



## 전기철도와 평행한 매설배관에서 누설전류에 의한 간섭현상의 수치해석적 연구

†정찬웅 · 최규형

서울산업대학교 철도전문대학원

(2008년 8월 18일 접수, 2008년 10월 22일 수정(1차), 2008년 10월 28일 수정(2차), 2008년 10월 28일 채택)

## Numerical Analysis of the Interference of the Buried Pipeline due to the Stray Current from the Parallel Electric Railway

†Chan Oong Jung · Kyu Hyoung Choi

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 18. August. 2008, Revised(1st) 22. October. 2008, Revised(2nd) 28. October. 2008, Accepted 28 October. 2008)

### 요 약

전기철도의 궤도 누설전류는 주변 시설물 뿐 만 아니라 궤도 및 부속물의 전식을 일으킬 우려가 있다. 최근에는 누설전류의 영향을 감소시키기 위한 많은 노력이 기울여지고 있다. 본 연구에서는 수치해석 방법을 통하여 궤도와 매설배관의 이격거리, 토양비저항, 배관의 피복저항율, 궤도의 접지저항 등의 요인에 따른 간섭영향을 정량적으로 평가하였다. 이러한 정량적 연구결과를 토대로 주요 변수에 따른 간섭현상의 변화 방향을 예상할 수 있었으며 향후 대책의 수립과 수치해석에 있어서 각 변수의 민감도를 예상할 수 있었다.

**Abstract** – The stray current interference problem could induce the corrosion of near-by structure and rail itself. Many efforts has been concentrated on the reduction of the interference. In this work the influences of separation distance, soil resistivity, pipe coating resistance, leak resistance of rail were studied using the numerical analysis methods. These analysis could be used to estimate the sensitivity of each variables in the study of the mitigation method and their numerical analysis.

**Key words** : stray current, interference, rail, numerical method, BEM

### I. 서 론

전기철도의 궤도 누설전류는 주변 시설물 뿐 만 아니라 궤도 및 부속물의 전식을 일으킬 우려가 있어 이에 대한 많은 대책이 강구되고 있다[1]. 전기철도의 누설전류는 교류인 경우보다 직류의 경우 야기되는 부식 문제가 더욱 심각하다. 최근에는 높은 토크의 모터를 사용할 수 있는 직류 전력이 전기철도에 채용되는 비중이 점차 높아지고 있다. 전철역의 간격이 좁아지는 경우 토크의 중요성은 더욱 커져 도심권 전기철도에서의 직류사용 빈도가 더욱 높다.

전기철도의 전류누설에 대한 인식이 높지 않았던 시기에는 감전에 대한 위험을 방지하기 위하여 음극선으

로 이용되는 레일이 별도의 절연조치 없이 접지되거나, 변전소에서 접지망에 연결되어 접지된 레일을 따라 많은 전류가 대지로 유출되는 상황이 초래하였다. 누설전류의 크기는 귀로의 접지저항과 관련된다. 접지되는 레일의 경우 접지저항은  $10 \Omega/300 \text{ m}$  이하로 나타나는 것이 일반적이다.

최근에는 전기설비기술과 레일 절연기술의 발전으로 인하여 이러한 간섭문제가 획기적으로 개선되고 있다. 새로운 설비기술로는 초고속의 전류차단장치와 고전압 감시장치를 이용한 무접지식 전원공급장치의 보급이 두드러진다[2]. 변전소의 전류차단장치는 전류의 흐름을 감지하여 비정상적인 전류흐름이 감지될 때 고속으로 전류를 차단하여 위험한 수준으로 전압이 상승하기 전에 전류를 차단할 수 있다. 또한 고성능의 과전압 차단장치의 사용으로 인하여 궤도를 평상시에는 비접지

†주저자:chan56@seoul.go.kr

로 운용하다가 고장발생 시에만 순간적으로 접지시키는 방식으로 변화하고 있다. 트랙의 공법에 있어서도 고저항율의 절연재질 적용 등을 통하여 250 Ω/300 m 이상의 저항을 얻을 수 있게 되었다.

