

직류전기철도의 누설전류 간섭대책(1)
국내 현황

하윤철, 배정호, 하태현, 이현구, 김대경
한국전기연구원

Mitigation of Stray Current Interference from DC Electric Railroad(1)
Domestic Conditions

Yoon-Cheol Ha, Jeong-Hyo Bae, Tae-Hyun Ha, Hyun-Goo Lee, Dae-Kyeong Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

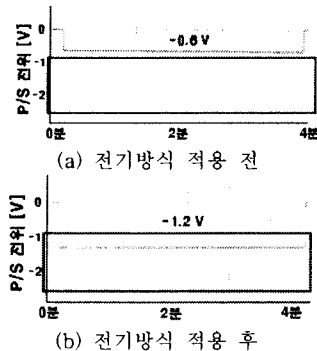
Abstract - With the wide spread of direct current (DC) electric railroads in Korea, the stray currents from negative return rails become a pending problem to the safety of nearby underground infrastructures, such as gas pipelines, water distribution lines, heat pipelines, POF cables, etc. The mitigation of such interference, however, is mainly dependent on stray current drainage bond methods, which connect the underground metallic structures to the negative feeder cables attached to the rails with diodes (polarized drainage) or thyristors (forced drainage). Despite some merits of these methods, they increase the total amount of stray currents from rails and cause other interference problems. In this paper, we summarize the domestic conditions of stray current interference and describe a conceptual design of other mitigation methods for such interference.

2.1.1 전기방식

지중 금속시설물의 대부분은 철을 기반으로 하고 있으며, 자연상태에서 철은 원소상태가 아닌 산화물상태가 더 안정적이므로 도양이나 물과 같은 전해질과 만나면 부식이 발생한다. 이러한 부식을 억제하고 시설물의 수명을 연장하기 위해 일반적으로 도장(coating)과 전기방식(cathodic protection)을 동시에 적용해 오고 있다. 전기방식은 시설물 외부로부터 전해질을 통해 금속표면으로 전류가 들어가게 해줌으로써 철이 산화되려는 성질을 억제한다. 이러한 전류는 철의 전위(potential)를 낮추어 주는데 이러한 전위를 측정하여 부식 여부를 판단할 수 있다. 국내에서는 가스배관의 경우 미국부식학회(NACE, National Association of Corrosion Engineers)의 기준을 채택하여[4] 간섭이 없는 경우의 방식기준으로 황산동기 준전극 대비 $-0.85\text{ V} \sim -2.5\text{ V}$ 의 전위값을 유지하도록 법으로 규정하고 있다. 그림 1의 (a)와 (b)는 가스배관에 대해 전기방식을 적용하기 전과 후의 P/S(pipe-to-soil) 전위변화를 측정할 예이다.

1. 서 론

직류 전기철도가 국내에 광범위하게 보급되면서 급전전류의 귀선으로 사용되는 레일에서 발생하는 누설전류에 의한 간섭(interference)문제가 심각한 현안이 되고 있으나, 누설전류가 지중 기간시설물에 미치는 전식(electrolytic corrosion)을 줄이는 방안으로는 지중 금속 시설물 측면에서의 대책으로서 과거에 주로 사용되던 배류법(drainage method) 특히 강제배류법에 크게 의존하고 있다[1-3]. 배류법은 지중 시설물에 유입된 누설전류를 도선을 통해 레일 또는 부극선으로 귀환시키는 방법으로 여러 가지 장점에도 불구하고 대지를 통해 흐르는 누설전류의 총량을 증가시켜 또 다른 간섭문제(타 시설물로의 배류전류 유출입, 레일의 전식 등)를 초래하는 문제가 있어[1], 선진국에서는 부득이한 경우가 아니면 사용하지 않는 방법이다.



[그림 1] 전기방식과 배관의 전위

한편 전기철도 측에서도 초기의 자갈도상 궤도구조 대신 콘크리트도상 궤도구조를 채택하면서 선진국의 전식대책을 일부 적용하고 있으나, 건설비용 측면에서 간과되는 부분도 적지 않으며 운영상에서도 전식대책으로 설치된 시설은 제대로 활용되지 못한 채 피간섭 시설물용 배류기만 설치하는 경우가 많은 실정이다.

본 논문에서는 국내 전기철도 누설전류에 의한 전기적 간섭 문제의 실태를 되짚어보고, 외국에서도 사례를 찾아보기 힘든 이러한 과도한 누설전류가 발생하는 원인을 국내 직류 전기철도 시설에서 찾아본다. 이를 통해 새로운 피간섭시설물측의 대책과 전기철도측의 대책을 모색해 본다.

