

지하 매설 구조물의 부식과 방식 I. 매설조건에서의 부식특성

고 영 태 · 송 홍 석 · 이 성 민 · 전 경 수
경기도 안산시 일동 277-1, 한국가스공사/연구개발원

Corrosion and Protection of Underground Structures I. Characteristics of Underground Corrosion

YoungTai Kho, HongSuk Song, SungMin Lee, KyungSoo Jun
Korea Gas Corporation/R&D Center
277-1 Il-dong Ansan Kyunggi-do. 425-150, Korea
Tel. 82-345-82-4860, e-mail: ytkho@kogas.re.kr

1. 서 론

우리가 활동하고 있는 지표면의 아래에는 매우 다양한 구조물들이 매설되어 있다. 매설된 구조물의 대부분은 사회산업자본 성격의 것들로서 우리들의 실생활이나 산업활동을 지탱해 주고 있다. 서울의 간선도로나 지방의 국도등의 도로변에는 우리가 생각하는 것보다 훨씬 이상으로 이러한 구조물들이 매설되어 있어서 새로운 구조물의 추가 매설을 위한 공간 확보가 불가능 할 정도이다. 이러한 구조물들을 유형별로 분류해 보면 건물이나 토목 구조물의 기초 pile류, 유류나 가스의 저장을 위한 tank류 및 각종 utility의 운반을 위한 배관류(pipeline) 등이다.

이러한 구조물들 중에서 부식의 관점에서 가장 중요한 것은 배관류이다. Pile의 경우는 일단 토양중에 매설되면 지하수의 존재 여부와 관계없이 부식속도가 0.4mpy를 초과하지 않는 것으로 알려져 있으며,¹⁾ Tank의 경우에는 최근에 부식에 의한 내용물(주로 유류)의 누출이 환경

문제 차원에서 문제시되고 있으나 부식이나 이에 따른 오염의 문제가 극히 일부분에 제한되어 있어서 방식대책의 수립이 비교적 용이하다고 할 수 있다. 미국에서는 1988년에 EPA(environmental protection agency)의 주도로 지하저장 탱크(underground storage tanks)의 방식에 관한 연방법이 제정되어 tank의 소유주들이 기존 및 신규의 모든 tank를 대상으로 1998년 까지 적절한 방식 조치(fiber glass cladding, interior lining, cathodic protection)를 추가하여 설치하도록 하고 있다.^{2,3)}

배관류는 매설범위가 매우 광범위할 뿐 아니라 pile이나 tank 등에서는 관찰할 수 없는 여러 가지 유형의 부식이 발생한다는 점에서 부식공학자들에게는 매우 재미있는 경우이다. 특히 배관의 부식에 의한 파손은 대중의 안전에 심각한 위험요소로서 적극적인 부식방지 대책이 마련되어야 한다. 이하에서는(본 논문은 연재형식으로 매 호에 게재될 예정임) 배관류를 중심으로 한 지하 매설 구조물들의 부식특성을 분석하고 현

재 적용되고 있거나 개발중인 방식기술 및 최근의 연구동향들에 관하여 소개하고자 한다.

2. 부식환경으로서의 토양의 특징

2.1 토양의 비저항

토양은 대기, 물, 그 밖의 환경에 비해서 복잡한 부식성 환경을 갖고 있기 때문에 금속의 부식속도는 그 환경에 따라서 매우 다양하다. 여러 가지 인자들 중 에서 부식속도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 부식과정에서 전해질로서 폐쇄회로의 이부가 되는 토양 및 지하수의 비저항이다. 다른 부식환경에서와는 달리 매설물의 경우에는 미주전류(stray current)에 의한 부식이 문제시되는 경우가 많은데, 비저항이 높은 지역에서는 누설되는 전류의 량이 적어 부식의 위험이 감소하게 된다. 또한 비저항이 높은 토양에는 그 속에 포함되는 화학성분(그 대부분이 유해 인자임)의 량이 적기 때문에 자연부식의 위험도 적어진다고 할 수 있다. 토양의 비저항은 대략 토양의 물 함유량에 의해 좌우되는데, 물 함유량이 커질수록 비저항이 낮아지기 때문에 부식량이 증가하는 경향을 나타낸다(Table 1, 2, 3 참조). 그러나 완전히 물로 채워진 토양에서는 부식에 필요한 산소의 농도가 희박하게 되므로 부식량이 오히려 감소하게 된다. 어떤 토양이나 포화도가 65% 정도에서 부식량이 최대가 되는 것으로 알려져 있다. Table 4에 여러 문헌에서 주장되는 토양의 비저항과 부식성의 관계를 예시하였다.

