



## 매설배관과 직류전기철도의 표유전류 간섭분석

†하윤철 · 배정효 · 하태현 · 이현구 · 김대경

한국전기연구원 지중시스템연구그룹  
(2006년 8월 2일 접수, 2006년 9월 18일 채택)

## Analysis of Stray Current Interference between Underground Pipelines and DC Electric Railways

†Y.C. Ha · J.H. Bae · T.H. Ha · H.G. Lee · D.K. Kim

Underground Systems Group, KERI  
(Received 2 August 2006, Accepted 18 September 2006)

### 요 약

가스배관, 상수관, 송유관 등의 지중 매설배관이 직류 전기철도와 인접해 있는 경우, 전기철도 시스템의 귀선 회로로 사용되는 레일에서 누설되는 표유전류에 의해 이들 금속배관에는 전기적 부식, 즉 전식이 발생할 수 있다. 전식에 의한 집중 부식은 전기방식으로 보호되는 배관에 있어서도 지속적인 재료의 열화와 이에 따른 파손을 일으킬 수 있어 대형사고로 발전할 소지를 가지고 있다. 국내에서는 이러한 표유전류에 대한 대책으로 배관과 레일을 전기적으로 접속하는 배류법이 적용되고 있는데 특히 가스배관을 중심으로 한 강제배류법의 급속한 증가에 의해 간섭문제가 매우 복잡해지고 있다. 본 논문에서는 직류전기철도시스템과 매설배관 사이의 전기적 간섭 문제를 서울과 부산 지역에서 수행한 현장 실태조사의 결과를 통해 살펴본다.

**Abstract**—When an underground pipeline runs parallel with DC electric railways, it suffers from electrolytic corrosion caused by the stray current leaked from the railway negative returns, i.e., the rails. Perforation due to the electrolytic corrosion may bring about large-scale accidents even under cathodically protected condition. Traditionally, drainage bonding methods have been widely used as a mitigation method for stray current interference. In particular, the increased adoption of forced drainage method to gas pipelines makes the interference much more sophisticated. In this paper, we analyze the electric interference between pipelines and railways from the results of field investigation carried out in Seoul and Busan.

**Key words** : Pipeline corrosion, Cathodic protection, Stray current interference, Electrolytic corrosion, Forced drainage, Polarized drainage

### I. 서 론

국내 대표적인 직류전기철도인 지하철(또는 도시철도)의 급전시스템은 1500 V DC로 구동되며 가공 급전선과 레일을 통한 귀환 회로로 구성된다. 즉 변전소 컨버터의 (+)극에서 급전선을 타고 전류가 흘러 전차를 구동시킨 후 레일을 통해 다시 변전소 컨버터의 (-)극으로 귀환되는 것이다. 그러나 레일의 길이방향 저항과 대지와의 불완전한 절연으로 전류의 일부가 대지로 빠져나갈 수 있는데 이러한 전류를 표유전류(stray current)라 한다. 표유전류는 인근 지중 금속시설물의 전식

(electrolytic corrosion 또는 stray current corrosion)을 포함하여 여러 가지 문제를 일으킬 수 있어 오랫동안 현안이 되어 왔다.

표유전류 현상과 이것이 끼치는 영향에 대해서는 이미 19세기 말 독일에서 보고된 바 있다[1]. 20세기 중반에 들어 표유전류의 지중 매설배관에 대한 간섭 문제가 심각하게 대두되면서 배관의 안전을 위한 몇 가지 대책들이 제시되었다. 이 중에는 현재 국내에 광범위하게 적용되고 있는 배류법이 있으며, 교차점에 희생양극을 설치하거나 코팅 또는 전기차폐를 사용하는 방법 등이 있다[2].

우리나라에서는 80년대 초까지 표유전류에 대한 구체적인 개념조차 없었으며, 1981년 직류전원을 사용한

†주저자:ycha@keri.re.kr

는 서울 지하철 2호선이 개통되면서 미육군 송유관과 서울 지하철 2호선이 교차하는 한강변 부근에서 지하철 누설전류가 송유관에 미치는 영향이 조사되었고, 그 결과 선택배류기를 설치한 것이 표유전류에 대한 인식과 대책의 시발점이 되었다. 이때부터 지하철의 영향을 받는 가스배관과 상수도관 등 지중금속시설물에 대한 배류법의 적용이 확산되었다. 1985년부터 강제배류법이 도입되면서 지하철과 인접한 매설 배관에 대한 표유전류 간섭대책은 현재까지 대부분 강제배류법에 의존하고 있다.