전기철도에서의 누설전류 발생에 의한 전기부식은 레일의 접지저항이외에도 철도와 배관의 거리, 토양비저항, 배관의 피복상태 등 아주 다양한 원인들에 의하여 영향을 받을 것이나 이러한 요인들에 대한 정량적인 평가는 충분히 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 수치해석 방법을 통하여 이러한 인자들이 간섭현상에 미치는 영향들을 정량적으로 평가하고자 하였다.

## II. 누설전류의 수치해석 모델링

누설전류의 발생과 이로 인한 매설배관의 간섭은 금속구조물의 기하학적인 배치와 토양을 통한 전도, 계면에서의 전극반응에 의하여 지배된다. 이러한 시스템을 수치적으로 해석하기 위한 연구는 국내에서도 많이 시도되었다[3,4]. 본 연구에서는 경계요소법(BEM, Boundary Element Method) 패키지인 Catpro(Elsyca사, Belgium)을 사용하였다. 본 프로그램에서 모든 요소는 pipe-element(1차원적인 요소)를 사용하여 해석되며 모델링의 대상이 되는 배관, 레일 등 구성요소에 대하여 길이방향의 선형저항과 누설저항(저항/단위길이)으로 정의된다. 매설배관 표면의 전기화학 반응은 선형분극 저항을 적용하였다. 전해질 내부에서는 Laplace 식을 해석하는 전기장 해석이 이루어진다[5]. 아래의 Fig. 1은 누설전류의 발생기구를 보여주고 있다. 변전소에서 공급된 전류가 전동차를 지나 궤도를 통하여 돌아오는 경로를 보여주고 있다. 이 때 궤도에서 누설된 전류 중 일부가 매설배관에 유입되었다가 변전소 인근에서 다시 유출되는 현상에 의하여 간섭현상이 발생하게 된다.

간섭의 정량적 해석은 5 km의 직선궤도와 이와 평행한 매설배관을 모델로 하여 수행하였다. 전동차가 5 km 선로의 중심에 있고 변전소가 구간의 오른쪽 끝에 위치하는 경우를 가정하였다. 별도의 변전소 접지는 고려하지 않았다. 다음의 Fig. 2는 이 모델에서의 토양중의 전류 흐름을 보여주고 있다. 전동차를 중심으로 좌측에

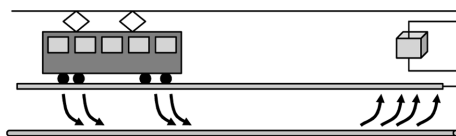


Fig. 1. Schematic diagram of interference.

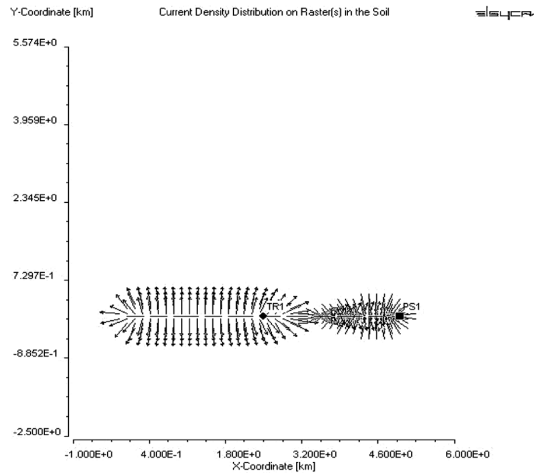


Fig. 2. Current distribution along the rail.

Table 1. List of important variables in the calculation model.

operation voltage	train resistance	wire resistance
1500 V	1 Ω	48.6 mΩ/km
rail resistance	rail leakage resistance	soil resistivity
26 mΩ/km	15.7 ohm/km	100 Ω·m

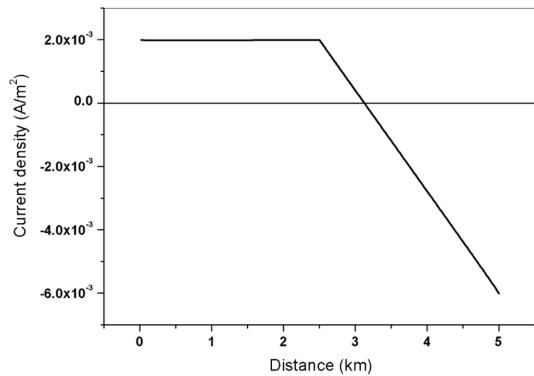


Fig. 3. Current density profile from the rail.

