

지하철 누설전류 실태 조사

이현구 (한국전기연구원 전기동력학연구그룹)

1 서론

일찍이 성수대교붕괴사고(1994년 10월 21일 발생), 아현동 가스배관 폭발사고(1994년 12월 8일 발생), 삼풍백화점 붕괴사고(1995년 6월 29일 발생) 등의 대형시설물의 안전사고는 국민들의 안전에 대한 관심도가 그 어느 때 보다 고조되게 만들었던 사고였던 것을 기억한다. 이러한 관점에서 국가 기간시설물의 안전성 확보는 그 무엇보다도 국가의 신인도와 국민의 삶의 질을 확보하는 중요한 사항이다. 국가 기간시설물 중에 지하 금속매설물(가스배관, 송유관, 상하수도관, 지역난방 열배관 그리고 전력케이블 등)들은 에너지를 수송하는 주요한 설비로써, 시설물 소유자들은 부식(腐蝕)으로부터 안전성을 확보하고 수명을 연장시키기 위해 방식시설(防蝕施設)인 전기방식(Cathodic Protection) 설비를 갖추어 운영하고 있다. 즉 지하 금속구조물의 부식은 가스폭발사고, 기름유출로 인한 환경오염 및 누수로 인한 식수원 낭비 등의 막대한 경제적인 손실을 초래하므로 시설물의 안전관리에 만전을 기하고 있다.

그러나 대도시의 국가 기간시설물들은 도시철도와 전력계통에 의해 발생하는 DC와 AC 누설전류 때문에 간접 영향을 받고 있어, 시설물을 안정적으로 유지하기가 어려운 실정이다. 특히 도시철도인 DC 지하철에 의해 누설된 전류는 AC 보다 약 1,000배 정도

전식을 빠르게 진행시키기 때문에 세심한 관리가 필요하다.

우리나라에서는 '80년대 초까지 누설전류에 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 누설전류에 대한 인식과 대책의 시발점이 되었다. 이러한 배류법은 레일에서 누설되어 인근의 지중 금속시설물에 유입된 전류를 대지를 통하지 않고 직접 도체(배류선)를 통해 다시 레일 혹은 변전소의 부극선으로 귀환시키는 방법으로 이때부터 지하철의 영향을 받는 가스배관과 금속시설들에 대한 선택배류법의 적용이 확산되었다. 1985년부터 강제배류법이 도입되면서 지하철과 인접한 지중 금속시설물에 대한 지하철 누설전류의 간섭 대책은 현재 대부분 강제배류법에 의존하고 있으며, 현재에도 꾸준히 그 수가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 배류법은 지중 시설물과 레일 사이를 전기적으로 연결함으로써 누설전류가 대지로 유출되면서 발생하는 지중 시설물의 전식을 억제시키는 반면, 전철 신호 회로의 교란, 레일전압의 상승 및 레일의 전식, 인접한 타 시설물과의 간섭 범위의 확대 및 간섭의 악순환, 과당식 등 여러 가지 문제를 안고 있다.

부산지하철은 1985년 노포동과 범내골을 잇는 1

특집 : 지하철 누설전류 실태와 전식대책

호선 1단계 구간이 개통된 이래 현재 2호선 3단계까지 개통되었고, 2호선의 나머지 구간과 3호선의 공사가 현재 진행 중이다. 서울지역과 마찬가지로 비접지 방식으로 레일이 설계되었지만, 레일과 대지와의 불완전한 절연으로 인해 누설전류가 지중 금속시설물과 레일의 전식 문제를 초래하고 있어, 이에 대한 대책으로 현재 14개의 강제배류기가 설치되어 있다.

본 글에서는 서울과 부산지역의 지하철 직류급전 시스템에 의한 누설전류 실태를 조사, 분석하였으며, 특히 누설전류가 관대지(pipe-to-soil) 전위에 미치는 영향을 분석하고 아울러 배류법에 의한 배류전류의 크기를 측정하여 향후 적절한 대책 수립에 활용코자 하였다.

2. 본 론

2.1 지하철 누설전류의 메커니즘

일반적으로 지하철의 부하전류는 그림 1과 같이 지하철 변전소에서 출발하여 급전선을 통해 지하철 객차로 공급되어 지하철을 구동시킨 후, 다시 레일을 통해 지하철 변전소로 귀환하도록 설계되어 있다. 그러나 레일 부분에서 레일이 가지고 있는 길이방향의 저항과, 레일과 대지사이의 불완전한 절연으로 인해, 원래 설계된 귀환회로를 벗어나, 레일로부터 대지로 전류의 일부가 유출하게 된다. 이때 대지로 유출하는 전류를 누설전류 또는 표류전류라고 부른다.

이 누설전류는 양호한 도체의 역할을 하는 지중 금속구조물(가스배관, 송유관, 상수도관 등)에 유입되어 구조물을 따라 흐른 후 국부지점, 즉 토양의 비저항이 낮은 지점이나, 지하철 변전소 접지 가까이에서 대지로 유출한 후 전원공급부의 (-)극으로 귀환하게 되며, 이 유출 부분에서 부식이 집중적으로 발생하게 된다. 이와 같이 지하철에서 발생한 누설전류에 의한 부식을 표류전류 부식(Stray Current Corrosion) 혹은 전해부식(Electrolysis)라 하며, 전해부식을 줄

여서 일반적으로 전식이라고 부른다.

