

## 미주전류가 지하배관방식에 미치는 영향 진단

박 경 완 · 조 용 범 · 전 경 수 · 이 성 민 · 고 영 태

한국가스공사 연구개발원

### Evaluation of Stray Current Effect on The Cathodic Protection of Underground Pipeline

K. W. Park, Y. B. Cho, K. S. Jeon, S. M. Lee and Y. T. Kho

R&D Center/Korea Gas Corporation, 277-1 Il-Dong, Ansan, Kyunggi, Korea

Underground pipelines in metropolitan area are crossed or paralleled with street railways in some regions. Both poor bonding between rails and poor insulation of rails to the earth result in significant amount of stray current. In other words, some of the return current of railways enters the soil and finds a low-resistance path such as a buried pipeline. Then a buried pipeline undergoes corrosion damage at points from which this current is flowing out to soil. The popular evaluation method of corrosion activity in the pipeline which experiences the stray current is to measure the P/S(pipe-to-soil) potential. The P/S potential affected by stray current is deviated significantly from the mean value. Thus it is possible to quantify the activity of stray current with mean value and standard deviation. Simultaneous measurement of the R/S(rail-to-soil) potential and P/S potential is a good method to evaluate the activity. It is shown that the R/S potential varies symmetrically to the P/S potential when pipeline is affected by stray current. Simultaneous measurement of the magnitude and direction of the sheath current along pipeline results in information about the place where stray current entered in and escaped to soils.

#### 1. 서 론

지하에 매설된 배관들은 배관의 부식 방지를 위해서 여러가지 방법으로 방식을 행하고 있다. 가장 보편적인 방법은 배관의 외부에 피복을 하는 것으로 쿨타르, 폴리에틸렌(polyethylene : PE)등의 소재가 사용된다. 그러나 이러한 피복 소재들은 완벽한 절연체가 아니며 필연적으로 기공(pore), 물리적 손상부 등을 가지고 있다.

따라서 이러한 결함부를 보호하기 위해서는 전기 방식이 필요하다. 전기 방식법에는 금속의 자연적인 전위차를 이용하는 희생양극법과 정류기를 사용하여 인위적으로 전류를 가하는 외부 전원법이 있다.

가스공급관이나 송유관 같은 주요한 매설배관은 일차적으로 PE 코팅을 하고 이차적으로 전기 방식을 행하고 있다. 그런데 도심권에서는 방식의 변수로서 한 가지가 추가되는데 그것은

바로 타 배관 혹은 전철에 의한 간섭(interference)이다. 그 중 가장 중요하고 심각한 것은 전철로부터 유기되는 미주전류에 의한 간섭이다.

미주전류란 사용자가 흘러가기를 원하는 회로에서 절연 불량 등의 원인으로 주위의 매질(토양, 물 등)로 흘러들어난 누설전류를 칭하는 말이다. 이러한 누설전류가 매질내에 설치되어 있는 금속구조물(매설배관 등)에 들어가면 이 부분은 방식이 되나 흘러들어난 전류는 금속구조물을 타고 흐르다가 다른 부분에서 다시 매질로 빠져나가게 되며 그 부분의 금속구조물은 급격히 부식된다.

토양속에 존재하는 누설전류는 AC전류와 DC전류로 나눌 수 있는데 AC전류에 의한 부식손상은 DC전류에 의한 손상보다 훨씬 작고, AC에서도 주파수가 높을수록 그 손상율이 작아진다. Jones<sup>1)</sup>에 의하면 0.1N NaCl 수용액에서 60Hz, 300A/m<sup>2</sup>의 AC전류를 탄소강에 가하였을때 탄소강에 나타나는 부식의 손상은 거의 없는 정도라고 보고하고 있다. 일반적으로 60Hz AC에 의해 일어나는 금속손상은 같은 크기의 DC전류에 의한 금속손상의 1%이내라고 보고되고 있다.<sup>2)</sup> DC에 의해 미주전류를 일으키는 원인으로는 크게 지하철에 의한 영향과 절연조인트 전후에서 일어나는 미주전류를 나눌 수 있다. 이러한 미주전류에 대한 대책으로는 외부전원법, 선택배류법, 강제배류법 등이 현장에서 시행착오를 겪으면서 경험적으로 사용되고 있다.