서는 전류의 유출에 의하여 토양 전위가 상승하고 있으며 변전소 인근에서 전류의 유입에 의하여 토양전위 하강이 관찰된다. 이 계산에 사용된 각종 인자는 아래의 Table 1과 같다.

레일을 따라 유출입되는 전류의 프로파일을 도시하여 보면 Fig. 3과 같이 전동차의 좌측에서는 일정한 전류밀도의 유출(‘+’ 전류밀도)이 발생하며, 전동차의 우

**Table 2.** Pipeline characteristics.

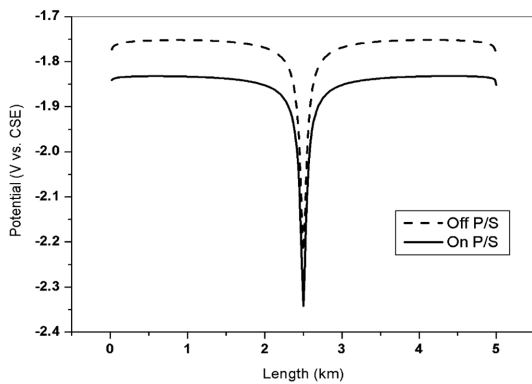
distance	diameter and thickness	axial resistance	coating resistance	polarization
30 m	0.5 m 1 cm	6.4 mΩ/km	231 Ω·m <sup>2</sup> (in 100 Ω·m soil)	100 Ω·m <sup>2</sup> (linear)

측부에서 유출전류가 감소하여 유입(‘-’ 전류밀도)으로 바뀌며 변전소 지점에서 최대 유입전류밀도가 나타남을 볼 수 있다. 유입전류는 배관 표면에서의 환원반응을 일으키므로 배관의 과방식을 유발할 수 있으며, 유출전류에 의해서는 산화반응에 의한 배관의 부식이 발생할 수 있다.

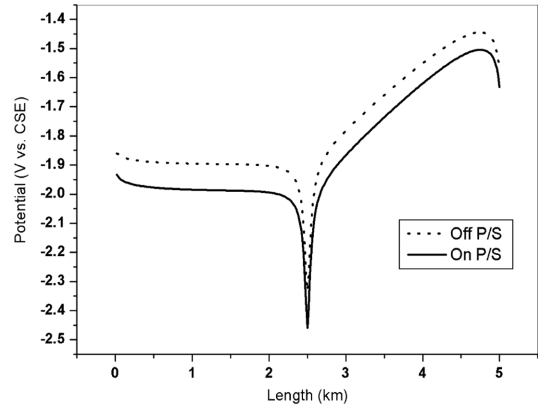
이러한 누설전류에 의하여 인접배관에 유기되는 간섭을 살펴보기 위해 철도와 평행한 매설배관에 대한 영향을 살펴보았다. 철도와 평행한 매설배관의 특성은 아래의 Table 2와 같다.

계산에 있어 주요 변수는 배관피복의 저항율은  $1 \times 10^6 \Omega \cdot m$ , 피복두께는 5 mm로 하였다. 피복이 1%의 피복손상율을 갖는 것으로 하였으며, 손상부 내부의 저항율은 토양비저항의 10%로 하였다. 손상부는 직경 3 cm의 손상부가 균일하게 분포한 것으로 가정하였다. 피복저항은 토양비저항에 따라 변화하는데  $100 \Omega \cdot m$ 의 토양에서  $231 \Omega \cdot m^2$ 의 피복저항을 나타낸다.