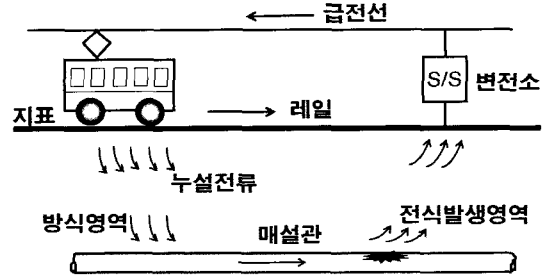


그림 1. 지하철에 의한 누설전류 개념도

전식에서 누설전류의 크기는 인근 지하 금속매설물의 부식에 중요한 요인으로 작용하므로, 이 장에서 지하철에 의한 누설전류를 계산해 보기로 한다.

누설전류 크기는 지하철변전소의 개수와 운행 중인 전차 수에 따라 변한다. 이 장에서는 대표적인 아래 2가지 경우에만 그 크기를 계산하여 물리적인 개념을 알아보기로 한다.

- ① 1개의 직류변전소에 단일 부하가 있는 경우

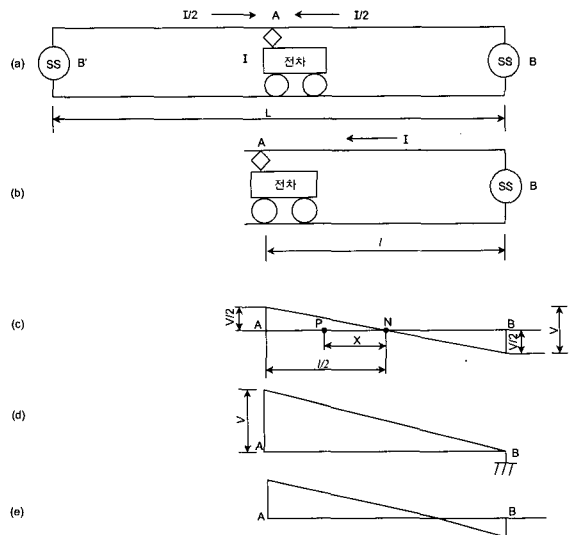


그림 2. 1개 직류변전소의 급전 개념도 (단일 부하가 있는 경우)

그림 2 (b)에서 B변전소로부터 길이 l 만큼 떨어진 A 지점의 부하전류를 I_l 라 할 때 AB간의 귀선 전압 강하 V 는

$$V = I \cdot (r \cdot l) \quad [V] \quad (1)$$

레일 대지 전압 V 는 대지를 기준으로 할 경우 A점은 $+V/2$ 가 되며, 그림 2 (c)에서와 같이 중앙 부분에 $V=0$ 인 중성점 N이 생긴다. N 지점에서 임의의 x km 떨어진 P 지점에서의 대지전압 v_p 는 식 (2), 부하전류 i_p 는 식 (3)과 같다.

$$v_p = I \cdot (r \cdot x) \quad (2)$$

$$i_p = \frac{v_p}{w} = \frac{I \cdot (r \cdot x)}{w} \quad (3)$$

총 누설전류는 i_p 를 N 지점에서 A 지점까지 식 (4)와 같이 적분을 하면 된다.

$$i_l = \int_0^{l/2} i_p \, dx = \frac{1}{8} I \cdot \frac{r}{w} \cdot l^2 \quad (4)$$

여기서

- v_p : P 점의 레일 대지 전압
- i_p : P 점의 레일 단위 길이당 누설 전류
- i_l : 중성점 N에서 A점까지의 누설 전류의 총계
- I : 전부하 전류 [A]
- r : 단위 길이당 레일 저항 [$\Omega \cdot \text{km}$]
- x : 중성점 N으로부터 Xm 떨어진 거리 [m]
- w : 단위 길이당 레일 누설 저항 [$\Omega \cdot \text{km}$]

그림 2 (d)의 경우는 귀선이 완전 접지된 상태로서 접지저항 값이 0인 경우이며 누설전류 i_l 는

$$i_l = \frac{1}{2} I \cdot \frac{r}{w} \cdot l^2 \quad (5)$$

일반적으로 귀선 레일은 연속적으로 접속된 상태로 전차 부하와 지하철 변전소 근방에서는 누설 전류가 중첩되어 상호 접지 효과를 크게 하고 식 (6), (7)이 중첩되며, 비례 상수값의 평균값을 취하게 된다. 실제 상태에서는 그림 2 (e)에 근접하게 된다.

이 경우 누설 전류의 총계 i_l'' 는 식 (6)과 같이 된다.

$$i_l' = \frac{1}{3} I \cdot \frac{r}{w} \cdot l^2 \quad (6)$$

② 양쪽 직류변전소간의 중앙에 단일 부하가 있는 경우

그림 2 (a)에서 레일 대전 전압, 레일 전류 및 누설 전류의 분포는 A점을 중심으로 좌우 대칭이 되며 그림 2 (e)를 양측에 접친 상태가 된다. 즉 직류 변전소 BB'간 전체 누설전류 i_l'' 는 AB의 2배가 된다.

$$i_l'' = 2 \cdot i_l' = \frac{1}{3} I \cdot \frac{r}{w} \cdot l^2 \quad (7)$$

식 (7)에서 $l=L/2$ 이므로 누설 전류값 i_l'' 는

$$i_l'' = \frac{1}{12} I \cdot \frac{r}{w} \cdot L^2 \quad (8)$$

식 (8)과 같이, 누설전류 i_l'' 는 총 부하전류 I 단 위길이당 레일저항 r 변전소간의 거리 L^2 에 비례하고, 단위 길이당 레일누설저항 w 에 반비례한다.

2.2 배류법의 국내 현황

2.2.1 배류법

배류법이라 함은 전철의 레일에서 누설되어 인근의 피방식구조물에 유입된 전류를 전해질(토양)을 통하지 않고 직접 도체(배류선)를 통해 다시 전철의 레일 혹은 전철 변전소의 부극으로 귀환시키는 방법을 말한다.