2.2 토양의 pH 및 화학 성분

누설 전류가 전혀 없는 경우라도 pH 값이 4 보다 작은 산성 토양이나 지하수 속에 있는 주철, 또 강철관은 자연부식될 위험이 있다. 그러나 pH>4 의 환경에서는 금속의 표면이 Fe(OH)₂의 포화용액 피막으로 싸여 있기 때문에 부식의 정도는 작으며 pH>11이 되면 안정한

Table 1. The effect of moisture content on the resistivity of soil

흙이 함유한 수분(%)	저항율(Ω-CM)		
	모래섞인 토양	표토(포층토)	적 토
2	180,000		
4	60,000	200,000	
6	38,000	130,000	
8	29,000	90,000	
10	22,000	56,000	260,000
12	17,000	36,000	180,000
16	13,000	19,000	18,000
20	9,000	11,000	13,000
24	7,000	9,000	11,000
28	6,000	8,000	10,000

전기공사 설계실무 데이터북에서 발췌.

Table 2. Resistivity of various types of soil

흙의 종류	저항율(Ω-CM)
습지의 흙	200-350
점 토	400-15,000
모 래	9,000-800,000
니 암	5,000-50,000
모래섞인 자갈	5,000-50,000
암 석	100,000이상

전기공사 설계실무 데이터북에서 발췌.

Table 3. Resistivity of mixed soils

흙의 종류	저항율(Ω-CM)		
	최 저	최 고	평 균
재, 석탄재, 소금기가 있는 폐물이 섞인 흙	590	7,000	2,370
점토, 찰흙	340	16,300	14,060
모래와 자갈이 섞임	1,020	35,000	5,800
자갈, 모래, 돌 소량의 점토가 섞임	5,900	485,000	94,000

전기공사 설계실무 데이터북에서 발췌.

부동태 피막이 형성되어 부식은 무시할 수 있는 정도로 작아지게 된다. 한편 납(Pb)은 양성(amphoteric) 특성을 갖기 때문에 pH가 작은 산성 토양이나 지하수로 침식됨과 동시에, pH가 큰 알칼리성 토양이나 지하수 속에서도 심하게 자연부식을 받게 된다.

일반적으로 매설 금속체는 토양 및 지하수 속에 가용성 염류의 양이 증가하면 비저항이 감소

Table 4. Relationship between corrosivity and resistivity of soil

부식성	토양비저항(Ω -cm)				
	Palmer ¹⁾	Applegate ²⁾	Waters ³⁾ Evans ⁴⁾	Pritula ⁵⁾ Tomashov ⁶⁾ Peabody ⁷⁾	Romanoff ⁸⁾
매우 큼	<1,000	<1,000	<900	<500	<700
큼	1,000~2,000	1,000~5,000	900~2,300	500~1,000	700~2,000
중간	2,000~5,000	5,000~10,000	2,300~5,000	1,000~2,000	2,000~5,000
작음	5,000~10,000	10,000~100,000	5,000~10,000	2,000~10,000	>5,000
매우 작음	>10,000	>100,000	>10,000	>10,000	-

주 : ¹⁾ J. B. Palmer, Materials Perform., 13, No1, 14 (1974).

²⁾ L. M. Applegate, Cathodic Protection (1960).

³⁾ F. O. Waters, Corrosion, 8, 407 (1952).

⁴⁾ U. R. Evans, The Corrosion and Oxidation of Metals (1971).

⁵⁾ V. A. Pritula, Cathodic Protection of Pipeline and Storage Tanks (1953).

⁶⁾ N. D. Tomashov, Theory of Corrosion and Protection (1966).

⁷⁾ A. W. Peabody, NBS Basic Corrosion Course (1974).

⁸⁾ M. Romanoff, NBS Circular N.579 (1957).