배관 중간부에 양극을 설치하여 1A의 정전류로 방식하는 경우 철도의 영향이 없을 경우에는 Fig. 4와 같은 형태의 on/off 전위 분포를 나타낸다. on-전위는  $iR$  전압강하를 포함한 토양에 대한 배관전위를 의미하고, off 전위는  $iR$  전압강하를 배제한 상태의 배관전위를 의미한다. 양극 주위에서 가장 낮은 전형적인 전위분포를

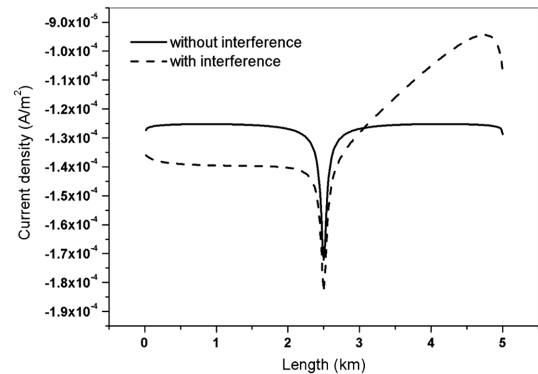


**Fig. 4.** P/S potential profiles without stray current.



**Fig. 5.** P/S potential profiles with stray current.

보여주고 있다. 철도가 운행될 때는 레일로부터 유출/유입되는 전류에 의하여 배관의 P/S(pipe to soil) 전위 분포는 Fig. 5와 같이 변화한다. 전동차 인근에서는 레일로부터 유출된 전류에 의하여 배관의 전위가 낮아지고, 변압기 근처에서는 반대의 전류흐름에 의하여 배관의 전위가 상승하게 된다. 이 때 배관 표면의 전류밀도 변화는 Fig. 6과 같이 나타나는데 방식정류기로부터의 전류유입과 레일로부터의 영향이 중첩되어 전위변화와 유사한 거동을 나타낸다. 철도의 운행에 따른 영향만을 살펴보기 위하여 방식전류가 없는 경우 철도에 의한 영향을 살펴보면 Fig. 7과 같이 누설전류의 유입구간과 유출구간이 분명하게 드러나게 된다. 배관에서 전류가 유입되는 상태에서 유출되는 상태로 전환되는 지점은 철도차량에서 변전소방향으로 약간 치우친 지점에서 나타났다. 배관으로부터 최대 전류가 유출되는 지점은 변전소에 인접하여 나타나게 된다.



**Fig. 6.** Current density profile at the surface of the pipe with cathodic protection.

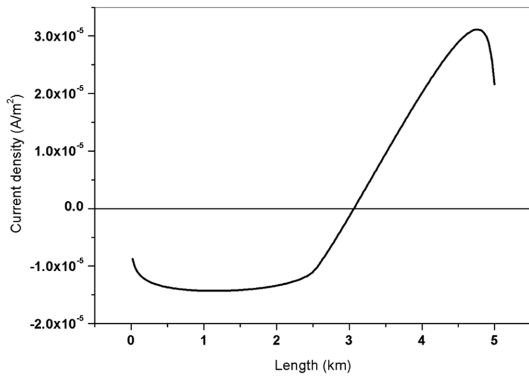


Fig. 7. Current density profile at the surface of the pipe without cathodic protection.

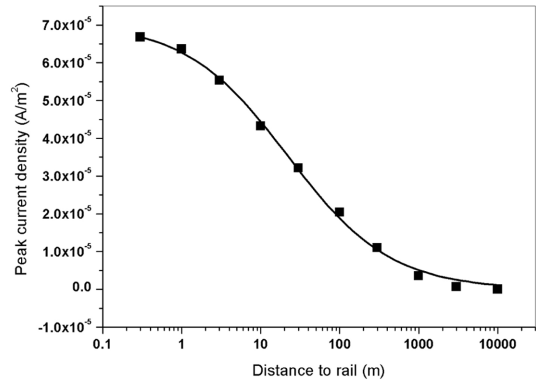


Fig. 9. Change of peak current density with distance between pipe and rail.

### III. 누설전류 영향의 크기에 미치는 환경 변수의 영향

누설전류에 의한 간섭영향은 여러 환경변수에 의하여 영향을 받게 된다. 이 연구에서는 배관과 레일의 이격거리, 토양비저항, 배관의 피복손상율을 중요한 인자로 보고 이러한 인자에 따른 누설전류의 영향을 상대적으로 비교하고자 하였다.