특집 : 지하철 누설전류 실태와 전식대책

피방식구조물에 유입된 누설전류를 전철의 레일 혹은 전철변전소의 부극으로 귀환시키기 위해서는 피방식구조물과 레일 혹은 전철 변전소의 부극 사이를 전기적으로 접속하여야 한다. 이때 사용되는 접속선을 배류선이라고 부르며, 이 접속회로의 차이에 따라 각각 직접배류법(Direct Drainage System), 선택배류법(Polarized Drainage System) 및 강제배류법(Forced Drainage System)으로 구분한다.

가. 직접배류법

피방식구조물과 전철변전소의 부극 혹은 레일 사이를 직접 도체로 접속하는 방법으로써 그림 3과 같다. 이 방법은 간단하고 설비비가 가장 적게 드는 방법이지만 변전소가 하나밖에 없고, 또 배류선을 통해 전철로부터 피방식구조물로 유입하는 전류(역류)가 없는 경우에만 사용 가능한 방법으로써 전철 시스템이 단순했던 초창기에 일부 적용이 되었던 방법이며 지금과 같이 시스템이 복잡하고 누설전류의 유·출입 지점이 복잡한 현실에서는 적용하기 어렵다.

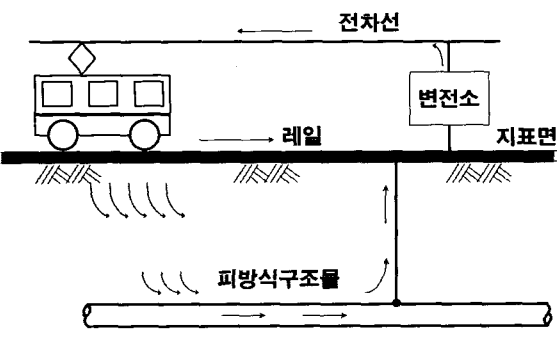


그림 3. 직접배류법

나. 선택배류법

일반적으로 직접배류법을 적용하면 전철부하의 변동, 전철변전소 사이의 부하분담의 변화 등으로 인해 피방식구조물이 레일에 대해 부전위가 되어 역류가 흐르는 경우가 생기게 된다. 이 역류를 방지하면서 정

방향(피방식구조물로 부터 레일 방향)으로 전류를 흘러주기 위해서는 배류선에 다이오드 혹은 역전압 계전기 등의 역류방지 장치를 부착하여야 한다. 이 역류방지장치를 선택배류기라고 부르며 이 장치를 사용하는 방법을 선택배류법이라고 한다. 선택배류법의 회로 개요는 그림 4와 같다. 즉 선택배류기의 목적은 역류를 방지하고, 피방식구조물로 부터 귀선으로 향하는 전류만 선택적으로 통과시키는 장치로써, 선택배류기로써의 구비조건은 아래와 같다.

- 1) 귀선과 피방식구조물 사이에 가해지는 광범위의 전압에 대하여 선택배류가 가능하여야 한다.
- 2) 귀선과 피방식구조물 사이의 급격한 전압변동에 대해서도 충분히 동작 가능하여야 한다.
- 3) 정방향의 전기저항은 작고, 역방향의 내전압은 크면서 역전류는 작아야 한다.
- 4) 내구성이 크고 고장이 작아야 한다. 즉 반도체 방식은 써지 보호장치를 부착하고, 계전식은 전기접점을 아크에 대하여 충분하도록 설계한다.
- 5) 현장의 제반조건에 충분히 견딜 수 있도록 하고, 수송중에 열화가 발생하지 않는 구조로 한다.
- 6) 보수가 쉽도록 한다. 즉 배류기의 회로 및 동작을 간단하게 점검하고 수리할 수 있도록 한다.
- 7) 이상전류로 인한 배류기 및 피방식구조물의 손상을 방지할 수 있는 자동 차단기를 설치한다.

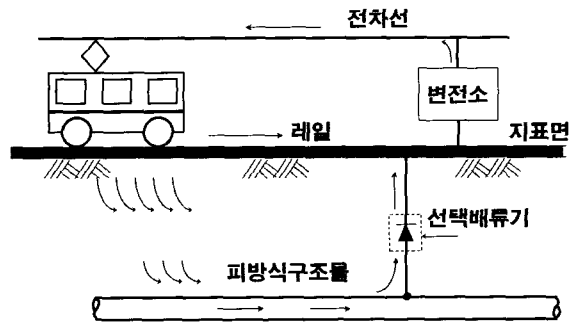


그림 4. 선택배류법

다. 강제배류법

피방식구조물과 레일 혹은 전철변전소의 부극 사이를 연결하는 회로에 직류전원을 인가하여 배류를 촉진하는 방법을 강제배류법이라고 한다.

이 방법은 레일을 양극으로 사용하는 외부전원법과 개념적으로 동일하지만 레일의 전위가 큰 폭으로 변동하기 때문에 역류를 방지하는 회로가 별도로 필요하고 또 앞에서 언급한 다른 배류방식과 비슷한 구조를 가지고 있기 때문에 배류법의 일종으로 취급한다.

레일은 전체의 접지저항은 낮는데 반해 단위길이당의 접지저항은 높기 때문에 양호한 접지양극의 역할을 한다. 따라서 이 방법은 과방식 문제도 있지만, 레일을 접지양극으로 사용하기 때문에 전철시설 등에 미치는 영향을 고려할 필요가 있으며, 타시설물에 대한 간섭을 고려하여 배류전류는 최소한으로 하여야 한다.

