

지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태조사

하운철, 배정호, 하태현, 이현구, 김대경
한국전기연구원

On-site Investigation of the Stray Current Condition
in DC-Powered Subway System

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

Abstract - The subway, a typical electrified transit, is operated by the 1500 V DC-powered system with the overhead positive feeder and the rails negative return. This return path would bring about considerable stray current circuits, that is, from the bottom of rails to soil and then to the station ground, unless the rail-to-soil resistance is sufficiently high. The stray current can cause electrolytic corrosion of subway metallic structures and adjacent underground utilities. In this paper, we reports on-site investigation of the stray current condition, especially influenced by drainage method. The drainage method including both forced drainage and polarized drainage, extensively adopted as a countermeasure for electrolytic corrosion of underground pipelines, was found out to exert a harmful influence upon rail components as well as the pipelines.

1. 서 론

현재 국내의 지하철은 DC 1500V의 직류전원으로 구동되며 일반적으로 부하전류는 지하철 변전소에서 급전선을 통해 열차로 공급되어 열차를 구동시킨 후 다시 레일을 통해 지하철 변전소로 귀환하도록 설계되어 있다. 이 때 레일이 가지고 있는 길이 방향의 저항과 레일과 대지 사이의 불완전한 절연으로 인해, 원래 설계된 귀환 회로를 벗어나, 레일로부터 대지로 전류의 일부가 유출될 수 있는데 이러한 전류를 표유전류라고 한다. 이 표유전류는 양호한 도체의 역할을 하는 지중 금속구조물(가스배관, 송유관, 상수도관 등)에 유입되어 구조물을 따라 흐른 후 국부지점, 즉 토양비저항이 낮은 지점이나 변전소 가까지에서 대지로 유출한 후 지하철 전원공급부의 (-)극으로 귀환하게 되며, 이 유출 부분에서 부식이 집중적으로 발생하게 된다. 이와 같이 직류누설전류에 의한 부식을 표유전류부식(stray current corrosion) 또는 전식(electrolytic corrosion)이라 한다[1].

이러한 전식의 문제는 이미 선진국에서는 그 실태조사와 분석 및 대책수립에 대해 광범위하게 연구가 진행되어 왔으나[2] 우리나라에서는 80년대 초까지 표유전류에 대한 개념조차 없었으며 1981년 직류전원을 사용하는 서울 지하철 2호선이 개통되면서 미육군 송유관과 서울시 지하철 2호선이 교차하는 한강변 부근에서 지하철 누설전류가 송유관에 미치는 영향이 조사되었고, 그 결과 선택배류기를 설치한 것이 표유전류에 대한 인식과 대책의 시발점이 되었다. 이러한 배류법은 레일에서 누설되어 인근의 지중 금속구조물에 유입된 전류를 전해질(대지)를 통하지 않고 직접 도체(배류선)를 통해 다시 레일 혹은 변전소의 (-)극으로 귀환시키는 방법으로, 이때부터 지하철의 영향을 받는 가스배관과 금속시설들에 대한 선택배류법의 적용이 확산되었다. 1985년부터는

강제배류법이 도입되면서 지하철과 인접한 지중 금속시설물에 대한 지하철 표유전류의 간섭 대책은 대부분 강제배류법에 의존하고 있으며, 현재에도 꾸준히 그 수가 증가하고 있는 추세이다.

본 논문에서는 지하철의 표유전류에 대한 보다 효과적인 대책 수립을 위하여 서울지역의 표유전류 실태, 특히 강제배류법에 의한 영향을 조사한 현장데이터를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 배류법 적용실태와 문제점

국내에 운용중인 배류기는 지하철 및 경전철, 고속철도 등 직류전원을 사용하는 곳이 증가함에 따라 그 수가 급격히 증가하고 있다. 지하철의 경우 현재 서울 1~8호선, 부산 1~2호선, 대구 1호선, 인천 1호선이 운영 중에 있으며, 기존 노선의 증설뿐만 아니라 현재 서울 9~11호선, 부산 3호선, 대구 2호선, 인천 2~3호선, 대전 1~2호선, 광주 1호선 등이 개통예정 중이거나 계획 중에 있다. 또한 2004년 4월 고속철도의 개통과 중도시의 경쟁적인 경전철 도입이 추진되고 있어 지중 표유전류 문제가 심각한 문제로 대두될 것으로 보이며 배류법의 적용 또한 그 타당성에 대한 제고가 없는 한 지속적으로 늘어날 것이다.

