

지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태 분석(I)  
서울 지역

하운철, 하태현, 배정효, 김대경, 이현구  
한국전기연구원

Analysis of the Stray Current Conditions in Subway DC Electrification System (I)  
Seoul Metropolitan Area

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

**Abstract** - When an underground pipeline runs parallel with DC-powered railways, it suffers from electrolytic corrosion caused by the stray current leaked from the railway negative returns. Perforation due to the electrolytic corrosion may bring about large-scale accidents even cathodically protected systems. Traditionally, bonding methods such as direct drainage, polarized drainage and forced drainage have been used in order to mitigate the damage on pipelines. In particular, the forced drainage method is widely adopted in Seoul. In this paper, we report the analysis of the stray current conditions in Seoul subway DC electrification system.

1. 서 론

우리나라의 지하철은 1982년 서울지하철 2호선이 개통된 이래, 비접지식 레일의 대지와와의 불완전한 절연으로 인한 표유전류가 서울지역의 지중 금속시설물 뿐만 아니라 레일 자체의 전식 문제를 초래해 왔다. 이에 대한 대책으로 현재까지 국내에 광범위하게 적용되어 온 배류법은 지중 시설물과 레일 사이를 전기적으로 연결함으로써 표유전류가 대지로 유출되면서 발생하는 지중 시설물의 전식을 억제시키는 반면, 전철 신호 회로의 교란, 레일 전압의 상승 및 레일의 전식, 인접한 타 시설물과의 간섭 범위의 확대 및 간섭의 악순환, 과방식 등 여러 가지 문제를 안고 있다 [1].

국내에 적용되어온 배류법은 레일과 지중매설배관을 전기적으로 연결하고 전압 인가 없이 레일과 배관 사이의 전압차를 이용하여 선택적으로 누설전류를 귀환시키는 선택배류법(그림 1)과 레일과 지중매설배관 양단간에 전압을 인가하여, 배관으로 유입된 누설전류를 강제로 레일로 귀환시키는 강제배류법(그림 2)으로 대별된다. 전자의 경우 사이리스터를, 후자의 경우는 다이오드를 이용하여 배관으로부터 레일 방향으로 전류가 흐르도록 제어한다.

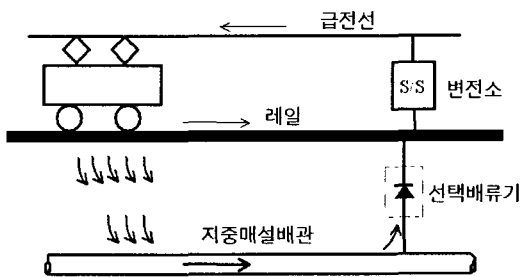


그림 1. 선택배류법의 원리

이러한 배류전류의 크기는 특히 레일의 부식속도와 직접적인 상관관계를 가지므로(패러데이 법칙) 배류전류의

크기를 측정하여 분석함으로써 현재 국내에서 발생하고 있는 배류법에 의한 피해를 정량적으로 산출할 수 있다.

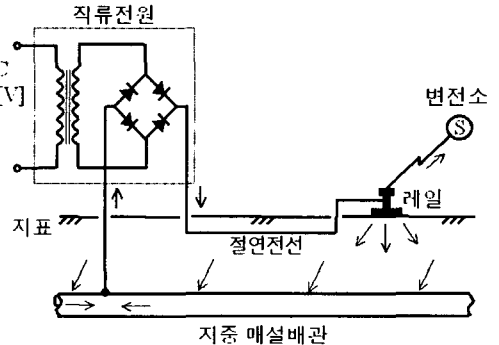


그림 2. 강제배류법의 원리

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

2. 본 론

2.1 배류기 현황

서울지역의 배류기 신설 현황은 그림 3에서 보는 바와 같이 지하철 노선의 신설 및 확장에 따라 지속적으로 증가되어 왔다.

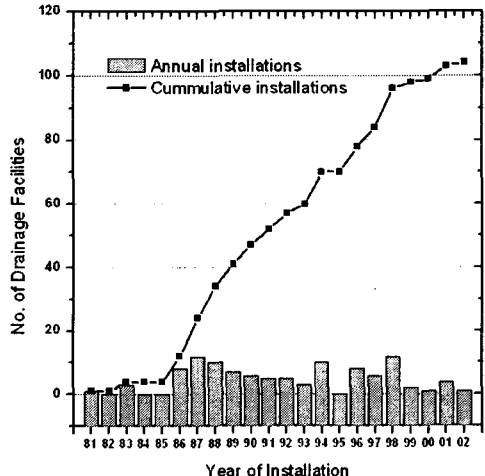


그림 3. 연도별 배류기 신설현황  
신설배류기의 형태는 선택배류기에서 강제배류기로 전환되어 왔는데, 80년대에는 주로 선택배류기를 설치하

였으나 간섭영향이 증가함에 따라 90년대 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 외부 전원법으로의 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