강제배류법의 회로 개요는 그림 5와 같다.

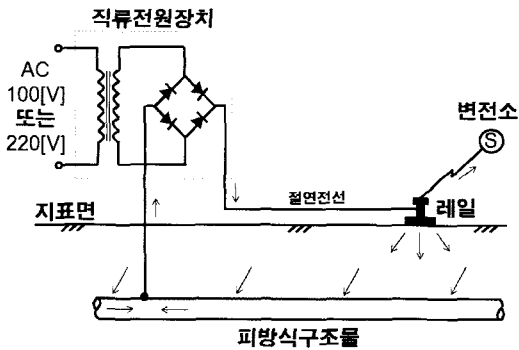


그림 5. 강제배류법

2.2.2 배류법 적용 현황

우리나라에서 배류법은 1981년에 미8군에서 운영하는 송유관(TKP Line)에 대하여 선택배류법을 적용한 것이 최초이며, 그후 1984년에 도시가스배관에 국내최초의 강제배류법이 적용된 이래, 2003년 현재 총 99곳에서 배류법이 적용되고 있다.

서울지역의 배류기 신설 현황은 그림 6에서 보는 바와 같이 지하철 노선의 신설 및 확장에 따라 1980년대 이후 지속적으로 증가되어 왔다.

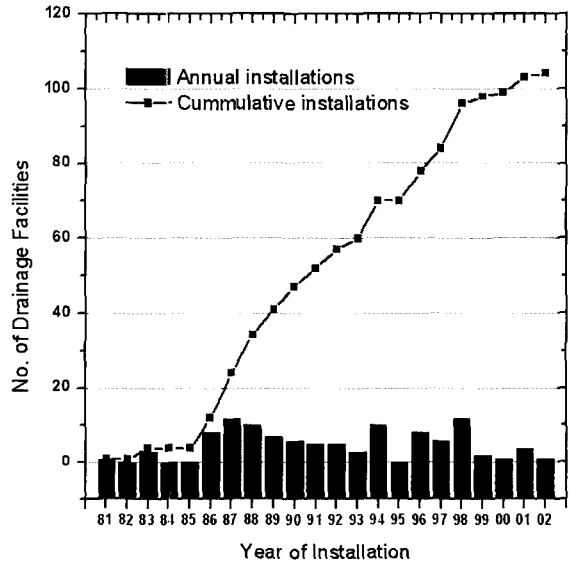


그림 6. 연도별 배류기 신설현황

신설배류기의 형태는 선택배류기에서 강제배류기로 전환되어 왔다. 1980년대에는 주로 선택배류기를 설치하였으나 간섭영향이 증가함에 따라 1990년대 이후 강제배류법의 적용이 증가하였고 기존에 설치되어 있던 선택배류기를 강제 배류기로 교체한 사례도 17건으로 조사되었다.

그러나 최근에는 배류효율의 저하 문제와 배류법의 위해성에 대한 인식이 증가하여, 기존 설비의 철거나 외부전원법으로의 전환이 빈번히 일어나고 있다. 2003년 말 서울지역 지하철 누설전류 현장 실태조사 과정에서 파악된 호선별 배류기 운영 현황을 표 1에 나타내었다. 배류법이 적용되어 있는 시설물로는 가스배관이 68개소, 상수도배관이 24개소, 송유관이 5개소 및 지하철 측이 2개소로 조사되었다.

표 1. 2003년 말 현재 서울지역 배류기 운영 현황

구 분	선택배류	강제배류	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
계	21	78	99

2.2.3 강제배류법의 문제점

누설전류의 원인제공자에게 누설전류를 배류시킨다는 것은 외견상 지극히 타당한 것으로 판단된다. 그러나 강제배류법을 적용할 경우 아래와 같은 문제를 발생시킬 수 있다.

- ① 전철 측에 미치는 영향
 - 신호회로의 오동작
 - 레일 전압의 상승과 레일의 전식
- ② 피방식대상물에 미치는 영향
 - 과방식
 - 선택배류법의 적용 불가능
 - 간섭범위의 확대
 - 부식문제의 악화

본 글에서는 서울지역의 가스배관 및 상수도관과 지하철 레일간에 설치된 100여개 배류기의 운영현황을 분석하고, 운영 중인 배류기에 대한 배류전류를 동시에 측정, 분석하여 배류법의 영향을 정량적으로 해석함으로써, 향후 적절한 대책 수립에 활용코자 하였다.

2.3 누설전류 실태조사

2.3.1 서울지역

가. 배류전류 측정 대상

앞에서 조사된 99개소에 대해 운영 상태를 파악한 결과 운전보류 또는 고장수리 중인 13개소와, 미8군이 운영하고 있는 송유관 배류기 5개소 및 지하철 선로상에 설치되어 있는 1개소를 제외하고 80개 배류기를 대상으로 배류전류 측정을 시행하였다.

나. 측정 방법

지하철 레일 및 배관의 상태에 따라 최대 200[A] 이상의 누설전류가 배류기를 통해 흐르고 있는 서울 지역의 배류전류를 측정하기 위해서 누설전류 측정장치 SCL-II와 전류센서를 배류기의 배관측 리드선에 설치하였다. 측정은 오전 7시부터 익일 오전 7시까지 24시간동안 초당 4회의 빈도수로 수행하였다.