반면, 이러한 배류법은 비보호된 전철 신호 회로의 교란, 레일전압의 상승 및 레일의 전식, 비접지식 레일의 절연열화, 인접한 타 시설물로의 간섭 범위 확대, 경쟁적 출력 상승에 따른 간섭의 악순환, 과방식 등 여러 가지 문제를 안고 있어, 배류법을 대체할 수 있는 새로운 기술이나 표유전류를 원천적으로 감소시키려는 노력이 선진국에서는 큰 현안이 되어 있다[3-5].

본 논문에서는 서울 및 부산지역의 가스배관 및 상수도관과 지하철 레일간에 설치된 100여개 배류기의 운영현황을 조사하고, 전체 배류기의 배류전류를 동시에 측정, 분석하여 매설배관과 직류전기철도 간의 표유전류 간섭 실태를 정량적으로 해석함으로써, 향후 적절한 대책 수립에 활용코자 한다.

## II. 배류법 현황

### 2.1. 배류법의 원리

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

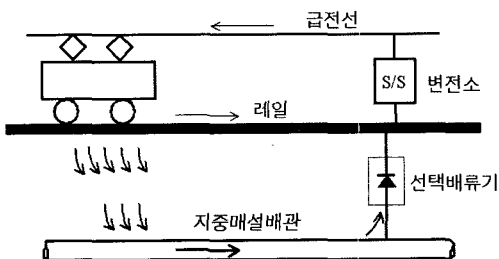


Fig. 1. A schematic of a polarized drainage.

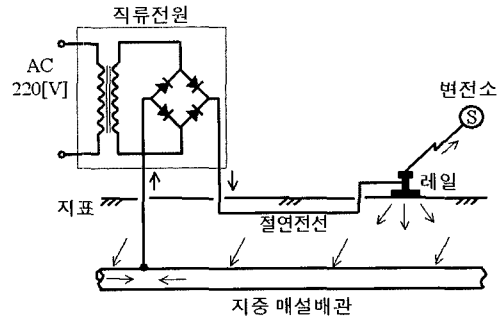


Fig. 2. A schematic of a forced drainage.

흐르도록 제어한다.

배류전류의 크기는 표유전류의 실태를 분석하는데 매우 유용한데, 특히 선택배류법의 경우 표유전류에 대한 회로저항을 약 1/2 정도로 줄어들게 하므로 이를 분석하여 전기철도가 매설배관에 미치는 간섭 정도를 유추할 수 있다. 또한 배류전류는 특히 레일의 부식속도와 직접적인 상관관계를 가지므로 배류전류의 크기를 측정하여 분석함으로써 현재 국내에서 발생하고 있는 표유전류의 간섭실태를 정량적으로 산출할 수 있다.

### 2.2. 배류법의 효과

지중 매설배관의 부식에 의한 손상을 예방하기 위해서는 배관과 배관이 접촉하는 토양 사이의 전위인 관대지 전위(P/S potential)를 황산동 기준전극 대비  $-0.850\text{ V}$  이하로 유지하는 것이 권장되고 있다[6]. 이때 이 전위는 적용 중인 전기방식(cathodic protection) 설비나 간섭원을 순간적으로 차단하고 측정해야 하며, 이를 분극전위(instant-off potential)라 한다. 간섭원이 직류전기철도인 동적 간섭지역에서는 사실상 분극전위를 측정할 수 없으므로 적당한 분극전극 또는 쿠펜법을 활용해야 하나, 국내 규정이 아직 보완되지 않아 산업계에서는 분극 전위를 고려하지 않는 한국가스안전공사의 전기방식 검사업무 처리지침[7]을 따르고 있다.

Fig. 3은 지하철 차량기지 인근 매설 가스배관의 관대지 전위를 황산동 기준전극에 대해 측정된 결과를 보여준다.