표 1은 서울 및 부산지역 지하철 인근 지중시설물에 대한 배류법 적용 현황을 나타내고 있다. 강제배류법의 점유율이 점차 높아지고 있으며, 기존의 선택배류법은 점차 강제배류법으로 교체되어 가고 있다. 현재의 추세대로라면 머지 않아 선택배류법의 적용이 불가능할 것이며, 결국 모든 선택배류법은 강제배류법으로 대체될 것으로 보인다. 지중 시설물에 있어서도 현재는 도시가스 배관, 상수도관에만 배류법이 적용되고 있으나 직류 표유전류의 원천이 되는 레일이 점점 복잡해짐에 따라 이와 인접하게 되는 송유관, 지역난방배관 등도 이러한 표유전류 문제를 심각하게 다루게 될 것이다.

표 1. 서울/부산지역 배류법 적용 현황

(2003년 7월 현재)

구분	선택배류	강제배류	계
서울 1호선	2	3	5
서울 2호선	9	28	37
서울 3호선	2	18	20
서울 4호선	1	11	12
서울 5호선	-	14	14
서울 6호선	2	1	3
서울 7호선	2	3	5
서울 8호선	-	1	1
부산 1호선	-	7	7
부산 2호선	-	7	7
계	18	93	111

강제배류법이 가지는 근본적인 문제는 우선 전철측에 미치는 영향으로 1) 전철신호회로의 교란, 2) 레일전압 상승 및 레일의 전식 등이 있음이 알려져 있고, 지중시 설물에 미치는 영향으로는 1) 과방식, 2) 선택배류법 적용 불가능, 3) 간섭범위의 확대, 4) 간섭의 악순환 등이 알려져 있다[3].

2.2 표류전류 실태 분석

2.2.1 현장 측정 방법

직류 누설전류가 지하매설 배관에 미치는 영향에 대해서는 최근 국내에서도 해석적 방법으로 연구가 진행되고 있으나[4] 배류법이 미치는 실제적인 영향을 객관적인 자료를 통해 분석함으로써만이 해결될 수 있을 것이다.

현장에서 취득할 수 있는 자료로는 우선 배류기의 출력전류가 있을 수 있는데 이의 측정을 위해서는 정교한 저항을 이용해서 양단의 전압값을 읽어나는 방법과 전류센서(Current transformer)를 이용하는 방법이 있다. 본 실태조사에서는 후자의 방법을 사용하였으며 측정에 사용된 전류센서는 URD International의 모델 HCS-36-800-AP-CL을 현장사용에 적합하게끔 하여 사용하였다. 전류센서로부터 출력되는 전압값을 기록하는 저장장치로는 초당 최대 250개의 값을 샘플링 할 수 있으면서 64 Mbyte의 저장메모리를 가진, 자체 개발한 누설전류측정장치를 사용하였다.

배관과 대지사이의 전위인 P/S 전위는 배관의 부식을 예측할 수 있는 기준으로 현장에서 측정할 수 있는 자료로 일반적으로 간섭이 없는 환경에서는 휴대용 또는 매설형의 황산동 기준전극에 대해 배관의 전위차를 측정하지만 지하철 주변과 같은 전식환경에서는 누설전류를 해 IR drop이 포함되어 나타나므로 IR-free 기준전극을 사용해야한다[5]. 그러나 IR-free 기준전극이 고가인데다 휴대용으로 사용하기가 쉽지 않아 일반적인 황산동 기준전극을 이용하여 측정하였다. 그러나 배류기의 출력전류 중 교류성분이 미치는 영향 해석을 위해서 Stelth 7 Model SRE-022-CIY 황산동 IR-free 기준전극을 사용하였다. 또한 교류성분의 측정을 위해 초당 10만개 이상의 값을 취할 수 있는 Tektronix사의 디지털 오실로스코프 모델 TDS3032를 사용하였다.

2.2.2 배류전류 측정 결과

그림 1은 서울지역에서 운용중인 강제배류기 중 하나에 대하여 12시간(07:00~19:00) 동안 그 출력전류의 변화를 측정한 것으로 앞쪽 6시간가량은 서울시 전역의 강제배류기의 전원을 OFF시킨 후 선택배류가 되도록 한 경우의 전류변화 양태이고, 뒤쪽 6시간가량은 강제배류기가 가동 중일 때의 전류변화 양태이다. 각각의 피크는 전철이 지나갈 때 누설되는 전류량을 나타내며 강제배류 상태에서는 이 전류량에 평균 20A의 추가적인 전류가 중첩되어 흐름을 알 수 있다.