전류밀도 분포에서 여러 인자에 의한 누설전류의 영향을 정량적으로 검토하기 위하여 최대 전류유출지점의 피크전류크기를 상호비교하였다. 유출전류의 크기는 누설전류에 의한 부식속도와 비레하르프 간섭에 의한 위험도에 비례한다. 방식전류에 의한 영향을 배제하기 위하여 전기방식이 실시되지 않는 경우에 대하여 비교하였다. Fig. 7의 계산 예에서 피크전류는  $3.21 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2$ 으로 나타난다.

#### 3.1. 레일과 배관의 이격거리에 따른 영향

이격거리를 3 m에서 10 km까지 변화시키면서 최대 유출전류밀도를 비교한 결과 Fig. 8과 같이 나타났다. 거리가 증가함에 따라 피크 유출전류는 감소하였다. 피크 전류의 변화거동은 세미로그 플롯을 하였을 때 거리가 멀어짐에 따라 '0'에 수렴하는 전형적인 sigmoidal 곡선의 형태를 나타내며 Fig. 9와 같다. 비선형 커브 피팅에 의하여 얻어진 관계식은 다음과 같다.

$$i_{peak} = \frac{7.06 \times 10^{-5}}{1 + (d/22)^{0.67}} \quad (1)$$

#### 3.2. 토양비저항에 따른 영향

간섭전류에 미치는 토양비저항의 영향을 살펴보기 위하여 이격거리가 30 m에서 다른 조건을 고정하고 토양 비저항을 변화시켰을 때 피크 유출전류의 크기를 계산

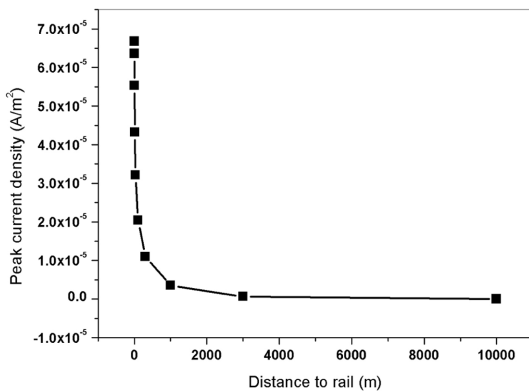


Fig. 8. Change of peak current density with distance between pipe and rail.

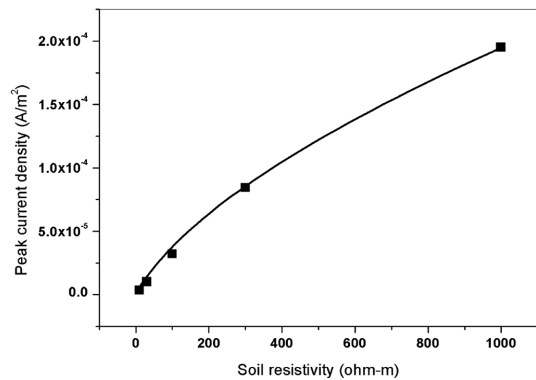


Fig. 10. Influence of soil resistivity on the interference intensity (linear scale).

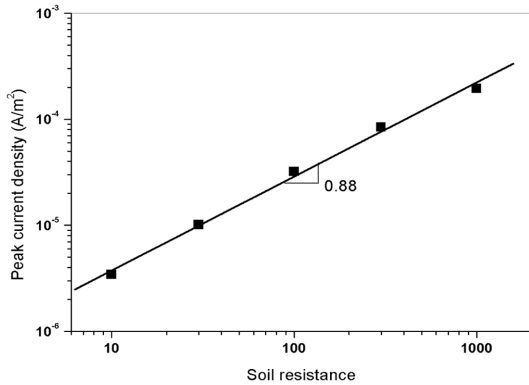


Fig. 11. Influence of soil resistivity on the interference intensity (log scale).

