

직류전기철도의 누설전류 방지대책에 대한 고찰(1) 유럽과 호주

하윤철, 배정효, 하태현, 이현구, 김대경
한국전기연구원

**A review on the stray current countermeasures of DC electric railways(1)
Europe and Australia**

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

Abstract - The wide spread of DC electric railway systems such as urban rapid transits including heavy rail and light rail transits has significant ramification as the stray currents from return conductor rails can cause the electrochemical interference, that is, the electrolytic corrosion of both rails and outside underground metallic infrastructures. The immature understanding of either the railway authority who is responsible for establishing the necessary provisions at the design stage or the affected parties makes it difficult to prepare the optimum range of solutions for the long-pending interference problem. In advanced countries, however, numerous assessment studies have been carried out on the stray current interference, by which protective standards and regulations are provided under the collaboration and agreement of the related parties. In this paper, we introduce a european standard from IEC, namely, "IEC 62128-2:2003 railway applications - fixed installations - part 2: protective provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems" and a "Code of Practice" produced by Victorian electrolysis committee (VEC) based on "Electricity Safety Act 1998" and "Electricity safety (stray current corrosion) regulations 1999" of Victoria state, Australia.

1. 서 론

국내의 대도시를 중심으로 한 중량전철의 도시철도 및 중소도시를 중심으로한 경량전철 등 직류전기철도의 보급이 확산됨에 따라 급전계통의 부극선으로 사용되는 레일로부터의 누설전류에 의한 금속시설물의 전기화학적 간섭, 즉 전식(電蝕)의 문제가 현안이 되고 있다. 이러한 전식은 비단 지중 금속배관 등 피간섭시설물 뿐만 아니라 레일 자체에도 심각하게 발생할 수 있으나 전식문제에 대한 관련 기관의 인식이 아직 성숙되지 않은 가운데, 직류전철의 설계 단계에서부터 도입되어야 할 누설전류 방지대책들이 간과되는 사례가 많아 누설전류 저감을 위한 사후 대책 마련을 더욱 어렵게 만들고 있다.

누설전류의 피해를 최소화하기 위한 국내 관련기관의 노력을 보면 우선 피간섭시설물측 대책으로는 유입된 누설전류를 전선을 통해 레일 또는 컨버터 부극단자로 귀환시키는 강제배류법 및 선택배류법이 광범위하게 사용되고 있으며, 누설전류의 원천이 되는 직류전기철도측에서도 자갈도상 레도에서 소위 콘크리트 도상레도로 변전되는 과정에서 여러 가지 누설전류 저감설계가 적용되고 있다. 현재 국내에 적용되고 있는 누설전류 저감설계로는 크게 레일의 종방향 전기저항을 감소시키는 방안(누설전류의 최소화를 위한 변전소 간격 조정, 레일본드를 이용한 레일의 전기적 접속강화, 레일 단면적 증가, 장대레일의 사용으로 레일본드 개소 감소, 크로스본드 설치 등)과 전차선과 대지 또는 레일과 대지간 절연저항을 증가시키는 방안(레일과 침목 체결부에 절연패드 사용, 레일과 직류전기철도 클립 사이에 절연블록 사용, 구조물 방수 및 도상 배수, 강재전차선의 이중절연) 및 누설전류의 귀환 경로를 자체적으로 만들어 주는 방안(콘크리트 도상의 전식방지용 도상 철근) 등이 있다.

그러나, 이러한 노력에도 불구하고 현재 국내 대부분의 차량기지 및 일부 본선 구간에서 누설전류에 의한 간섭이 크게 나타나고 있으며, 이러한 문제를 체계적으로 해소하기 위한 공동의 노력은 사실상 배류기의 설치 협의 정도로만 국한되어 있을 뿐 근본적인 대책 마련을 위한 제도적 장치가 전무한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 직류전기철도 누설전류 방지대책에 관한 유럽의 표준 가운데 IEC 62128-2 [1]와 호주 빅토리아 주정부의 Electricity safety act 1998 [2] 및 Electricity safety (stray current corrosion) regulation [3]을 기반으로 한 빅토리아 전식위원회(VEC)의 Code of Practice [4] 등의 표준과 규정을 살펴봄으로써 국내 직류전기철도 당국 및 유관기관이 추진해야 할 제도적 개선방향을 모색해 본다.