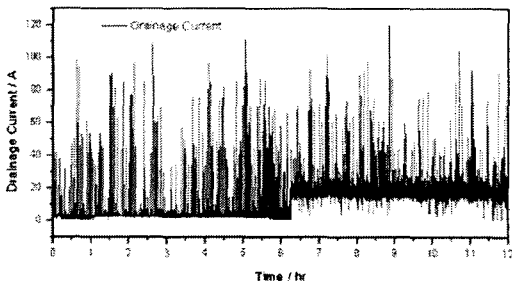


그림 1. 배류기 출력전류 변화 양태

특히 이러한 배류전류는 배관의 부식은 억제하지만 레일의 부식과 선형적인 관계가 있으므로(패러데이의 법칙), 강제배류와 선택배류시의 레일 부식량을 산출할 수 있는 자료가 된다. 그림 2는 선택배류와 강제배류시의 전하량 비교를 위해 각각 1시간의 데이터를 겹쳐 나타낸 것이다. 각각의 그래프를 적분하면, 선택배류인 경우에는 약 67,000 C의 값을 나타내는데 이는 선택배류 대신 강제배류를 적용함으로써 약 4배 이상의 레일 부식을 촉진시킬 수 있으며, 아울러 전기방식이 안 된 인근 배관에 대한 간섭범위도 그에 상응하는 만큼 커지게 됨을 의미한다.

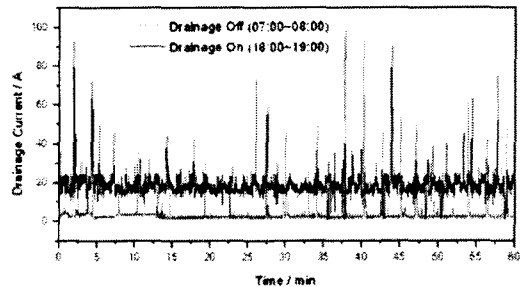


그림 2. 선택배류와 강제배류의 레일전식 비교

2.2.3 P/S 전위 측정 결과

그림 3은 선택배류와 강제배류시의 배관-대지간 전위 변화 양상을 배류기 설치지역 인근에서 일반 휴대용 황산동 기준전극으로 측정한 결과이다. 선택배류시에는 대지를 통해 누설전류가 적게 흐르므로 P/S 전위는 전철이 지나갈 때만 크게 교란이 일어나고 있다. 그러나 실제 정확한 배관의 전위는 이로부터는 알 수 없으며 IR-free 기준전극을 이용해야 한다. 반면 강제배류시에는 누설전류가 커서 전위의 교란도 커지게 되고 배관의 전위가 과방식의 영역까지 내려갈 수도 있음을 알 수 있다. 또한 강제배류기가 운용중인 지역에서는 외부전원법이나 희생양극법 등의 전기방식이 따로 적용되지 않고 있으므로 강제배류기의 전원을 OFF 시킬 경우 미방식 상태가 됨을 알 수 있다.

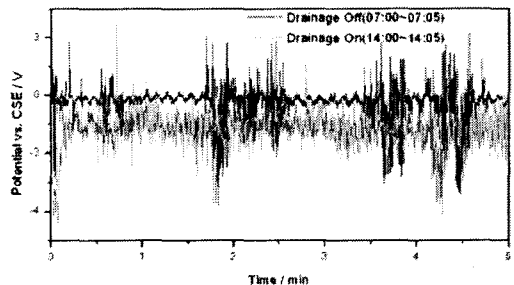
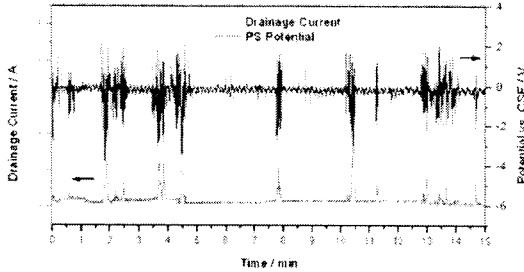