이 연구에서는 지하철에 의한 미주전류의 영향을 받고 있는 지하 배관을 대상으로 미주전류에 의한 영향을 평가하는 방법을 현장에서 실측된 data를 분석하여 고찰해 보고자 한다.

## 2. 지하철 미주전류의 평가

Fig. 1은 지하철과 평행하게 매설된 배관에서 지하철에서 흘러나온 미주전류와 배관과의 관계를 보여 주고 있다. 지하철의 상부라인을 타고

은 전류는 지하철의 모터를 구동시키고 rail을 통하여 다시 돌아가게 된다. 그러나 rail 궤도가 전기적 접촉이 불량하고 rail과 토양 사이도 확실하게 절연되어 있지 않으면 되돌아가던 전류 중 일부는 매설배관과 같은 더 낮은 저항의 통로를 찾아 토양중으로 흘러나가 매설배관으로 들어오게 된다. A 지점에서는 rail의 전위가 배관의 전위보다 높아 전류가 배관으로 유입되어 배관이 방식되고 있으므로 아무런 문제도 일어나지 않으나 B의 경우에는 배관의 전위가 rail보다 높아 배관이 양극화되어 전류가 흘러나간다. 즉 배관이 부식되어 심각한 문제를 야기시킨다.

Fig. 2는 새벽에 전철이 운행하기 전과 전철이 운행하기 시작할 때의 배관의 pipe to soil 전위(이하 P/S전위)를 시간에 따라 측정하여 도시한

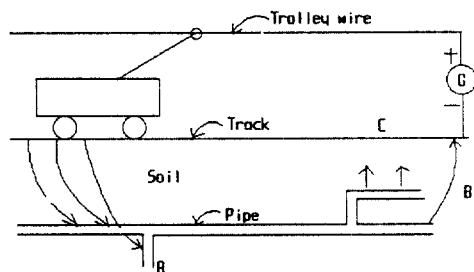


Fig. 1. Stray-current corrosion of buried pipe

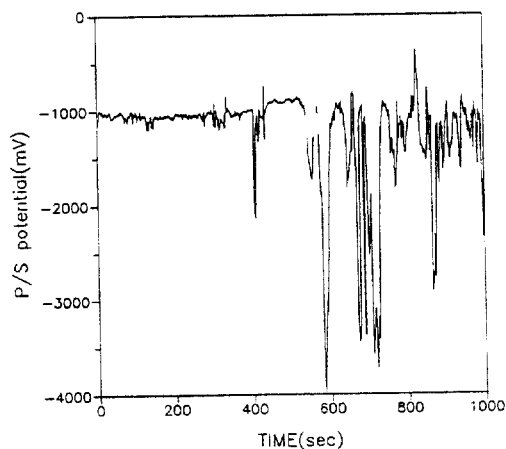


Fig. 2. P/S potential VS Time

것이다. 전철이 운행하기 전에는 전체적으로 거의 변동이 없이 일정한 전위를 나타내다가 전철이 운행하기 시작하면서 심하게 전위 변동이 나타나 배관이 전철에 의한 간섭을 받고 있음을 알 수 있다. 본 그림에서 보이는 것은 전류가 유입되는 곳에서 측정된 데이터로 전위가 충분히 낮아져 방식되고 있지만 유입된 전류는 어딘가에서 유출될 것임을 쉽게 예측할 수 있다.

2.1 P/S 전위에 의한 진단

매설배관에 미주전류에 의한 부식의 활동도(activity) 평가 방법으로 가장 보편적인 것은 P/S 전위이다. P/S전위의 측정은 기준전극(Cu/CuSO<sub>4</sub> 전극)을 토양표면에 대고 전위차계의 양극선을 약 1.5m깊이로 매설되어 있는 배관과 전기적으로 접촉시켜 배관의 전위를 측정한다. 따라서 P/S전위는 배관표면의 전위와 배관 표면과 기준전극까지의 토양에 의해 만들어지는 IR Drop을 포함한 값이다. Fig. 1에서 살펴보았듯이 배관으로 전류가 흘러들어 오는 곳은 P/S전위가 낮으며 전류가 흘러나가는 곳은 P/S전위가 높아진다. 그러나 전철의 이동에 의하여 한 지역의 전위는 일정하지 않으며 불규칙적으로 변화한다. 따라서 미주 전류의 영향을 받고 있는 지역에서의 배관의 P/S전위를 단순히 특정한 대표값(예: 평균 전위값)으로 표시하는 것으로는 미주 전류의 영향을 정확하게 표현할 수 없다<sup>3-5)</sup>.