다. 누설전류 실태 분석

그림 7은 서울 지하철 2호선 구간에 설치된 강제배류기의 전형적인 배류전류 양상을 나타낸다. 강제배류기는 배관과 레일 사이에 일정한 전압을 가해서 강제로 전류를 흘려주는 것으로 그림에서는 약 25[A]의 전류가 강제배류에 의해 흐르고 있음을 알 수 있다. 이때 배관은 이러한 전류의 유입으로 방식(cathodic protection)되는 효과를 갖는데 이것이 강제배류법이 통상적으로 적용되는 이유 중의 하나다. 그러나 지하철의 운행에 의해 전류는 크게 교란되는데 100[A] 이상 전류가 증가하는 경우가 빈번히 발생함을 알 수 있다. 이것은 강제배류기가 가지고 있는 선택배류 회로에 의해 나타나는 것으로 전철의 운행에 의해 발생하는 추가적인 누설전류가 배관을 타고 흘러 배류기를 거쳐 레일로 귀환하기 때문이다. 전철의 운행이 멈추는 밤 1시부터 새벽 5시까지(그림 7의 X-축 18과 22 사이)는 강제배류기의 전원이 자

동으로 차단되도록 일반적으로 설계되어 있으며, 그림에서는 새벽 4시까지 전원이 차단됨을 알 수 있다. 이 때에는 전철 운행에 의한 누설전류가 없으므로 선택배류 회로를 통해 흐르는 전류도 0의 값을 가짐을 알 수 있다. 새벽 4시부터는 강제배류에 의해 약 25[A]의 전류가 흐르다가 전철 운행이 시작되면 누설전류에 의한 전류교란이 발생함을 보이고 있다.

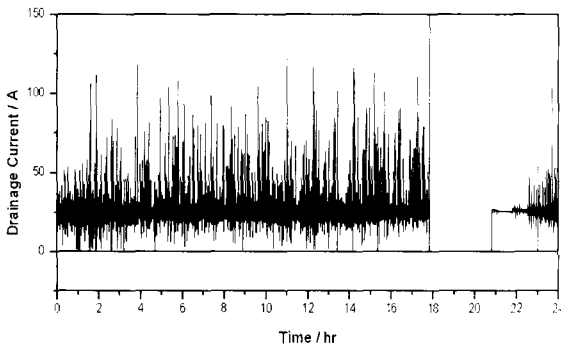


그림 7. 강제배류기의 배류전류 양태

그림 8은 서울 지하철 2호선 구간에 설치된 선택배류기의 배류전류 양상을 나타낸다. 레일과 배관사이의 자연적인 전압차가 그림과 같이 누설전류를 발생시킨다. 만약 배관과 레일 사이에 이러한 귀환회로가 없다면 배관에서 대지로 전류가 유출되는 지점에 부식이 크게 가속될 것이다.

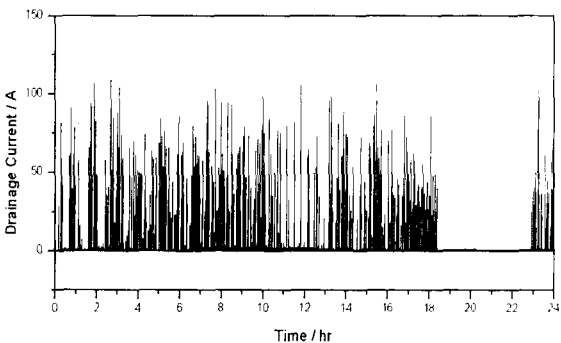


그림 8. 선택배류기의 배류전류 양태

그러나 배관의 보호를 위해 적용되어 온 배류법은 레일의 절연 파괴를 가속시킬 뿐만 아니라 레일과 레일 체결금구의 전식문제를 야기시킨다. 주성분인 철이 2가의 산화물 또는 이온으로 부식되는 것을 가정하면 측정된 배류전류를 적분하거나 평균전류(I_{mean})에 시간을 곱하여 아래의 패러데이 법칙에서 연간 부식량(m)을 계산할 수 있다.

$$m = M \times \frac{Q}{nF} = M \times \frac{I_{mean} \times 3600 \times 24 \times 365}{nF} \quad (9)$$

여기서 M은 철의 원자량(=55.8), Q는 연간 전하량(C), n은 철의 산화에 필요한 전자수(=2), F는 패러데이 상수(=96485[C/mol])이다.

표 2는 서울지역 80개 배류기 중 재측정이 필요한 2개소를 제외한 78개 배류기의 배류전류를 분석한 것이다. 누설전류에 의한 최대전류가 100[A] 이상 되는 곳이 거의 절반에 이르고 있다. 또한 현재 서울지역 배류기의 80(%)를 차지하고 있는 강제배류기에 의한 배류전류는 선택배류에 의한 배류전류에 비해 10배 이상의 누설전류를 발생시키고 있음을 알 수 있다. 강제배류의 또다른 문제점은 이러한 누설전류가 인근 타 배관에 간섭을 일으킬 경우 이를 보완하기 위해 경쟁적으로 전압을 상승시켜 간섭의 악순환이 야기될 수 있다는 것이다. 따라서 강제배류법이 광범위하게 적용된 서울지역에서는 선택배류법의 적용이 사실상 불가능한 실정이며 기존의 선택배류기도 강제배류기로 대체되어 가고 있다.