약 8분여 동안 측정된 자료에서도  $-18.5\text{ V}$ 와  $+12.5\text{ V}$  사이의 큰 전위교란이 일어나는 것으로 나타나는데, 실제로는 이러한 전위교란의 범위는 전압강하 성분을 제거해야 앞에서의 분극전위 기준을 적용할 수 있다. 그러나 전압강하를 고려하더라도 Fig. 3의 전위는  $-0.850\text{ V}$  이하로 전위를 유지하지 못하는 미방식 문제와  $-2.5\text{ V}$  이하의 전위로 과도하게 전위가 내려가는

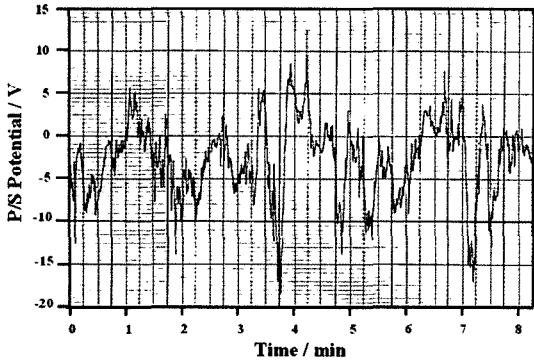


Fig. 3. The effect of stray currents on P/S potential of a gas pipeline.

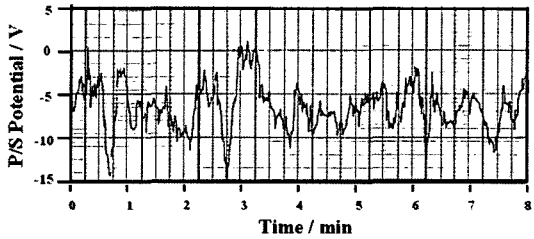


Fig. 4. Mitigation of stray current interference by forced drainage.

과광식 문제가 발생시킬 수 있음을 보이고 있다. 즉, 전자의 경우 배관이 부식되어 손상될 수 있으며, 후자의 경우 수분의 분해에 의해 발생한 수소가 금속 내부로 침투하면서 배관의 강도를 약화시키는 소위 수소취성 문제나 코팅손상을 야기할 수 있다.

Fig. 4는 강제배류기를 가동시켰을 때의 관대지 전위 변화를 나타낸다. -13 V와 1 V 사이에서 전위 교란이 발생하는 것으로 나타나고 앞의 Fig. 3과 비교할 때 표유전류에 의한 배관의 간섭영향은 배류법을 통해 어느 정도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 다만 국내에서는 분극전위에 대한 고려 없이 그림과 같은 전위변동의 상한값을 전위기준 -0.85 V 이하로 유지하기 위해 강제 배류를 과용하고 있는 상태이다.

**2.3. 배류기 적용현황**

서울지역의 배류기 신설 현황은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 지하철 노선의 신설 및 확장에 따라 지속적으로 증가되어 왔다.

신설 배류기의 형태는 선택배류기에서 강제배류기로 전환되어 왔는데, 80년대에는 주로 선택배류기를 설치하였으나 간섭영향이 증가함에 따라 90년대 이후 강제

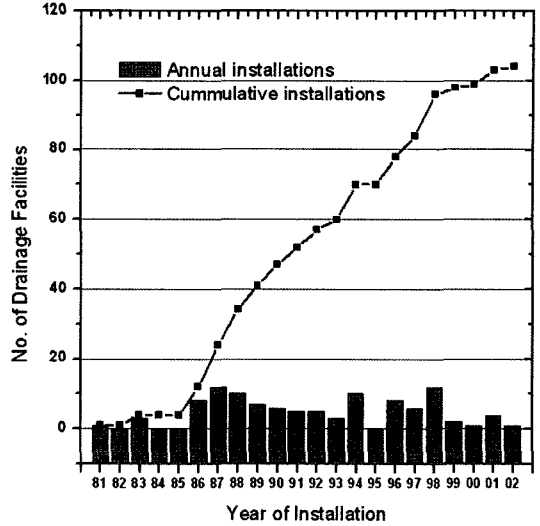


Fig. 5. Drainage facilities in Seoul by year of installation.

Table 1. Drainage facilities in Seoul and Busan (as of the end of 2003).

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
부산 1호선	0	7	7
부산 2호선	0	8	8
계	21	93	114

배류법의 적용이 증가하였고 기존에 설치되어 있던 선택배류기를 강제 배류기로 교체한 사례도 17건으로 조사되었다.