구분	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 표류전류 실태조사

### 2.2.1 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.

### 2.2.2 측정 방법

지하철 레일 및 배관의 상태에 따라 최대 200 A 이상의 표류전류가 배류기를 통해 흐르고 있는 서울지역의 배류전류를 측정하기 위해서, 누설전류측정장치 SCL-II [2]와 전류센서[3]를 배류기의 배관측 리드선에 설치하였다. 측정은 오전 7시부터 익일 오전 7시까지 24시간 동안 초당 4회의 빈도수로 수행하였다.

## 2.3 표류전류 실태 분석

그림 4는 서울 지하철 2호선 구간에 설치된 강제배류기의 전형적인 배류전류 양상을 나타낸다. 강제배류기는 배관과 레일 사이에 일정한 전압을 가해서 강제로 전류를 흘려주는 것으로 그림에서는 약 25 A의 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 표류전류가 배관을 타고 흘러 배류기를 거쳐 레일로 귀환하기 때문이다. 전철의 운행이 멈추는 밤 1시부터 새벽 5시까지(그림에서 시구간 18과 22 사이)는 강제배류기의 전원이 자동으로 차단되도록 일반적으로 설계되어 있으며, 그림에서는 새벽 4시까지 전원이 차단됨을 알 수 있다. 이때에는 전철 운행에 의한 표류전류가 없으므로 선택배류 회로를 통해 흐르는 전류도 0의 값을 가짐을 알 수 있다. 새벽 4시부터는 강제배류에 의해 약 25 A의 전류가 흐르다가 전철 운행이 시작되면 표류전류에 의한 전류교란이 발생함을 보이고 있다.

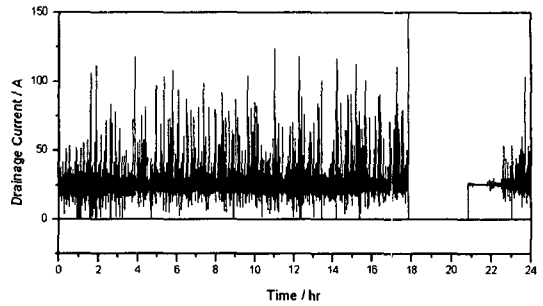


그림 4. 강제배류기의 배류전류 양태

그림 5는 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.

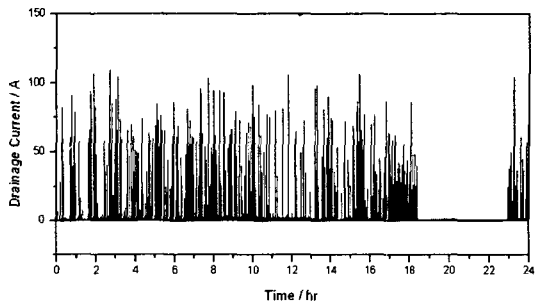


그림 5. 선택배류기의 배류전류 양태

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 연간부식량(m)을 계산할 수 있다.

$$m = M \times \frac{Q}{nF} = M \times \frac{I_{mean} \times 3600 \times 24 \times 365}{nF} \quad (1)$$

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. 표류전류에 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 경제적으로 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
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
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
합계			1111.74		10147.16

철의 부식량을 레일의 부식길이로 환산하면, 국내 레일의 표준 중량이 50 kg/m이므로 표 2의 배류기만을 고려하더라도 연간 약 203 m의 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.

### 3. 결 론

지하철 직류급전시스템의 표유전류에 대한 대책으로 현재 서울지역 지중 매설배관에 적용되어 있는 배류법에 대해서 실태조사를 수행하고 이를 분석하여 배류법에 의한 피해를 정량적으로 산출하였다. 특히 강제배류법은 선택배류법에 비해 10배 이상 레일의 전식을 일으키며 인접 시설물로의 간섭문제와 간섭의 역순환 문제를 야기시키고 있다. 따라서 서울지역의 지중 매설배관 및 금속 시설물에 대한 총체적인 전식대책 마련이 시급히 요청되고 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 하윤철,배정효,하태현,이현구,김대경, "지하철 직류 급전시스템의 표유전류 실태조사", 2003 대한전기학회 전력기술부흥회 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