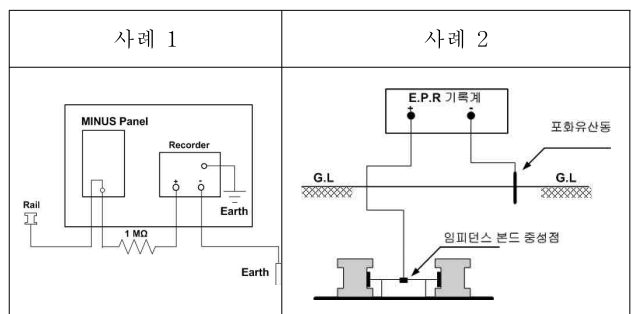
레일로부터의 누설전류를 알아내는 것이 중요하나 실제로 부하에 대한 누설전류를 직접 측정하는 것이 매우 어렵다. 따라서 레일 대지전위(Rail to Soil Potential) 측정, 레일전류 측정, 레일 누설저항 측정, 레일본드(Rail Bond) 저항 측정을 통해 누설전류를 계산한다. 이러한 측정방법은 전기설비기술기준 및 국제기준에 공통적으로 적용되고 있어 레일과 대지사이의 전위 측정을 제외하고 측정방법에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

가) 레일 대지전위 측정

레일의 대지전위를 측정하여 레일로부터 대지로 향하는 누설전류의 유출 및 유입가능성을 조사하는 것으로 측정방법 사례는 표 7과 같다. 레일전압은 전동차의 운전특성에 따라 지속적으로 변동하므로 연속측정을 통해 평균전압으로 환산하고 있다.

표 7 레일 대지전위 측정

Table 7 The measurement of rail-earth potential



그러나 표 7에서 보듯이 사례 1의 경우 레일의 한 측만을 기준으로 하고 있는 반면, 사례 2의 경우 레일사이의 임피던스 본드 중성점을 기준으로 측정하고 있음을 확인할 수 있었다.

나) 레일 전류 측정

레일에 흐르는 전류는 레일 전압을 상승시키며 상승된 전압은 레일의 누설전류를 증가시키므로 레일전류를 측정하는 것은 도시철도 전식대책을 수립하는데 중요한 요소가 된다.

측정값은 레일전류에 의해 발생하는 레일의 전압강하이므로 식 (2)을 통해 환산하여 계산된다.

$$I = \frac{U}{r \times l} [A] \tag{2}$$

여기서, I : 레일 전류[A], U : 레일 전압강하[V], r : 레일 저항, l(레일길이): 8[m]

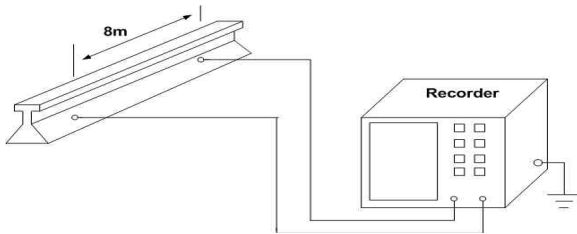


그림 5 레일 두 점 사이의 전압강하 측정
Fig. 5 The measurement of voltage drop of two point gap on rail

다) 레일 누설저항 측정

레일의 전압측정과 더불어 레일로부터의 누설전류를 조사하기 위한 목적으로 신호용 임피던스 본드(Impedance Bond)로 절연 구분되어 있는 한 개의 궤도회로에 계기를 설치하여 전압, 전류를 구하여 누설저항 $R = \Delta V / I$ 을 구한다.

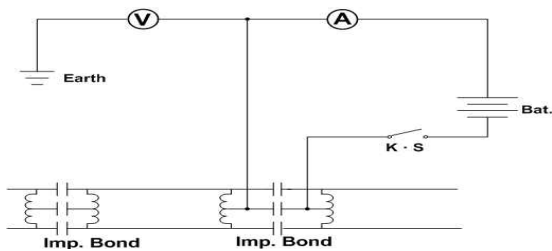


그림 6 레일 누설저항 측정
Fig. 6 The measurement of leakage resistance of rail

라) 레일 본드저항 측정

레일의 저항이 크면 동일 전류에 대해 높은 전압강하를 나타내므로 레일의 저항을 가급적 최소화할 필요가 있다. 따라서 측정하고자 하는 본드(Bond)가 포함된 레일에 직류를 인가하여 접속개소에서 발생하는 전압강하를 측정하여 본드 저항값을 구한다.