그러나 최근에는 배류효율의 저하 문제와 배류법의 위해성에 대한 인식이 증가하여, 기존 설비를 철거하거나 외부전원법으로 전환하는 사례도 알려지고 있다. 2003년 말 서울 및 부산지역 지하철 누설전류 현장 실태조사 과정에서 파악된 호선별 배류기 운영 현황을 Table 1에 나타내었다. 배류법이 적용되어 있는 시설물로는 가스배관이 83개소, 상수도배관이 24개소, 송유관이 5개소 및 지하철 측이 2개소로 조사되었다.

### III. 표유전류 실태조사

#### 3.1. 측정대상

배류기가 없는 상태에서의 레일 누설전류를 현장에서 직접 측정할 수 있는 효과적인 방법이 아직 마련되지 않은 가운데, 배관에 설치된 배류기의 배류전류가 레일에서 유출되는 전류의 총량과 동일하고 이 전류의 크기에 상응하여 타 시설물로의 간섭이나 레일의 전식이 발생하므로 배류전류의 양태를 측정하여 국내 표유전류의 실태를 분석하였다.

즉, 앞에서 조사된 114개소에 대해 운영 상태를 파악한 결과 운전보류 또는 고장수리 중인 15개소와, 미8군이 운영하고 있는 송유관 배류기 5개소 및 지하철 선로상에 설치되어 있는 1개소를 제외하고 93개 배류기를 대상으로 배류전류 측정을 시행하였다.

#### 3.2. 측정방법

지하철 레일 및 배관의 상태에 따라 최대 200 A 이상의 표유전류가 배류기를 통해 흐르고 있는 서울지역의 배류전류를 측정하기 위해서, 누설전류측정장치 SCL-II[8]와 전류센서[9]를 배류기의 배관측 리드선에 설치하였다. 측정은 오전 7시부터 익일 오전 7시까지 초당 4회의 빈도수로 수행하였다.

### IV. 표유전류 실태분석

#### 4.1. 배류전류의 양태

Fig. 6은 서울 지하철 본선 구간에 설치되어 있는 강제배류기 중 하나의 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 방지되는 효과를 갖

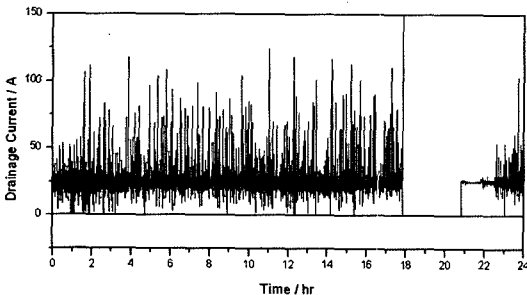


Fig. 6. A typical variation of forced drainage currents between subway rails and a gas pipeline.

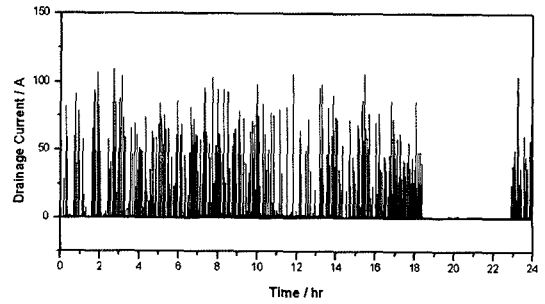


Fig. 7. A typical variation of polarized drainage currents between subway rails and a gas pipeline.

는데 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 표유전류가 배관을 타고 흘러 배류기를 거쳐 레일로 귀환하기 때문이다.

특히 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 표유전류가 없으므로 선택배류 회로를 통해 흐르는 전류도 0의 값을 가진다. 새벽 4시부터는 강제배류에 의해 약 25 A의 전류가 흐르다가 전철 운행이 시작되면 표유전류에 의한 전류교란이 발생함을 보이고 있다.

Fig. 7은 지하철 차량기지 인근에 설치된 선택배류기 중 하나의 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.

#### 4.2. 배류전류 분석

배류전류는 레일과 해당 배관에 인접한 타 시설물로 유입될 경우 그 유출지점에서 전식을 발생시킬 수 있으며, 특히 배관의 보호를 위해 적용되어 온 배류법이 레일의 절연 파괴를 가속시킬 뿐만 아니라 레일과 레일 체결금구의 전식문제를 야기시켜 간섭문제가 날날이 심각해지고 있다.