그림 3. 선택배류와 강제배류시의 P/S 전위 비교

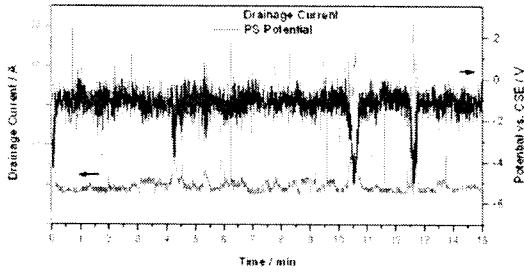
그림 4(a)와 4(b)는 각각 선택배류 및 강제배류 상태에서 배류전류에 의해 P/S 전위가 교란되는 양태를 보여주고 있다. 전철이 지나갈 때 발생하는 누설전류로 인해 배관의 전위가 크게 교란되고 있으며 강제배류의 경우가 과도한 전류로 인해 과방식이 일어날 수 있음을 극명하게 드러내고 있다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 현장에서 흔히 사용되고 있는 이러한 전위측정법은 전식 환경에서는 배관의 전위를 정확히 나타내지 못하므로 IR drop을 보상할 수 있는 다른 전위측정법을 이용하여야 한다.

[참고 문헌]

- [1] A.W. Peabody, "Control of Pipeline Corrosion", 2nd ed., pp. 226-236, NACE International, Houston TX, 2001.
- [2] M.J. Szeliga (ed.), "Stray Current Corrosion: The Past, Present, and Future of Rail Transit Systems", NACE International, Houston TX, 1994.
- [3] 한국전기연구소 연구보고서, "지중표유전류 감소대책 연구", 과학기술처, 1997
- [4] 이현구, 하태현, 배정효, 하운철, 김대경, "전철 누설전류가 지하 매설 배관에 미치는 영향 해석", 2003 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, B권 pp. 127-129, 2003
- [5] 하태현, 배정효, 이현구, 김대경, 하운철, "IR Free 전극을 이용한 전위측정에 관한 연구", 2003 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, D권 pp. 2735-2737, 2003



(a) 선택배류



(b) 강제배류

그림 4. 누설전류와 P/S 전위의 관계

그림 5는 같은 지역의 P/S 전위를 일반 황산동 기준 전극과 IR-free 기준전극에 대하여 각각 디지털 오실로스코프로 초당 10만개의 샘플링 속도로 측정된 것이다. 크게 보면 60Hz의 상용 주파수와 이의 고조파들이 중첩되어 나타남을 알 수 있는데, 이는 현재 적용 중인 강제배류법이 전철의 신호회로에 악영향을 미칠 수 있음을 보여 준다. 또한 IR-free와 일반 기준전극의 차이가 크게 나타나고 있으며 실제로는 P/S 전위 변화가 크게 일어나지 않지만 이러한 교류성분이 IR drop으로 작용할 경우 전위 측정 결과가 실제값에서 크게 벗어날 수 있음을 알 수 있다.

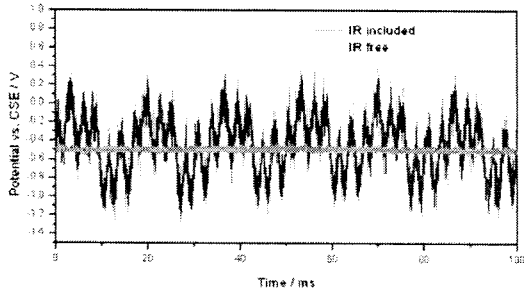


그림 4. 배류전류의 교류성분과 IR drop 효과

3. 결 론

이상에서 현재 국내에 광범위하게 적용되고 있고, 앞으로도 그 적용이 크게 증가할 것으로 우려되는 강제배류법이 전철측 및 지중시설물측에 미치는 문제점을 현장에서 측정된 데이터로부터 분석해 보았다. 강제배류는 일차적으로 레일의 전식을 촉진시키고, 배류전류에 포함된 교류성분으로 인해 전철신호회로에 고장을 야기할 수 있음을 알 수 있다. 또한 지중 방식대상물의 과방식과 간섭범위의 확대를 야기할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서, 이러한 배류법을 대체하고 국내의 가혹한 전식환경에 맞는 새로운 전식대책법의 개발이 시급한 현안이 되고 있어, 향후 이에 대한 관심과 연구가 지속적으로 확산될 것 기대해 본다.