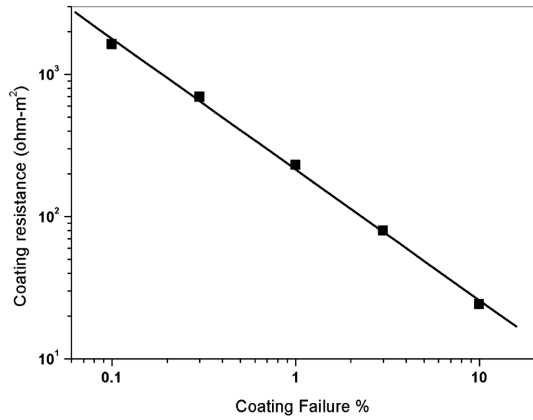


Fig. 12. Influence of coating failure ration on the coating resistance.

하였다. 피크 전류의 크기는 토양비저항이 커질수록 증가하였으며 Fig. 10과 같다. 피크 전류값과 토양비저항의 관계는 log-log 플롯을 하였을 때 식 (2)와 같이 기울기가 0.88로 나타났으며 Fig. 11과 같다. 배관에서 간섭에 의한 유출입 전류는 레일에서 유출된 누설전류가 토양을 통하여 전도되는 경로보다 배관에 유입되었다가 유출되는 경로의 저항이 더 작기 때문에 발생한다. 따라서, 토양의 비저항이 클수록 토양만을 통한 전도 경로보다 배관에 유/출입되는 경로의 저항이 상대적으로 작아지게 되어 피크전류의 크기가 커지는 것으로 판단된다.

$$i_{peak} = 5.01 \times 10^{-7} \times \rho^{0.88} \quad (2)$$

### 3.3. 피복저항율에 따른 변화

피복손상율을 0.1%, 0.3%, 1%, 3%, 10%로 변화시키면서 간섭영향을 비교하였다. 토양비저항 환경하에서 피복손상율이 증가하면 피복저항율은 Fig. 12와 같이 감소하게 된다. 피복저항율의 변화에 따라 피크전류는 피복저항율에 반비례하는 관계를 나타내며 Fig. 13과 같다. 이 때 두 변수는 식(3)과 같이 근사할 수 있다. 이러한 결과는 레일에서 유출된 누설전류가 배관에 유입/유출되는 경로의 저항이 더욱 작아지기 때문에 나타나는 결과로 해석된다.

피복손상율이 1%와 10%인 경우의 피크 전류밀도는 각각 0.032mA/m²과 0.248mA/m²으로 얻어져 피복손상율이 큰 경우 평균전류밀도는 훨씬 커지지만 이를 피복손상율을 고려하여 손상면적에 대한 전류밀도를 고려하면 각각 3.2mA/m²과 2.48mA/m²로 오히려 피복손상율이 큰 배관에서 더 낮은 손상부 전류밀도를 나타

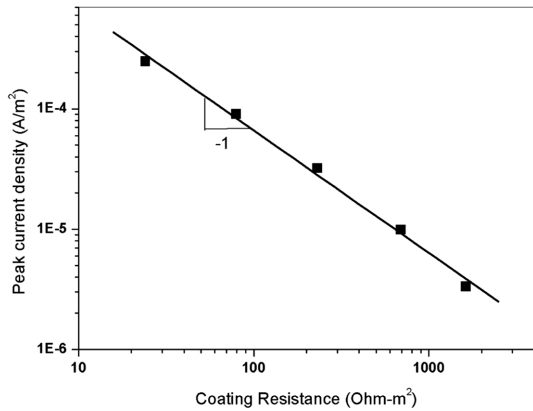


Fig. 13. Influence of coating resistance on the interference intensity.

낸다. 두 경우에 대하여 피크지점의 P/S 전위를 살펴보면 손상율 1%와 10%인 경우에 대하여 각각 -172 mV(vs.CSE)와 -214 mV(vs. SCE)로 나타나 손상율이 높은 경우 전위상승 효과가 적게 나타났다. 다시 말하면 피복손상율의 증가가 유출입 전류의 양은 증가시키지만 부식속도 측면에서는 오히려 속도를 감소시킬 수 있는 요인이 됨을 알 수 있다.

$$i_{peak} = \frac{7.24 \times 10^{-3}}{R_{coating}} \quad (3)$$

### 3.4. 레일 누설(접지)저항율에 따른 변화

레일의 누설저항을 1.57 Ω/km의 10%, 30%, 100%, 300%, 1000%로 변화시키면서 간섭영향을 비교하였다.