2. 본 론

2.1 IEC 표준

전식대책과 관련된 IEC(International Electrotechnical Commission)의 표준 IEC 62128은 전기철도 장치에 관한 IEC 기술위원회(IEC technical committee 9)에 의해 제정되었으며 part 1인 62128-1은 전기 안전과 접지에 관한 방지대책을, 62128-2는 직류전기철도시스템에 의한 누설전류 간섭

에 관한 방지대책을 규정하고 있다. IEC 62128-2는 철도선로를 비롯하여 트램, 고가철도, 지하철, 산악철도, 트롤리버스, 자기부상철도 등과 같은 안내방식(guided) 대중운송시스템, 그리고 화물운송시스템에 적용된다.

2.1.1 일반사항

직류전기철도 시스템의 누설전류는 철도자체와 외부 시설물에 악영향을 끼칠 수 있으며, 문제의 심각성을 결정하기 위해서는 피간섭시설물측과 공동으로 이를 평가하기 위한 연구가 수반되어야 한다. 이러한 활동의 결과는 설계단계에서부터 최적의 대책을 수립하기 위한 기간이 되며, 누설전류의 영향을 제어하기 위한 각종 수단은 본 표준에 따라 확인과 검증을 받아야 할 것을 명시하고 있다.

누설전류의 주요 영향으로는

- 누설전류 유출지점에서의 금속시설물의 부식과 이에 따른 손상
- 과열, 아킹, 화재의 위험과 이에 의한 내·외부의 장치와 인명 피해
- 비보호된 신호 및 통신시스템에의 영향
- 제3의 전기방식 설비에의 영향
- 제3의 교류 및 직류 전원시스템에의 영향 등이 있으며 이러한 누설전류의 원천이 되는 직류전기철도 시스템으로는
- 귀선전류가 주행레일을 통해 흐르는 직류전기철도시스템 및 직류전기철도 시스템의 궤도와 본딩되어 있는 다른 철도시스템의 궤도 부분
- 귀선전류가 주행레일을 통해 흐르는 직류전기철도시스템과 전원을 공유하는 직류 트롤리버스시스템
- 귀선전류가 주행레일을 통해 흐르지 않는 직류전기철도 시스템 등을 모두 고려하여야 한다. 또한 주요 피간섭시설물로는
- 금속배관
- 금속피복 및 금속설드가 있는 케이블
- 탱크 및 용기
- 접지시스템
- 금속이 포함된 콘크리트구조물
- 매설금속구조물
- 제3의 전기방식설비
- 신호 및 통신시스템 등이 있다.

2.1.2 급전시스템

급전시스템, 귀선회로 및 접지시스템은 하나의 연구를 통해 분석되어야 하며 누설전류의 영향을 평가하기 위해서 다음과 같은 측면을 포함해야 한다.

- 변전소간 거리
: 필요시 변전소간 거리를 고려하여 개별 변전소의 출력전압을 누설전류가 최소화할 수 있도록 조정하여야 한다.
- 변전소와 레일간의 상대적인 배치
: 트롤리버스나 트램이 같은 변전소에서 급전될 시에는 트롤리 접속선 중 하나는 궤도귀선시스템의 한 지점 또는 다지점에 접속하여야 한다.
- 귀선회로 접속
: 변전소의 부극케이블 버스 및 이와 유사한 시설은 접지로부터 절연되어야 하며, 안전상 필요시 부극케이블 버스바와 접지 사이에 자동 전압제한 회로를 설치한다.
- 레일 및 구조물의 대지로부터의 절연
: 절연피복된 부극케이블을 사용하며, 귀선도체와 귀선레일은 대지로부터 절연하여야 한다.