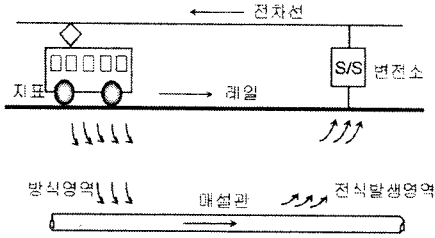
2. 본 론

2.1 누설전류 간섭과 배류법

2.1.2 전기방식에 미치는 누설전류의 영향

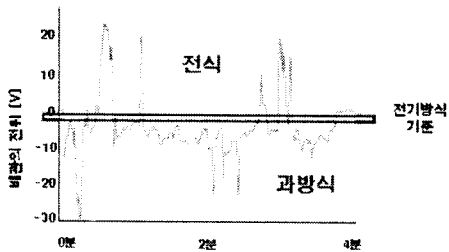
국내의 대표적인 직류 전기철도인 도시철도는 가공전차선과 레일 사이에 1,500V의 직류전압을 인가하며 정상운행시 수 kA의 직류전류가 레일을 통해 귀환하는 시스템이다. 이 때 그림 2와 같이 부극선으로 사용되는 레일의 종방향 전기저항과 레일-대지간의 절연저항의 합수로서 레일로부터 대지로 누설전류가 발생하며, 이러한 누설전류는 인근의 지중 금속매체에 유입되어 흐르다가 변전소 인근 레일로 귀환하게 된다. 이때 전류가 유출되는 지점에서는 집중적으로 부식이 발생하게 되며 이러한 부식을 전식(electrolytic corrosion) 또는 표유전류부식(stray current corrosion)이라 한다. 전식이 발생하는 위치와 크기는 전차의 위치, 부하전류의 크기, 회생제동 등에 따라 동적으로 변하며 금속체의 전위도 전류가 유입되면 낮아지고 유출되면 높아져 누설전류에 크기와 방향

을 유추하는데 활용된다.



[그림 2] 직류 전기철도에 의한 전식

그림 3은 도시철도 차량기지 인근에서 측정된 가스배관의 P/S 전위 변화를 나타낸다. 전차의 위치와 상태에 따라 배관의 한 지점에서 전위가 유입되기도 하고 유출되기도 하는 전형적인 누설전류 간섭을 보이고 있다. 다만 그림의 데이터는 누설전류의 크기와 현지의 토양비저항에 따른 IR 강하 성분이 크게 포함되어 있는데, 이를 보상하기 위한 IR-free 기준전극[5]에서도 $-7V \sim +3V$ 로 측정되어 외국에서는 찾아볼 수 없는 심각한 수준의 간섭양상을 보이고 있다. 국내의 대부분의 도시철도에서 차량기지 인근의 누설전류 간섭이 본선에 비해 현저히 크게 발생하고 있는데, 이는 국내 도시철도 급전 시스템이 누설전류에 대한 시스템적인 문제를 갖고 있음을 보여준다.



[그림 3] 배관 P/S 전위에 미치는 누설전류의 영향

2.2 국내 전기철도 시스템의 문제점

1981년, 서울 지하철 2호선의 개통 이래 지중 금속시설물에 미치는 누설전류의 간섭문제는 지속적으로 심화되고 있지만 아직도 전기철도측에서의 근원적인 해결책을 마련되지 못하고 피간섭시설물에 배류기 설치를 허용하는 수준에 머물고 있다. 이는 국내 전기철도 급전시스템에 대한 연구와 기술도입이 전차선 급전까지만 고려되고 있고, 귀선인 레일의 누설전류 저감대책을 포함한 급전시스템에 대한 연구가 부족하기 때문이다. 심지어 국제전기기술위원회(IEC)의 국제표준[6]에도 맞지 않는 국내의 급전시스템 설계가 누설전류 문제를 더욱 심각하게 만들고 있다.

2.2.1 본선 레일의 전식방지 설계

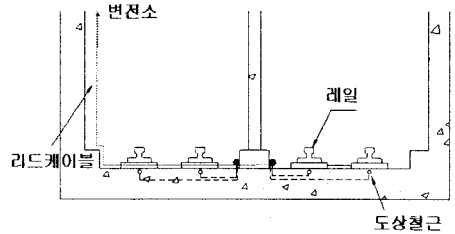
자갈도상으로 건설된 초기의 직류 전기철도(서울의 1·4호선 및 부산의 1호선)를 거쳐 국내에도 콘크리트도상의 궤도구조가 일반화되면서 선진국의 전식방지 대책이 보급되어 본선 레일 측면에서는 많은 변화를 보이고 있다. 요약하면 다음과 같다.