표 2. 서울지역 배류전류 분석

호선	No	배류형태	평균전류 [A]	최대전류 [A]	연간부식량 [kg]
1	1	강제	7.78	15.69	71.05
1	2	선택	0.34	24.62	3.13
1	3	강제	31.36	145.00	286.25
1	4	강제	35.63	146.12	325.17

특집 : 지하철 누설전류 실태와 전식대책

호선	No	배류형태	평균전류 [A]	최대전류 [A]	연간부식량 [kg]
1	5	선택	0.88	46.68	8.03
2	1	강제	22.08	124.11	201.50
2	2	강제	12.75	40.30	116.34
2	3	강제	7.88	84.56	71.93
2	4	강제	33.74	142.83	307.97
2	5	강제	24.30	246.06	221.76
2	6	선택	1.83	120.28	16.69
2	7	강제	26.67	179.01	243.41
2	8	선택	1.79	141.47	16.37
2	9	강제	22.35	80.92	204.03
2	10	선택	0.88	54.24	8.02
2	11	강제	3.01	54.61	27.51
2	12	강제	18.48	169.97	168.71
2	13	강제	18.81	196.48	171.65
2	14	강제	2.31	118.02	21.05
2	15	강제	35.15	125.82	320.86
2	16	강제	8.08	63.30	73.76
2	17	선택	0.89	23.41	8.11
2	18	강제	2.32	53.22	21.21
2	19	강제	13.67	52.23	124.8
2	20	강제	30.30	37.34	276.58
2	21	강제	23.17	60.58	211.47
2	22	강제	31.19	60.28	284.66
2	23	선택	3.16	243.99	28.83
2	24	강제	14.86	78.37	14.86
2	25	강제	6.60	121.25	60.27
2	26	강제	24.05	86.42	219.50
2	27	강제	22.42	111.28	204.67
2	28	강제	16.15	107.17	147.41
2	29	강제	4.03	33.45	36.78
2	30	강제	19.93	234.04	181.96
2	31	선택	0.50	24.83	4.59
2	32	강제	16.00	93.42	146.06
2	33	선택	1.20	84.01	10.91
2	34	선택	0.30	22.56	2.71
3	1	강제	19.03	191.21	173.66
3	2	강제	2.75	96.18	25.14
3	3	강제	22.34	237.19	203.92

호선	No	배류형태	평균전류 [A]	최대전류 [A]	연간부식량 [kg]
3	4	강제	18.68	119.17	170.51
3	5	강제	26.16	63.68	238.74
3	6	강제	11.72	68.20	106.96
3	7	강제	5.46	50.64	49.87
3	8	강제	3.26	34.06	29.79
3	9	강제	14.68	84.89	134.01
3	10	강제	7.45	58.52	67.97
3	11	강제	5.34	120.01	48.73
3	12	강제	14.62	132.53	133.47
3	13	강제	4.64	53.25	42.35
3	14	강제	9.26	78.44	84.52
4	1	강제	9.50	112.22	86.70
4	2	강제	22.28	117.42	203.33
4	3	강제	29.95	131.14	273.32
4	4	선택	0.24	21.85	2.17
4	5	강제	12.03	136.18	109.82
4	6	강제	4.82	57.19	44.00
4	7	강제	21.46	148.14	195.51
4	8	강제	17.93	100.52	163.65
5	1	강제	20.99	79.17	191.54
5	2	강제	27.94	49.20	255.06
5	3	강제	19.00	120.00	173.43
5	4	강제	40.15	166.00	366.45
5	5	강제	17.44	75.42	159.17
5	6	강제	29.89	95.75	272.85
5	7	강제	6.61	226.14	60.35
5	8	강제	29.77	135.22	271.70
5	9	강제	7.18	65.15	65.57
5	10	강제	2.41	102.83	21.96
5	11	강제	13.06	44.97	119.20
6	1	선택	10.50	103.33	95.88
6	2	강제	4.94	20.51	45.08
7	1	선택	3.52	150.32	32.14
7	2	강제	7.16	78.64	65.36
7	3	강제	32.29	225.16	294.70
7	4	강제	8.42	25.00	76.84
합	계		1111.74		10147.16

철의 부식량을 레일의 부식길이로 환산하면, 국내 레일의 표준 중량이 50(kg/m)이므로 표 2의 배류기만을 고려하더라도 연간 약 203(m)의 레일이 사라지고 있음을 알 수 있다. 물론 전체 레일 길이에 비교하면 큰 값은 아닐 수 있으나 실제로 대지와 접하는 부분이 레일 체결금구라고 할 때 특히 강제배류법에 대한 적절한 대책 수립이 이루어지지 않는 한 그 피해는 매우 클 것으로 예상된다.

그림 9는 합정역 A사의 배류기 출력을 측정하고 있는 장면이며, 그림 10은 지하철 임피던스본드 지점에 누설전류 측정장치가 설치되어 있는 전경



그림 9. A사의 합정역 배류기 출력 측정 전경



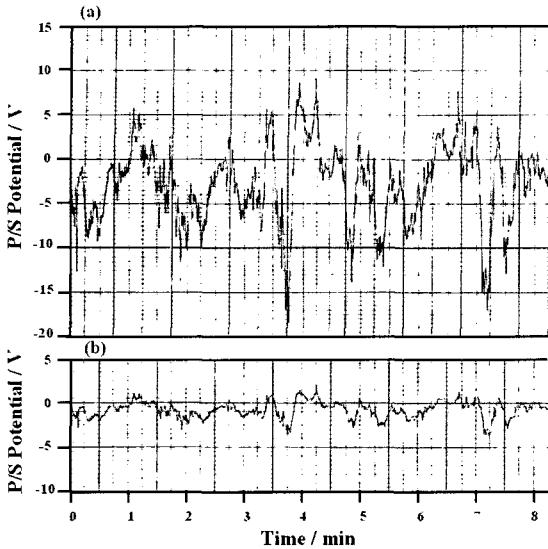
그림 10. 지하철 임피던스본드에 누설전류 저장장치가 설치되어 있는 전경