2.1.3 궤도시스템

직류전기철도시스템의 누설전류를 최소화하기 위한 가장 효과적인 방안은 귀선전류를 의도된 금속귀선회로 내로만 흐르도록 제한하는 것이다. 이것은 제4레일과 같이 귀선전류에 대한 전용 도체를 제공하거나, 귀선회로로 주행레일이 사용되는 경우라면 주행레일과 귀선회로의 대지절연을 매우 크게 유지해야 한다. 귀선회로의 종방향 저항을 낮추어 주면 추가적인 항상을 기대할 수 있다. 만약 기존의 대지전류 분포에 문제가 되는 경우에는 주행레일의 대지절연을 강화함으로써 기존 대지전류 분포의 교란을 막을 수 있다.

심각한 누설전류의 영향이 예상되는 지역에서는 정상 운전시 단위길이당 컨덕턴스가 <표 1>의 값 이하로 유지될 수 있도록 건설시에 컨덕턴스가 충분히 낮게 시공하여야 한다. <표 1>의 수치는 궤도당 두 개의 주행레일

에 대한 값이다.

<표 1> 단위궤도 구간에 대한 권장 단위길이당 컨덕턴스 G'

Traction system	Open air S/km	Tunnel S/km
Railway	0.5	0.5
Mass transportation system in open formation	0.5	0.1
Mass transportation system in closed formation	2.5	-

개방구조 및 폐구조의 철도와 대중운송시스템에 대해 위의 수치를 만족시키기 위해서는 적절한 자갈, 절연 체결시스템이 갖춰진 나무침목 및 콘크리트침목, 주행레일과 자갈사이의 충분한 공간, 효과적인 배수 등이 갖추어져야 한다. 폐구조 시스템에 대해 보다 낮은 컨덕턴스 값을 얻기 위해서는 절연수지베드 속에 주행 레일을 심거나 궤도와 지지구조물 사이에 절연층을 삽입하는 것이 일례이다. IEC 62128-2에서는 이러한 컨덕턴스의 측정방법을 부록 A에 제시하고 있다.

귀선시스템의 종방향 전기저항을 낮추기 위해서는 레일 사이에 저저항 레일조인트본드를 접합 또는 접속하여 전체 종방향 저항이 5%이상 증가하지 않도록 해야한다. 또한 단면적이 큰 주행레일의 사용, 주행궤도 및 궤도간 크로스본드, 궤도와 평행한 추가 케이블 접속 등도 종방향 저항을 줄일 수 있다.

귀선시스템의 어떠한 부분도 대지와 절연되지 않은 설비나 부속 또는 구조물과 접속되어서는 안된다. 만약 전기쇼크를 방지하기 위해 귀선회로와의 접속이 불가피하다면 접속된 장치나 구조를 대지와 절연함으로써 누설전류 효과를 최소화할 수 있다.

직류전기철도시스템이 매설배관 또는 케이블과 인접할 경우 누설전류를 피하기 위해 최대한 이격시켜야 하며, 주행레일과 최소 1 미터 이상의 거리를 유지해야 한다.

2.1.4 피간섭시설물

일반적으로 대지와 절연되지 않은 전도성 구조물과 궤도귀선시스템 사이의 저항은 커야하며, 차량기지와 정비장을 제외하고는 직접적으로 접촉해서는 안된다.

전도체가 있는 터널에서는 누설전류의 영향을 억제하는 수단이 필요할 경우가 있다. 이러한 수단은 누설전류의 원천이 터널 내부인지 외부인지 또한 보호하고자 하는 것이 터널의 금속구조물인지 터널외부의 금속구조물인지나 철로인지에 따라 결정된다. 철근 구조물에 대한 누설전류의 간섭이 간섭 기준을 넘어서는 터널 말단에서는 각 주행레일에 절연 레일조인트를 설치하여야 한다. 이 때 독립된 터널 급전 전원이 필요하며 터널의 가공전차선은 터널외부의 전차선과 전기적으로 분리되어야 한다.