- 1) 레일의 종방향 전기저항을 감소시키는 방안
 - 레일본드를 이용한 레일의 전기적 완전접속
 - 레일의 단면적 증가(50kg/m → 60kg/m)
 - 장대레일의 사용으로 레일본드 개소 감소
 - Cross Bond 설치

2) 레일-대지간 절연저항을 증가시키는 방안

- 레일과 침목의 체결부에 절연패드 사용
- 레일과 코일스프링 클립 사이에 절연블록 사용
- 구조물 방수 및 도상 배수 철저
- 강체전차선의 이중절연

이 외에도 현재 국내 콘크리트 도상에 설치되는 되어 있으나 운용되지 않는 전식방지용 설비가 존재한다. 즉, 그림 4와 같이 도상 내부에 레일과 병행하는 전식방지용 철근이 설치되어 있으며 각 변전소 위치에서 도상 밖으로 인출하여 변전소 컨버터 인근까지 리드케이블이 연결되어 있어 실제 누설전류에 의한 간섭이 외부 시설물에 나타날 경우, 외부시설물에 대한 배류기 설치 이전에 이 도상철근에 배류기를 설치하여 누설전류를 포집하도록 설계되어 있으나 국내 직류 전기철도측에서 시행된 적은 없는 것으로 보인다. 따라서 도상철근을 이용한 배류시스템의 적용을 통해 누설전류의 외부 영향을 어느 정도 저감시킬 수 있는지에 대한 실증이 먼저 진행되어야 할 것이다.



[그림 4] 전식방지용 도상철근 설치도

본선 레일에 대한 전기철도측의 위와 같은 노력에도 불구하고 인근 지중시설물에의 누설전류 간섭이 해소되지 못하고 있고, 관례적으로 배류기의 설치를 허용하고 있어 시간이 흐르면 배류법에 의해 레일-대지간 절연 파괴가 가속되어 누설전류 문제의 악순환고리가 만들어질 수 있으므로 새로운 대책마련이 시급하다.

2.2.2 차량기지 및 검수고

앞에서 언급한 바와 같이 국내 대부분의 차량기지 인근에서 지중시설물의 전위 변화가 심하게 측정되고 있는데, 이는 본선 레일에 비해 차량기지 및 검수고에서의 누설전류가 크기 때문임은 자명하다. 우선 차량기지 내 레일은 자갈도상 위에 설치되어 있으며, 앞 절의 전식방지 설계가 적용되지 않는다. 특히, 검수고의 경우 작업자의 안전을 위해 접지시스템을 설계되어 있어 누설전류의 유출입이 크게 발생할 수 있다. 이러한 문제 때문에 IEC의 표준[6]에서뿐만 아니라 일본의 동경전식방지대책위원회[7]에서도 본선, 차량기지 및 검수고는 레일을 분리하여 독립적인 급전시스템을 운용하도록 하고 있다. 그러나 국내의 경우 대부분 차량기지 및 검수고, 본선을 하나의 컨버터로 급전하고 있어 본선에서 발생하는 누설전류가 차량기지나 검수고의 레일을 통해 유출입하게 되어 누설전류의 간섭이 차량기지 인근에서 크게 나타나는 것으로 판단된다. 비록 아직 국내에는 간섭에 대한 표준이 정해지지 않았지만 설계 단계에서부터 이러한 누설전류 간섭의 문제를 고려하여 급전시스템을 설계하는 것이 필요하다.

2.2.3 회생제동

국내 직류 전기철도에 회생제동방식이 적용되면서 간섭의 문제는 한층 복잡한 양상을 띠고 있다. 회생제동시에는 각 전차가 발전을 하고 전차선에 급전을 하게 되므로 정상급전시와는 반대방향으로 누설전류가 발생한다. 즉, 정상급전시의 레일에서는 전차 위치에서 변전소방향

으로 전류가 흐르나 회생제동시에는 변전소에서 전차방향 또는 인근 타 전차에서 회생제동 중인 전차방향으로 전류가 흐르게 되므로 현재의 배류법 뿐만 아니라 도상철근을 이용한 배류법 또한 회생제동시의 누설전류를 배류시키지 못한다. 다행히 회생제동시 발생하는 전류가 정상급전시보다 크게 작으므로 레일의 종방향 전기저항을 감소시키고 레일-대지간 절연을 증가시키는 방법으로 어느 정도 해결할 수 있다. 새로운 대책을 모색함에 있어 회생제동시의 문제도 함께 고려해야 할 것이다.