Fig. 3은 시간에 따른 P/S전위의 변화를 도시하여 이를 유형별로 분류한 것인데,  $\bar{E}$ 는 평균전위이고  $E_s$ 는 자연전위로  $E_s$ 보다 높은 전위에서는 부식이 발생하고  $E_s$ 보다 낮은 전위에서는 부식이 일어나지 않는 임계전위이다. (a)의 경우 모든시간에서 부식이 일어나고 있으며 (b)의 경우는 전시간의 전위가  $E_s$ 보다 낮으므로 부식이 전혀 일어나고 있지 않다고 간주할 수 있다. (c)와 (d)의 경우는 그 평가 방법이 그리 간단하지 않다. 즉 단순히 평균 전위값이  $E_s$ 보다 낮

다고 그 배관이 안전하다고 평가할 수는 없다.

Fig. 4는 지하철 간섭이 심한 일부 배관에서 1초의 주기로 약 20분 동안 측정된 P/S 전위값을 전위가 나타난 횟수에 대하여 도시한 분포도로 평균을 중심으로 가장 많은 빈도수가 나타나고 평균에서 멀어질수록 빈도수가 적어지는 불규칙 변수로 정규 분포와 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 불규칙분포를 따르는 전위값은 평균과 표준 편차로 정량화할 수 있다<sup>3-5)</sup>.

$$\bar{E} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E(t)dt \tag{1}$$

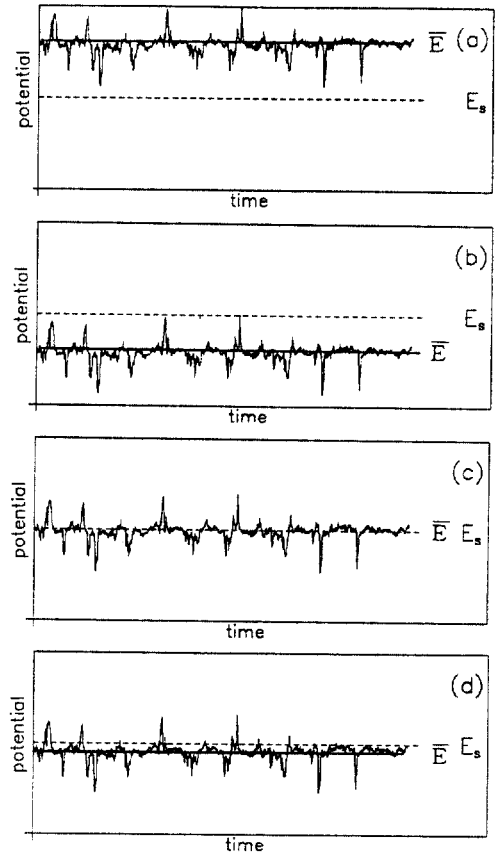


Fig. 3. Pipeline random potential changes(polarization)

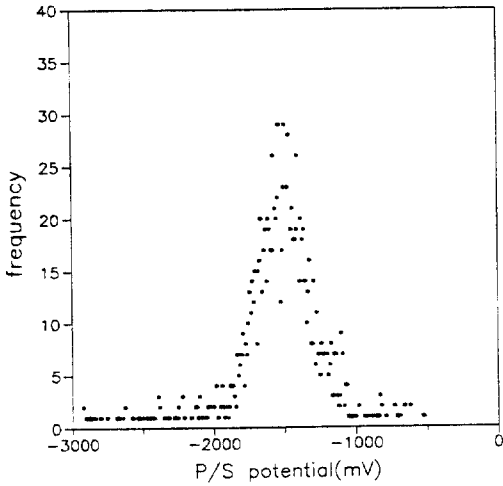


Fig. 4. Distribution of P/S potential data

$$s^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |E(t) - \bar{E}|^2 dt \quad (2)$$

여기서 T는 P/S전위를 측정된 전체시간이다.