철근콘크리트 구조물이나 다른 전도체로 된 터널의 경우 누설전류가 이러한 구조물로 흘러들어와서 터널 외부의 다른 전도성 구조물에 영향을 끼칠 수 있다. 이럴 경우 각 터널 구간에 등전위 본딩을 설치하여 누설전류의 영향을 감소시켜야 한다. 이를 위해서 충분히 수많은 철근 바 및 이와 서로 연결된 철주, 다른 전도성 구조물 부분 및 필요시 충분한 단면적으로 갖는 추가적인 전도체를 설치하여 사용하여야 한다. 누설전류 측면에서는 일반적인 강선 감기로 철근 바의 전기전도성을 충분히 얻을 수 있다.

누설전류의 직접 측정이 현실적으로 불가능할 경우 구조물의 대지 전위로 간섭을 평가한다. 경험적으로 교통이 가장 많은 시간대의 전위변화의 평균이 +100[mV]보다 작을 경우 간섭을 무시할 수 있다. 터널구조물 및 터널 외부의 구조물에서 허용할 수 없는 누설전류 영향을 피하기 위해서는 터널 구조물의 임의의 두 점 사이의 종방향 전압을 계산해야하는데 다소 보수적인 계산법이 부록 C에 제시되어 있다.

터널 외부의 구조물에 대한 누설전류 영향이 무시할 만하고 레일-대지간 저항을 충분히 높일 수 없는 지역(습도나 깨끗하지 않은 자갈로 인한)에서는 터널의 금속구조물의 부식이 주요 현안이 된다. 다른 인접 전기철도시스템으로부터의 누설전류가 터널구조물로 흘러들어와 서로 다른 먼 도시 지역 사이에 바람직하지 않은 전기적 연결을 형성하는 경우 철근콘크리트 터널 구조물에 절연조인트를 설치하여 종방향 구간들로 나누어야 한다. 만약 일반터널과 같이 이러한 구조물과 대지간 저항이 상대적으로 높은 경우에도 철근콘크리트 터널 구조물을 절연조인트로 종방향 구간들로 나누어야 한다. 이 때 각 구간 사이의 링 조인트에는 시험 목적을 위한 단자대를 설치하고 이러한 단자들과 종방향 철근바들 사이에 전기적인 연결을 확실히 하여야 한다.

철근콘크리트 터널의 철근이나 철제 터널 부분은 외부의 배관 및 케이블 또는 귀선 회로, 여타 대지절연이 안된 인접시스템과 전기적 연결이 없어야 한다.

차량기지와 정비장의 경우 전도성 구조물과 귀선 회로를 직접 접촉해야 하는데 이 때 차량기지나 정비장의 주행레일은 본선과 절연레일조인트로 분리해야하며 급전 전력 또한 개별적인 정류기나 다른 수단으로 공급되어야 한다.

2.1.5 피간섭 금속구조물의 전식대책

IEC 62128-2의 부록 B에서는 선택배류법, 강제배류법, 외부전원식 전기방식법을 전식대책으로 제시하고 있다.

2.2 VEC - Code of Practice

호주의 경우 일찍이 AS(Australia Standard Code)를 기본으로 각 주에서는 이를 근간으로 Electricity Safety Act를 제정하여 모든 전기설비의 설치와 관리 및 사고 대책에 관한 체계적인 제도를 확립하였고, 이러한 규정에 의거 전기방식과 전식대책에 대한 Electricity Safety Regulation을 제정하고 전기방식 기술자 및 시설물 소유자들이 중심이 된 전식위원회(Electrolysis Committee)를 설립, 운영하고 있다. 한 예로 Victoria 주에서는 Electricity Safety (Stray Current Corrosion) Regulation 1999에 따라 전기방식 및 전식대책 시스템에 대한 운용표준과 절차를 명시하고 있으며 Victorian Electrolysis Committee (VEC)에서 기술적인 실무를 관장하고 있다.