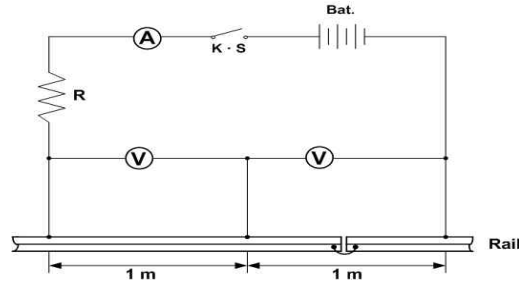


그림 7 레일 본드저항 측정
Fig. 7 The measurement of bond resistance of rail

4. 결 론

본 논문은 최근 국내 지자체를 중심으로 교통 혼잡 및 환경오염 등을 해소하기 위한 신교통수단으로 도시철도와 경량전철을 적극적으로 증설되고 있는 가운데, 직류 급전선을 통해 운행되는 국내 도시철도에서의 전식방지를 위한 시험 사례를 조사하여 비교하여 보았다. 전식측정과 관련하여 전기설비기술기준 및 판단기준이 있으나, 시험을 많이 하고 있는 사전조사인 경우 동경전식방지대책위원회 기술기준을 따르고 있는 등 아직까지 국내법규가 제대로 갖추어져 있지 않음을 확인할 수 있었고, 기술기준에 준하여 측정을 하더라도 현장상황에 따라 달라지고 있음을 확인하였다. 이는 도시철도를 운영하는 기관을 비롯하여 가스 및 상수도, 송유관을 운영하는 기관들이 자의적 해석을 통해 측정방법이 이루어지고 있었다. 따라서 향후 도시철도 표준화단계를 통해 이러한 문제점을 도출하고 현장상황을 고려한 측정방법 및 시험절차서의 표준(안)을 제시할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 하연호, “전식방지 조사, 설계”, 사조기술단, 2008.11
- [2] 이현구 외 3인, “도시철도 전식방지를 위한 기술기준에 관한 연구”, 도시철도표준화2단계 연구개발사업, 2009.4
- [3] 이현구, “지하철 누설전류 실태조사”, 한국조명.전기설비학회, 제22권 제2호, pp.3-14, 2008.4
- [4] 한국철도기술연구원, “국내 도시철도 접지 및 전식방지 시스템 분석연구”, 도시철도표준화2단계 연구개발사업, 2008.7
- [5] 김양수, “전기설비기술기준 및 판단기준의 전기부식관련 근거조사보고서”, 2007.12
- [6] 대전광역시 지하철건설본부, “대전도시철도1호선 1단계 전식방지 사전조사 보고서”, 2000.7
- [7] Szeliga, M.J., “Stray Current Corrosion - The Past, Present, and Future of Rail Transit Systems”, NACE

International, 1994.

- [8] Case S., "DC Traction Stray Current Control", IEE, Savoy Place, London WC2R 0BL, UK, 1999.
- [9] Uhlig, H.H., "Corrosion Handbook", John Wiley & Sons, Inc., 1948.
- [10] Dale Lindemuth, "Stray current corrosion control for DC rail transit systems, corrpro, 2008.

저 자 소 개



김재문(金才文)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학박사). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토해양부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국철도대 철도차량전기과 조교수
 Tel : 031-460-4612
 Fax : 031-461-2944
 E-mail : goldmoon@krc.ac.kr



정호성(鄭濤聖)

1971년 10월 4일생. 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2002년 ~ 현재 한국철도기술연구원 전철전력연구실 선임연구원
 Tel: 031-460-5116
 Fax : 031-460-5459
 E-mail : hsjung@krri.re.kr



김양수(金陽洙)

2004년 고려대 대학원(공학박사). 1971년 1월~2002년 3월 철도청 근무, 1999년 11월 전기철도 기술사, 2008년 1월~ 현재 국토해양부 철도건설 심의위원, 2008년 1월~ 현재 항공철도사고조사 위원회 철도분야 자문위원, 2002년 3월~ 현재 한국철도대학 철도차량전기과 부교수
 Tel : 031-460-4442
 E-mail : kysrail@dreamwiz.com