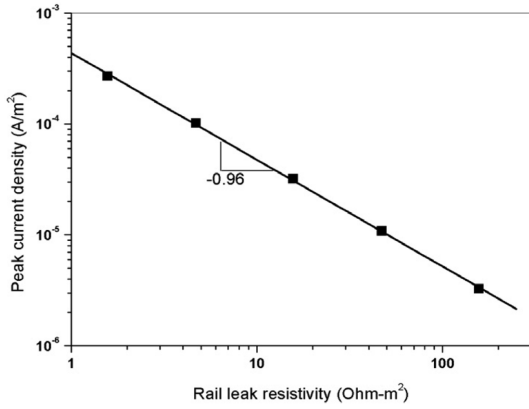


Fig. 14. Influence of rail leak resistivity on the interference intensity (log scale).

다른 조건은 기본 계산조건과 동일하게 유지하였다. 레일의 누설저항이 증가함에 따라 누설피크전류는 반비례하여 감소하는 경향을 나타내며 Fig. 14와 같다. 이때의 관계는 식 (4)와 같이 근사할 수 있다. 레일 누설저항이 낮을 수록 레일에서 유출되는 전류가 증가하므로 배관에 유출입되는 전류의 크기도 증가하게 된다. 레일의 누설저항이 낮아짐에 따라 나타나는 피크전류의 증가는 손상부의 면적변화 없이 나타나는 결과이며 그 크기는 배관의 부식속도와 정비례한다고 볼 수 있다.

$$i_{peak} = \frac{4.365 \times 10^{-4}}{R_{rail\ leak\ resistance}^{0.96}} \quad (4)$$

#### IV. 결 론

전기철도로부터 유출된 전류에 의하여 인접한 배관에 미치는 간섭영향을 수치해석적 방법으로 평가하여 환경요인들이 간섭의 정도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 이격거리에 따른 감소형태는 sigmoidal

커브를 따라 감소하였는데 700 m의 거리에서 최대값의 10% 수준으로 감소하였다. 토양비저항의 영향은 비저항의 0.88승에 비례하여 간섭전류가 증가하는 것으로 나타났다. 배관의 피복저항율과 간섭전류의 크기는 반비례하는 관계를 나타냈다. 그러나, 피복손상율을 고려한 노출면적당 전류는 손상율이 증가할 때 오히려 약간 감소하였다. 레일의 누설저항과 간섭전류의 크기는 반비례하는 관계를 나타내 레일의 누설저항을 크게 유지해야 함을 알 수 있었다.

이러한 정량적 연구결과를 토대로 환경요인에 따른 누설전류의 변화 경향을 추정할 수 있는 관계를 도출하였으며 향후 누설전류에 대한 대책의 수립과 검증에 대한 수치해석적인 연구에서 변수의 민감도를 예비 평가할 수 있는 방안으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] 하윤철, 배정효, 하태현, 이현구, 김대경, ‘매설배관과 직류전기철도의 표유전류 간섭분석’, *KIGAS*, **10**(3), 41-47, (2006)
- [2] Kenneth J. Moody, ‘The Worldwide Trend to Unearthed DC-Powered Rail Transit Systems’, *Materials Performance*, NACE, Houston Texas, USA, 20-24, (2002)
- [3] Kim, Y.S., G.J. Jeong and H.J. Sohn, ‘Mathematical Modeling on the Corrosion of Unprotected Structure due to Stray Current Resulting from Cathodic Protection System’, *Metals and Materials*, **5**(5), 93-99, (1999)
- [4] 김영석, 이선엽, 박경완, 전경수, 고영태, ‘음극방식 시스템에서의 압입관과 배관의 부식거동에 관한 수학적 모델링’, *KIGAS*, **2**(1), 40-46, (1998)
- [5] Mariru Purcar, Leslie Bortels, Bart Van den Bossche and Johan Deconinck, ‘3D Electrochemical Machining Computer Simulations’, *J. of Materials Processing Technology*, **149**(1-3), 472-478, (2004)