2.3 새로운 전식대책의 모색

앞에서 누설전류의 측면에서 국내 직류 전기철도 시스템의 문제점을 살펴보았다. 아울러 전기철도측에서 누설전류를 저감시킬 수 있는 해법도 어느 정도 제시되었다. 본선 레일에서의 누설전류는 콘크리트도상 궤도구조의 경우 전식방지용 도상철근을 이용한 배류시스템을 우선 적용해볼 수 있다. 이 배류시스템이 효과가 있으면 본선에 설치되어 있는 강제배류기를 철거할 수 있으며, 강제배류기에 의한 레일 전식과 절연과피의 문제도 해소할 수 있을 것이다. 자갈도상의 경우 이러한 방법이 적용되지 않는데, IEC 표준 나와 있는 레일저항 및 누설저항 측정법과 기준을 활용하여[6] 누설이 심한 구간에 보조귀선을 설치하는 것도 하나의 방법이 될 것이다. 보조귀선은 회생제동시 누설전류가 크게 발생하는 구간에 대해서도 효과적인 대책이 된다.

차량기지 및 검수고 인근에서 누설전류가 집중적으로 유출입하는 문제는 궁극적으로는 급전시스템을 변경함으로써 해결할 수 있다. 그러나 이 방법은 막대한 비용과 시간을 필요로 하므로 현재의 시스템 하에서 누설전류를 포집할 수 있는 배류시스템을 설치하여 외부로의 유출을 어느 정도 저감할 수 있는지 실증해 볼 필요가 있다. 즉 피간섭시설물과 차량기지 사이에 시설물과 병행하는 접지체(철근, 나동선 또는 접지봉)를 포설하고 배류기를 통해 변전소 부근선에 접속함으로써 누설전류가 외부시설물에 미치는 영향을 차단할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 이러한 배류시스템도 회생제동시의 누설전류를 차단하는 데에는 효과가 크지 않을 것으로 보인다.

이러한 전기철도측의 배류시스템으로 모든 누설전류를 막을 수는 없겠지만 기존의 피간섭시설물용 배류시스템, 특히 강제배류기는 어느 정도 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 회생제동시의 누설전류는 이 두 시스템 모두 배류시키지 못하므로 기본적인 대책인 레일 종방향 전기저항 감소와 레일-대지간 절연저항 증가, 보조귀선의 설치 등으로 대책을 마련해야 한다. 아울러 피간섭시설물 측에서도 현재의 강제배류법을 대신할 수 있는 새로운 방법을 모색해야 할 것이다. 도심지 환경에서 회생양극법 재시공이 사실상 불가능한 상황이므로, 타 시설물과의 간섭을 최소화할 수 있는 외부전원식 전기방식 방안과 직류철도로부터 유입된 누설전류를 시설물과 레일의 전기적 접속 없이 배류할 수 있는 방안을 접목시킨 분포외부전원시스템을 고려해볼 수 있다. 전기철도측 배류시스템과 분포외부전원시스템에 대한 상세한 기술은 후속 논문을 통해 제시할 것이다.

3. 결 론

지금까지 국내 직류 전기철도에 의한 누설전류 간섭문제 현황을 살펴보았다. 이미 누설전류의 간섭 문제는 심각한 상황에 이르렀음에도 불구하고 그동안 전기철도 측면에서의 관심과 연구가 극히 미비한 상태였으나 현장 조사를 통해 현재까지 얻은 전기철도 시스템의 설계와 운용상의 문제점들을 토대로 새로운 대책 모색을 위한 발판이 마련되길 기대해 본다. 선진국의 경우 누설전류에 의한 전식 문제의 해결을 위해 지자체를 중심으로 관련 기관들이 협력하여 표준안을 개발하고 설계 단계에서부터 이를 적용하여 전식문제를 해결해 가고 있다. 국내

에서도 전기철도 관계자와 피간섭 시설물 관계자들이 보다 많은 관심과 참여로 누설전류 간섭현황에 대한 인식의 확대를 통해 최적의 표준안을 수립에 기여할 수 있기를 기대해 본다.

[참 고 문 헌]

- [1] 하운철,배정효,하태현,이현구,김대경, "지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태조사", 2003 대한전기학회 전력기술부회 추계학술대회 논문집, 373 375, 2003
- [2] 하운철,배정효,하태현,김대경,이현구, "지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태분석(I) 서울지역", 2004 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, 1364 1366, 2004
- [3] 하운철,배정효,하태현,김대경,이현구, "지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태분석(II) 부산지역", 2004 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, 1367 1369, 2004
- [4] NACE Standard RP0169 2002, "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems", NACE, 2002.
- [5] 하태현,배정효,이현구,김대경,하운철, "IR Free 전극을 이용한 전위측정에 관한 연구", 2003 대한전기학회 하계학술대회 논문집, D권, 2735 2737, 2003.
- [6] IEC International Standard 62128 2, "Railway Applications - Fixed Installations Part 2: Protective Provisions against the Effects of Stray Currents caused by D.C. Traction Systems", IEC, 2003.
- [7] 東京電蝕防止對策委員會, "新版 電蝕防止對策の手びき", 東京電蝕防止對策委員會事務局, 2005