Fig. 3의 c), d)의 경우 미주 전류에 의한 부식의 활동도는 다음과 같은  $\gamma$ 를 도입하여 정량화 할 수 있다<sup>3)</sup>.

$$D\left(\frac{\bar{E} - E_s}{s}\right) = P(E(T) > E_s) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_a}{T} = \gamma \quad (3)$$

여기서  $T_a$ 는  $E(t) > E_s$ 인 시간의 합이다. W. Sokolski에 의하면  $\gamma$ 가 0.2 이상이면 배관에 부식이 일어나기 시작한다고 보고하고 있다<sup>3)</sup>.

본 공사 배관에서의 측정된 P/S전위값의 평균과 표준 편차를 Table 1에 나타내었다. 이때 전체 측정시간 T는 약 20분이며 A-E는 서울에서 미주전류의 영향을 받고 있는 임의지역을 의미하며 방식을 행하고 있는 상태이다.  $E_s$ 는 부식이 일어나기 시작하는 임계전위인데 본 연구에서는

일반적인 steel 배관의 방식기준전위인 -850mV를  $E_s$ 로 보았다. 방식에 의해 평균 전위값들은 낮으나 표준 편차값이 커, 지하철에서 흘러 나오는 미주 전류의 영향을 아주 많이 받고 있음을 알 수 있으며  $\gamma$ 는 0.2보다 아주 작아 방식이 잘 이루어짐을 보여주고 있다. 그러나 방식을 하지 않았을 때의 A, B지역에서의 측정치인 A', B'에서는 평균전위값이 방식 기준치보다 높고 표준편차도 커 부식활동도인  $\gamma$ 가 0.2보다 훨씬 크게 나온다. 따라서 이렇게 계속 방치하면 부식이 발생할 것은 자명하다.

2.2. R/S(rail to soil)전위, P/S전위에 의한 진단

Fig. 1에서 살펴 본 것처럼 전철에서 흘러나온 미주전류는 배관을 통해 흘러 다시 전철 rail로 돌아간다. 이때 배관과 rail의 전위관계는 미주전류를 이해하는 중요한 변수이다. 먼저 rail에서 배관으로 전류가 흘러들어올 때는 R/S전위는 높은 전위를 가지고 P/S전위는 낮은 전위를 유지한다. 즉 rail은 양극, 배관은 음극이 되어 전위가 높은 양극에서 전위가 낮은 음극으로 전류의 흐름이 생긴다. 반대로 R/S전위가 낮고, P/S전위가 높으면 rail은 음극, 배관은 양극이 되어 전류는 배관에서 토양을 통하여 rail로 흘러간다.

Fig. 5는 지하철역이 인근한 지역에서 측정된 시간에 따른 R/S전위, P/S전위의 관계를 나타낸 것으로 rail의 전위거동과 배관의 전위거동이 대체적으로 반대로 이루어짐을 볼 수 있다. 즉 이 지역에서는 지하 배관, 전철에서 흘러나온 미주전류의 영향을 받고 있음을 R/S전위와 P/S전위를 동시에 측정함으로써 알 수 있다.

또 하나 고려해야 할 사항으로 R/S전위의 크

Table 1. List of Mean Value and Standard Deviation of P/S Potential in Underground Pipeline

	A	B	C	D	E	A'	B'	비 고
E(mV)	-1651	-1455	-1524	-1233	-1529	-288	-813	
S	385	342	400	240	288	334	307	
$\gamma$	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.95	0.56	

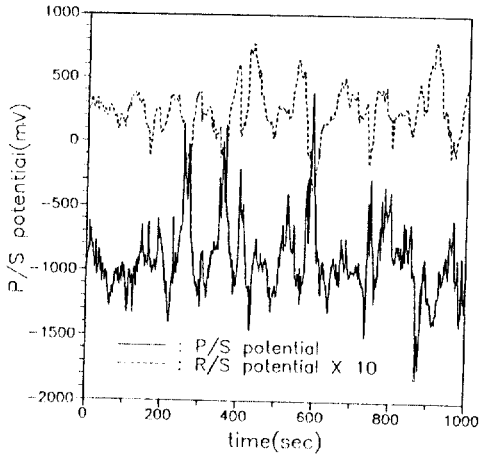


Fig. 5. Comparison between P/S potential and R/S potential at Sillim station

기가 있는데 현재 측정된 2호선 및 3호선에서 R/S전위가 대략적으로 수십 volt이며 순간적으로는 100volt 가까이 올라가기도 한다. 미주전류의 영향을 줄일 수 있는 가장 근본적인 처방은 rail과 토양과의 절연을 확실히 하는 것이라는 것을 고려해 볼 때 서울 도심권 전철의 절연성은 아주 불량이라고 판단되고 DC 100volt 정도의 R/S전위는 심각한 문제라고 생각된다.