VEC는 OECI(office of the chief electrical inspector), 철도, 수도, 가스, 통신 및 석유 산업분야를 대표하는 7인으로 구성되며, 전기방식과 전식 완화를 위한 표준의 수립, OECI의 요청시 관련 제반 문제에 대한 조언과 전식대책에 대한 새로운 기술의 개발 지원의 기능을 하고 있다.

VEC가 2004년 작성한 Code of Practice는 VEC의 설립배경과 조직, 활동, 표준과 기준 등에 대해 명시하고 있는데, 특히 주목할 만한 부분은 Cost Sharing Agreement로 다음과 같은 기준을 근거로 산출하고 있다.

- 철도운영자는 누설전류의 주요 원인제공자이므로 더 큰 비용을 부담
- 배전사업자는 이들의 다중접지 중성선 시스템이 누설전류를 전 도시지역으로 확산시키므로 더 큰 비용을 부담.
- 통신, 수도, 가스 및 석유 산업분야는 누설전류의 피해자이므로 더 적은 비용을 부담.

이를 기초로 VEC에서는 전식대책 설비의 운용비용에 대한 부담을 <표 2>와 같이 제시하고 있다.

<표 2> VEC 전식대책 비용 분담

Industry	Company	Portion
Traction Industry (36.4%)	Connex Trains	21.8%
	Yarra Trams	14.6%
Electricity Industry (24.5%)	Alinta Networks	6.4%
	TXU	2.6%
	Citipower	6.4%
	AGL Electricity	8.0%
	Powercor	1.1%
Water Industry (10.3%)	Yarra Valley Water	2.9%
	Clso West Water	1.1%
	South East Water	2.2%
	Melbourne Water	4.1%
Gas Industry (10.3%)	Multinet Gas	3.6%
	Victorian Gas Distribution	2.6%
	TXU	2.6%
Telecommunications Industry	GasNet Australia	1.5%
	Telstra	10.3%
Oil Industry(AIP) (8.2%)	BP	0.7%
	Eso	0.5%
	Caltex	0.2%
	Shell	3.5%
	Mobil	3.3%

3. 결 론

지금까지 직류전기철도의 누설전류 방지대책에 대한 유럽과 호주의 사례를 간략히 고찰하였다. IEC 표준에서 볼 수 있듯이 국내 전식대책의 문제는 피간섭시설물측의 노력만으로는 해결할 수 없으며 귀선시스템에 대한 체계적인 분석과 함께 누설전류의 원천이 되는 요인들을 찾아 하나하나 줄여나가는 노력을 우리도 시작해야 할 것이다. 간섭기준을 +100[mV]로 제시하는 IEC 표준과 전식위원회를 중심으로 제도적으로 전식대책을 수립하고 있는 호주를 거울삼아 심한 지역의 경우 -30~+30[V]까지 전위변화가 발생하고 있는 국내 심각한 전식환경은[5-9] 이제 각 유관기관과 산학연의 전문가들이 모여 풀어나가야 할 당면과제이다.

[참 고 문 헌]

[1] IEC, "IEC 62128-2 Railway application - Fixed installations - Part 2: Protective provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems", 2003
 [2] "Electricity safety act 1998", Parliament of Victoria, Australia, 1998
 [3] "Electricity safety (stray current corrosion) regulations 1999", Parliament of Victoria, Australia, 1999
 [4] Victorian Electrolysis Committee, "Code of Practice", 2004
 [5] 하윤철,배정효,하태현,이현구,김대경, "지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태조사", 2003 대한전기학회 전력기술위원회 추계학술대회 논문집, 373-375, 2003
 [6] 하윤철,하태현,배정효,김대경,이현구, "지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태분석(I),(II)", 2004 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, 1364-1369, 2004
 [7] 하윤철,배정효,하태현,이현구,김대경, "직류전기철도의 누설전류 감섭대책(I),(II),(III)", 2005 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환위원회 추계학술대회 논문집, 270-278, 2005