2.3.2 부산지역

가. 누설전류에 의한 간섭영향

지중 매설배관의 부식에 의한 손상을 예방하기 위해서는 배관과 배관이 접촉하는 토양 사이의 전위인 관대지 전위를 황산동 기준전극 대비 $-0.850(V)$ 이하로 유지하는 것이 권장되고 있다. 누설전류가 관대지 전위에 미치는 영향을 조사하기 위해 부산지역의 지하철 변전소 인근에 매설된 가스배관의 전위를 측정하였다. 이 배관은 현재 강제배류기가 설치되어 있어, 강제배류법을 적용시키지 않은 경우와 적용시킨 경우의 두 가지 조건에서 전위측정을 수행하였다. 전위측정을 위해 휴대용 황산동 기준전극을 많이 사용되고 있으나 간섭이 있는 지역에서는 누설전류와 토양의 저항에 의한 전압강하가 나타나므로 IR-free 황산동 기준전극도 병행해서 사용하였다. 연속적인 데이터 측정을 위해 아날로그 기록계인 TOA Electronics 사의 EPR(Electronic Polyrecoder)을 사용하였다.

그림 11 (a)와 (b)는 부산지역 전체 강제배류기의 작동을 중지시킨 후, 배관의 관대지 전위를 각각 휴대용 및 IR-free 황산동 기준전극에 대해 측정한 결과를 보여준다. 약 8분여 동안 측정된 자료에서도 전압강하에 대한 보상이 없다면 $-18.5(V)$ 와 $+12.5(V)$ 사이의 큰 전위교란이 일어나는 것으로 나타나는데, 실제로는 이러한 전위교란의 범위는 그림 11 (b)에 서와 같이 $-4(V)$ 와 $2(V)$ 사이로 축소된다. 그러나 이러한 전위는 $-0.850(V)$ 이하로 전위를 유지하지 못하는 미방식 문제와 $-2.5(V)$ 이하의 전위로 과도하게 전위가 내려가는 과방식 문제가 발생할 수 있음을 보이고 있다. 즉 전자의 경우 배관이 부식되어 손상될 수 있으며, 후자의 경우 토양 중 수분의 분해에 의해 발생한 수소가 금속 내부로 침투하면서 배관의 강도를 약화시키는 수소취성의 문제를 야기할 수 있다.

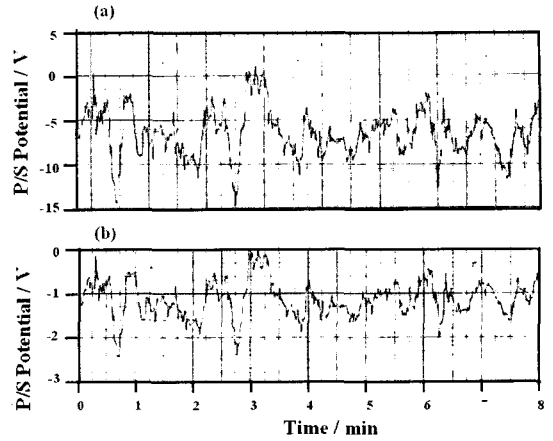


(a) 후대용 황산동 기준전극 대비
(b) IR-free 황산동 기준전극 대비

그림 11. 강제배류법 미적용 조건에서의 관대지 전위 변화

그림 12 (a)와 (b)는 강제배류기를 가동시켰을 때의 관대지 전위 변화를 나타낸다. 전압강하에 대한 보상이 없을 경우에는 -13[V]와 1[V] 사이에서 전위 교란이 발생하는 것으로 나타나, 실제로는 -2.5[V]와 0[V] 사이의 전위 변화가 발생한다. 누설 전류에 의한 배관의 간섭영향은 이렇게 강제배류를 통해 어느 정도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

그러나, 강제배류법은 배관의 미방식과 과방식 문제를 완전히 해결하지 못한다는 점을 차치하고라도 레일과 레일 체결금구의 부식을 가속시키는 심각한 문제가 있다. 또한 전철 신호회로의 교란, 선택배류법 적용의 불가능, 간섭범위의 확대, 간섭의 악순환 등의 문제가 알려져 있다.



(a) 후대용 황산동 기준전극 대비
(b) IR-free 황산동 기준전극 대비

그림 12. 강제배류법 적용 하에서의 관대지 전위 변화

나. 배류전류 실태조사 및 분석

강제배류법에 의한 피해를 정량화하기 위해 부산지역에 설치된 14개 강제배류기에 대한 배류전류 측정을 수행하였다. 초당 4회의 빈도수로 24시간 동안 (오전 7시~익일 오전 7시) 데이터를 획득하기 위해 자체 개발한 누설전류 측정장치와 설치현장에 맞게 개선된 전류센서를 사용하였다.

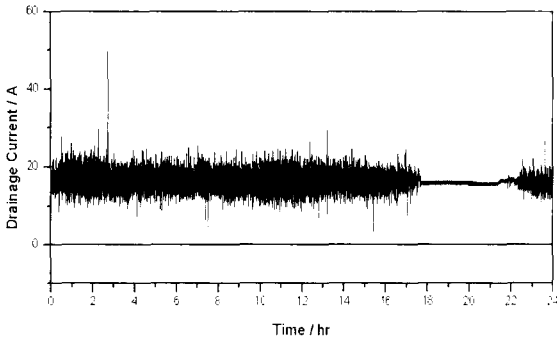
그림 14는 부산지역에 설치된 강제배류기의 전형적인 배류전류 변화를 24시간 범위 및 1시간 범위로 나타낸 것이다. 전철 운행에 의해 배류전류 자체가 크게 교란되고 있음을 볼 수 있는데 이로 인해 인근 매설배관의 관대지 전위의 교란도 발생하게 된다.