2.3 R/P(rail to pipe)전위차와 P/S전위의 측정

R/P전위차와 P/S 전위를 동시간에 측정하는 것도 지하철에 의한 미주전류의 영향을 진단하는 좋은 방법이다. R/P전위차는 rail을 기준으로 측정하였다. Fig. 1.에서 살펴보면 rail의 전위가 배관의 전위보다 높으면, 즉 R/P전위차가 음이면 rail에서 배관으로 전류가 흘러나가며 동시에 배관의 P/S 전위는 음이 된다. 한편 rail의 전위가 배관의 전위보다 낮으면, 즉 R/P 전위차 양이면 배관에서 rail로 전류가 흘러 들어가며 배관의 P/S 전위는 상승한다. Fig. 6은 이러한 경향을 보여주는 전형적인 예이다.

2.4. 전류의 방향과 미주전류의 유출입

배관에서 흐르는 전류의 방향을 측정하는 방

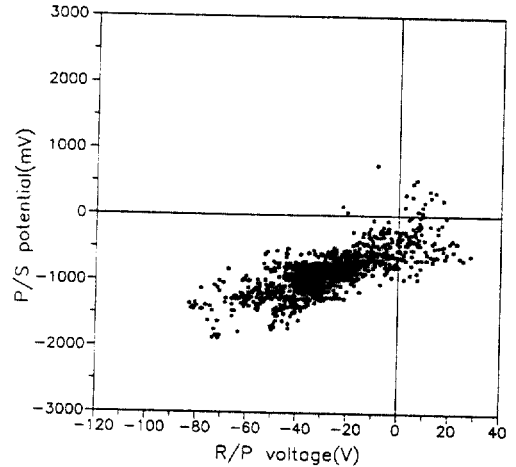


Fig. 6. P/S potential vs R/P voltage at sillim station

법도 미주전류의 영향을 평가할 수 있는 좋은 방법이다<sup>6)</sup>. 즉, 일정한 거리를 두고 여러 곳에서 동시에 배관에 흐르는 전류량 및 전류 방향을 측정하면, 어느 곳에서 전류의 유출입이 있는지 알 수 있다. Fig. 7 a)와 같은 경우는 전류의 방향은 같지만 그 크기가 달라 전류가 유출이 되고 있음을 알 수 있으며, b)의 경우는 전류의 유입이 있음을 알 수 있다. c), d)의 경우는 흐르는 전류의 방향이 달라 c)에서는 전류의 유출이, d)에서는 전류의 유입이 일어나고 있다. 본 배관에서는 Fig. 7과 같이 전류가 유입되고 유출되는 곳이 단순하지는 않으며 이의 분석을 위해서는 통계적인 처리가 필요하다.

흐르는 전류량의 방향과 크기에 대한 측정은 다음과 같은 방법으로 이루어졌다. 도심지에 있는 당공사 배관의 전위 측정단자함(Test Box, 이하 T/B)는 대략 150m 정도의 거리를 두고 존재하는데 T/B에서 배관과 연결된 선을 다음 T/B까지 연장하여 그 중간에 전압계를 달아 전위차를 측정한다. 배관을 따라 흐르는 전류, 배관의 금속 저항 및 측정된 전위차는  $V=IR$ 의 관계를 가지며 배관의 길이가 일정하면 R은 일정하므로 측정된 전위차는 곧 전류량과 비례한다.