이러한 배류전류는 레일의 전식량과 직접적인 상관 관계를 갖는데 주성분인 철이 2가의 산화물 또는 이온으로 부식되는 것을 가정하면 측정된 배류전류를 적분

하거나 평균전류(I<sub>mean</sub>)에 시간을 곱하여 아래의 패러데이 법칙에서 연간부식량(m)을 계산할 수 있다[10].

$$m = M \times \frac{Q}{nF}$$

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

여기서

M: 철의 원자량(=55.8)

Q: 연간 전하량[C]

n: 철의 산화에 필요한 전자수(=2)

F: 패러데이 상수(=96485 C/mol)

즉, 1A의 전류가 1년간 흐를 경우 철은 약 9.12 kg이 부식함을 알 수 있다.

Table 2는 서울과 부산지역의 배류전류와 이에 상응하는 철(특히 레일체결금구)의 연간부식량을 분석한 것

**Table 2.** Analysis of drainage current and corresponding mass loss of iron.

(a) Seoul area					
호선	No	배류 형태	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

**Table 2.** Continued.

호선	No	배류 형태	평균전류 [A]	최대전류 [A]	연간부식량 [kg]
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

Table 2. Continued.

호선	No	배류 형태	평균전류 [A]	최대전류 [A]	연간부식량 [kg]
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

(b) Busan area

호선	No	배류 형태	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

이다. 표유전류에 의한 최대전류가 100 A 이상 되는 곳이 거의 절반에 이르고 있으며 국내 배류기의 80% 이상을 차지하고 있는 강제배류기에 의한 배류전류는 선택배류에 의한 배류전류에 비해 10배 이상의 누설전류를 발생시키고 있음을 알 수 있다.

강제배류의 또 다른 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.

## V. 결 론

국내 대표적인 직류전기철도인 지하철에 의한 매설 배관의 간섭문제는 세계적으로 유래를 찾을 수 없을 정도로 이미 심각한 상황에 이르고 있으며, 이에 대한 대책으로 지금까지 배관소유자가 적용해 온 배류법이 간섭을 더더욱 악화시키고 있어, 향후 직류전기철도-매설 배관 사이의 간섭문제는 양자 모두에게 더 큰 피해를 줄 수 있다. 이러한 문제는 선진국과 같이 유관기관 모두가 실질적으로 참여하는 전식대책위원회(electrolysis committee)가 설립되어야 해결 가능할 것으로 보인다. 아울러 관, 학, 연, 산의 긴밀한 협조 하에 최적의 대책 수립을 위해 노력해야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Abbott, A.V., "Electrolysis from Railway Currents", Electric Railway Number of Cassier's Magazine, (1899), Available online at <http://www.lrta.org/TA01.html>
- [2] Peabody, A.W., "Control of Pipeline Corrosion", 2nd ed., NACE International, (2001)
- [3] IEC 62128-2, "Railway Applications - Fixed Installations - Part 2: Protective Provisions against the Effects of Stray Currents caused by D.C. Traction Systems", International Electrotechnical Commission, (2003)
- [4] Szeliga, M. J., "Stray Current Corrosion - The Past, Present, and Future of Rail Transit Systems", NACE International, (1994)
- [5] 東京電蝕防止對策委員會, "新版 電蝕防止對策の手びき", 제 15판, 東京電蝕防止對策委員會事務局, (2005)
- [6] NACE Standard RP0169-2002, "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic

Piping Systems”, NACE, (2002)

- [7] 한국가스안전공사 지침번호 2305-01, “전기방식 검사업무 처리지침”, 한국가스안전공사, (2003)
- [8] 배정효, 김대경, 하태현, 이현구, 하윤철, “지하철과 전력선의 누설전류(stray current) 측정을 위한 저장형 data logger”, 대한민국 특허 10-0537899-0000,

(2005)

- [9] 배정효, 김대경, 하태현, 이현구, 하윤철, “지하철의 누설전류 측정센서”, 대한민국 실용신안 제 0343324호, (2004)
- [10] Uhlig, H.H., “Corrosion Handbook”, John Wiley & Sons, Inc., (1948)