표 3 부산지역 14개 배류기 중 재측정 중인 1개소를 제외한 13개 배류전류에 대한 평균전류, 최대전류 및 연간부식량을 나타낸다.

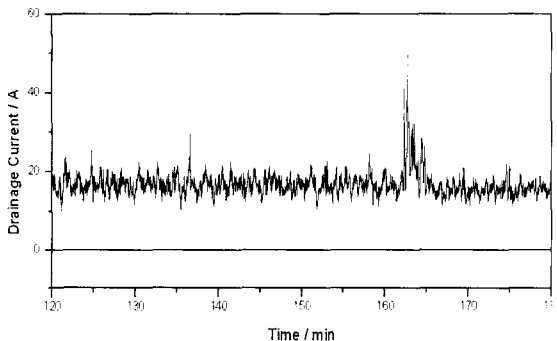
서울지역에 비해 누설전류의 크기가 상대적으로 작게 나타나지만 연간 1톤 이상의 레일이 부식으로 손상되고 있음을 알 수 있다. 이러한 피해를 최소화하기 위해 강제배류법을 대체할 수 있는 적절한 전식대책법이 개발되어야 할 것이다.

표 3. 부산지역 배류전류 분석

호선	No	배류형태	평균전류 [A]	최대전류 [A]	연간부식량 [kg]
1	1	강제	7.78	15.69	71.05
1	2	강제	14.24	39.05	129.97
1	3	강제	13.52	33.08	123.37
1	4	강제	16.18	49.72	147.68
1	5	강제	10.06	38.91	91.82
1	6	강제	7.56	44.37	69.00
2	1	강제	8.49	26.20	77.46
2	2	강제	6.67	17.64	60.83
2	3	강제	6.94	13.00	63.32
2	4	강제	3.52	9.23	32.10
2	5	강제	18.05	27.58	164.73
2	6	강제	5.10	30.42	46.55
2	7	강제	14.16	19.72	129.21
계			132.25		1207.09



(a) 오전 7시~익일 오전 7시



(b) 오전 9시~10시

그림 14. 부산지역 강제배류기의 배류전류 변화 양태

3. 결 론

본 글에서는 지하철 누설전류의 실태를 조사하기 위하여, 먼저 지하철 직류급전시스템의 누설전류에 대한 대책으로 현재 서울과 부산지역 지중 매설배관에 적용되어 있는 배류법에 대해서 실태조사를 수행하고 이를 분석하여 배류법에 의한 피해를 정량적으로 산출하였다. 주로 서울 1기 지하철(1~4호선)과 부산지하철 1, 2호선을 대상으로 배류기 출력전류, 컨버터 부극선 전류, 임피던스 본드 전류 및 지하철역사 주변 도시가스 배관의 주야간 P/S전위를 측정하였다. 그 결과 서울과 부산지역의 총 누설전류량은 각각 1,443[A]와 161[A]였으며, 이 양은 서울의 경우 지하철 레일이 매년 263미터씩 부식되어 없어지는 것을 의미한다.

특히 강제배류법은 선택배류법에 비해 10배 이상 레일의 전식을 일으키며 인접 시설물로의 간섭문제와 간섭의 악순환 문제를 야기시키고 있다. 따라서 지중 매설배관 및 금속시설물에 대한 총체적인 전식대책 마련이 시급한 것으로 판단된다.

그리고 지하철 직류급전시스템의 누설전류로 인해 인근 지중 매설배관의 관대지 전위가 교란되어 배관이 미방식 또는 과방식 상태에 놓이게 됨을 측정자료를 통해 분석하였다. 현재의 누설전류 대책으로 적용되어 있는 강제배류법은 관대지 전위를 일정정도 안정화시키는 역할을 하지만 레일과 레일체결금구의 전식 문제를 야기시키는데 부산지역의 전체 배류전류를 측정하여 현재 연간 약 1톤 이상의 레일이 부식될 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 강제배류법을 대체할 수 있는 적절한 전식대책법의 개발이 시급한 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 하윤철,배정효,하태현,이현구,김대경, “지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태조사”, 2003 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, pp. 373-375, 2003.

[2] 배정효,김대경,하태현,이현구,하윤철, “지하철과 전력선의 누설전류(stray current) 측정을 위한 저장형 data logger”, 대한민국 특허출원 제 2003-786004호, 2003.

[3] 배정효,김대경,하태현,이현구,하윤철, “지하철의 누설전류 측정센서”, 대한민국 실용신안 등록 제 0343324호, 2004.

[4] A.V. Abbott, “Electrolysis from Railway Currents”, Electric Railway Number of Cassier’s Magazine, 1899. Available online at <http://www.lrta.org/TA01.html>.

[5] M.J. Szeliga, “Stray Current Corrosion”, in: Peabody’s Control of Pipeline Corrosion, 2nd Ed., Ed. R.L. Bianchetti, NACE International, p. 211, 2001.

[6] M.J. Szeliga (ed.), Stray Current Corrosion: the Past, Present, and Future of Rail Transit Systems, NACE International, 1994.

[7] NACE Standard RP0169-2002, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, NACE, 2002.

[8] 하태현,하윤철,배정효,이현구,김대경, “IR Free 전극을 이용한 전위측정에 관한 연구”, 2003 대한전기학회 하계학술대회 논문집, D권, pp. 2735-2737, 2003.

◇ 저자 소개 ◇



이현구(李鉉求)

1971년 8월 8일생. 1995년 충남대 전기공학과 졸업. 1997년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 부산대 대학원 전기공학과 박사수료.

1997년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기동력학연구그룹 선임연구원.

E-mail : leehg@keri.re.kr