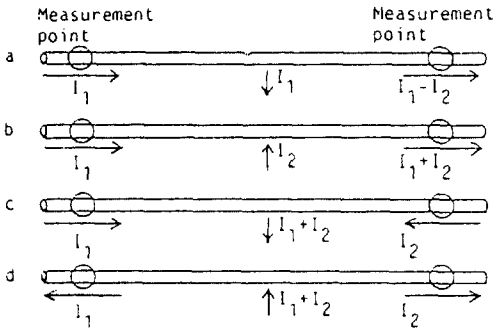


Fig. 7. Measuring of magnitude and direction of sheath current

Fig. 8은 당공사 배관에서 측정 한 한 예로, T/B 4~T/B 5 사이와, T/B 15~T/B 16 사이의 두곳에서 동시에 전류량 및 전류 방향을 측정 한 결과이다. 측정시에 T/B 번호가 낮은 쪽을 기준으로 하였다. 그래프에서 X, Y축의 단위는 mA × C인데 C는 배관의 길이가 일정하다는 가정하에 일정한 배관저항 R에 해당되는 상수이다. 따라서 그래프상의 수치는 실제 측정치인 전위차 (mV)이다. 데이터가 1/4분면에 위치하면 T/B 5에서 T/B 4로 전류가 흐르고, T/B 16에서 T/B 15로 흐르므로 두 측정지점에서 흐르는 전류의 방향은 같다. 데이터가 3/4분면에 있으면 두 곳에서의 흐르는 전류의 방향이 같으나 그 방향은 1/4분면과 반대이다. 그런데 데이터가 2/4분면에 위치하면, T/B 4에서 T/B 5로 전류가 흐르고 T/B 16에서 T/B 15으로 전류가 흐르므로 두 측정 지점에서 전류의 방향이 가운데로 집중되어 T/B 5와 T/B 15 사이에 전류가 배관에서 토양으로 흘러나가는 지점이 있다는 것을 의미한다. 반대로 데이터가 4/4분면에 위치하면 두 측정 지점 사이에 전류가 흘러 들어오는 곳이 있음을 의미한다. Fig. 8의 경우 데이터가 1/4분면과 3/4분면에 위치하며 전류량의 크기가 거의 같으므로 T/B 5와 T/B 15 사이에는 뚜렷한 미주전류의 유출입이 없음을 알 수 있다. Fig. 9에서는 데이터의 대부분이 2/4 분면에 위치하여 전류의 방향은 같으나 T/B 27에서 T/B 28로

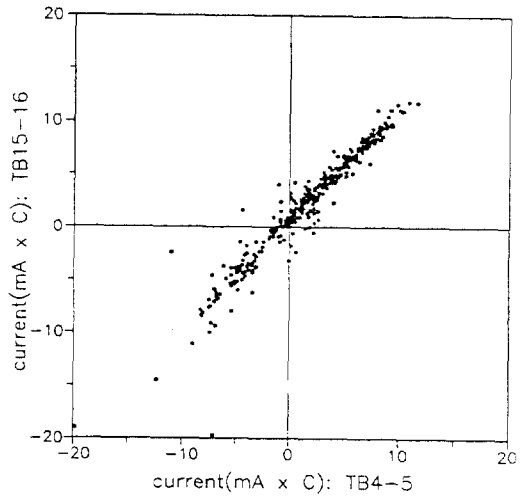


Fig. 8. Current direction between TBS(4-5, 15-16)

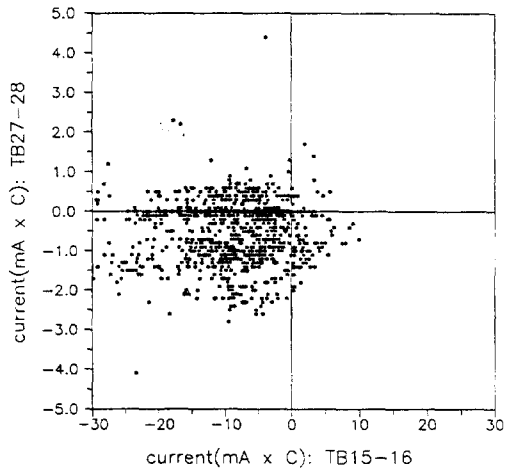


Fig. 9. Current direction between TBS(15-16, 27-28)

흐르는 전류량이 T/B 15에서 T/B 16으로 흐르는 전류량에 비하여 현격하게 작아 중간에 전류가 토양으로 흘러 나가는 지점이 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 전체적으로 데이터가 오른쪽으로 이동하여 T/B 39와 T/B 43사이에 전류가 흘러 들어오는 곳이 있음을 보여 준다. Fig. 11은 전체적으로 왼쪽으로 이동하여 T/B 2와 T/B 19사이에 전류의 유출이 있는 곳이 있음을 보여 준다.(이 그래프의 측정배관라인은 Fig. 8-10을

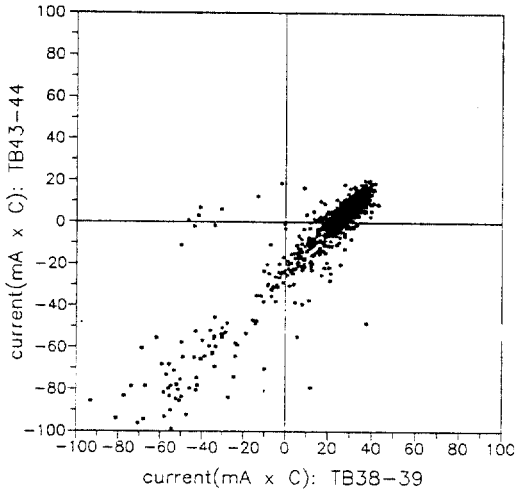


Fig. 10. Current direction between TBS(38-39, 43-44)

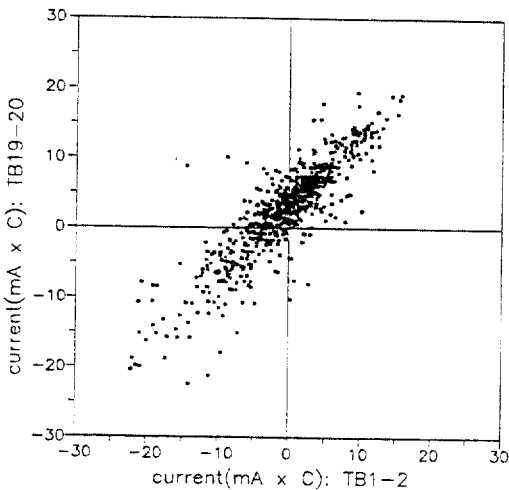


Fig. 11. Current direction between TBS(1-2, 19-20)

측정한 배관라인과 다른 지역의 라인이다.)

### 3. 결 론

본 연구에서는 당 공사 매설배관 및 기타 다른 지하배관의 부식 문제에 중요한 변수인 전철에 의한 미주전류를 진단·평가하는 방법에 대하여 현장 데이터를 중심으로 접근하여 보았다.

미주전류의 영향을 받고 있는 곳에서 배관의 P/S 전위는 random 변수 양상을 보여 평균값과 표준 편차로 정량화할 수 있었으며 동시간대에 측정된 R/S전위와 P/S전위가 대칭형을 이루는 것으로 P/S전위가 큰 편차를 가지는 원인이 전철에 의한 미주전류라는 것을 알 수 있었다. 두 측정 지점에서 배관을 따라 흐르는 전류의 방향 및 크기를 측정하는 방법은 미주전류의 유출입 경향을 효과적으로 파악할 수 있었다.

전체적으로 정확히 미주전류의 영향을 진단하고 대책을 세우기 위해서는 이상과 같은 방법 중 어느 하나에 의존하지 말고, P/S전위를 측정하여 방식상태를 파악하고 R/S전위와 P/S전위를 동시에 측정하여 미주전류가 어떤 지하철과 관련이 있는지 파악하며, 전류의 방향을 측정하여 미주전류의 유출입 상태를 파악하는 등 여러 가지 방법을 사용하여 종합적으로 진단하여야 미주전류에 대한 정확한 대책을 세울 수 있다. 더불어 문제의 근본 원인인 지하철 rail과 토양과의 절연 불량에 대한 주의가 환기되어야 한다.

### 참 고 문 헌

- 1) D. Jones, *Corrosion*, **34**, 428 (1978)
- 2) Scoft P. Ewing, in *Corrosion Handbook*, p. 601-606.
- 3) R. Juchniewicz and W. Sokolski, *Metallic Corrosion 8TH in T. Congress on Metallic Corrosion*, Vol. II. Germany, p.1159 (1981)
- 4) W. Sokolski, *B. Electrochem.* **3(6)**, 643 (1987)
- 5) R. Juchniewicz and W. Sokolski, *Materials Performance*, **24**, 26 (1985)
- 6) Kurt Lundquist and Bernt Farneby, 10th Scandinavian Corrosion Congress, Stockholm, p. 333-337 (1986)