하기 때문에 부식량은 증가한다. 한편, 칼슘염이나 마그네슘염은 중성 조건하에서는 불용성의 생성물을 석출하여 보호 피막으로서 작용하게 됨으로 금속의 부식을 억제하는 작용을 한다. 그러나 염화물은 금속 표면의 보호 피막을 파괴하여 부식을 조장한다. 황화물 및 기타 황 화합물도 금속에 심한 부식을 일으키는 것으로 알려져 있다. 매설 금속체와 대지 사이에 일정 전압을 가하여 전류를 보낼 경우, 그 전류값은 통상 시간에 따라 감소한다. 이것은 매설 금속체 표면이 분극 작용을 일으켜 외부에서 공급되는 전류를 감소시키는 일을 하는 역기전력과, 부식 생성물 피막 및 CaCO₃와 같은 석출 생성물 피막 때문에 생기는 저항에 의한 것이다.

2.3 산 소

산소는 부식 과정에서 중요한 산화제이므로 부식성에 미치는 영향이 크다. 토양 속에 산소량이 많을 때는 부식성과 부식량도 증가한다. 또 산소 농도가 국부적으로 다를 경우에는 통기차 전지(통기차 마이크로셀)을 형성하여, 산소 농도가 작은 토양이나 지하수 속의 금속체가 마이크로셀의 anode부가 되어 부식된다(1.2.2 참조).

2.4 토양의 생물적 특성

매설 금속체는 토양이나 지하수에 서식하는 세균에 의해 부식이 촉진되는 경우가 있다.^{4,5)} 부식에 관계하는 대표적인 세균에는 철 박테리아와 같은 호기성(aerobic)인 것과 황산염 환원 박테리아와 같은 혐기성(anaerobic)인 것이 있다. 토양 부식성에 깊이 관계하는 것은 후자이다. 이 황산염 환원 박테리아(SRB:sulfate reducing bacteria)는 통기성이 적은 pH=6~8의 점토질 토양에서 가장 번식하기 쉽다. 바다, 하천, 호수와 늪 등의 저토에서는 거의 이 박테리아를 관찰할 수 있다. 이 세균의 대사 과정은 수소와 황산염을 필요로 하기 때문에 부식 전지의 cathode에서 수소의 분극을 감소시켜 환원반응을 촉진할 뿐만 아니라, 황화물 생성으로 anode에서의 이산화 반응(산화 반응)을 촉진하기 때문에 결과적으로는 부식을 증대시키는 것이다. 철 부식의 경우에는 생성물로서 검은 색의 황화물이 형성된다.

이 박테리아의 위험성은 토양의 redox 전위(산화환원 전위)를 측정하여 판정한다. Redox 전위는 백금 등의 불활성 금속 전극과 기준 전

Table 5. Relationship between redox potential and corrosivity of soil

Redox potential(mV:NHE)	Corrosivity
100 이하	격렬
100~200	중간 정도
200~400	경미
400 이상	부식 없음

극을 토양 속에 설치하고 두 전극사이의 전위차를 측정하여 구한다. 황산염 환원 박테리아는 강한 환원성 환경에서 활동하기 때문에 redox 전위가 낮은 경우가 부식을 일으키기 쉬운 조건이 된다. Table 5에 토양의 산화환원 전위(Redox전위)와 황산염 환원 박테리아에 의한 부식성과의 관계를 나타내었다. 기준전극을 포화 카로멜 전극을 사용할 경우의 산화환원 전위 계산 방법을 아래에 예시하였다.

$$E_h = E_p + E_r + E_{rH}$$

여기서 E_h : 산화환원 전위

E_p : 측정된 전위값

E_r : +342[n.V](포화카로멜 전극 기준에서 표준수소전극 기준으로 환산한 값)

E_{rH} : pH=7에 대한 보정 값(pH=7로부터의 편차에 대해 1pH당 59 [mV]를, 알칼리성일 때는 더하고 산성일 때는 뺀다)

토양에는 황산염 환원 박테리아 이외에도 수십만 혹은 수백만 종류의 박테리아가 서식하고 있다. 이들 박테리아는 호기성이기도 하고 혐기성이기도 한데 생존하는 과정에서 대부분 CO₂를 배출하기 때문에 매설 금속의 일반적인 부식 생성물은 흑색의 탄산철일 경우가 많다. 황산염을 많이 함유한 해안가의 점토는 황산염 환원 박테리아가 없어도 오랜 세월간 산화되어 황산이 되어 pH를 내려서 심한 부식을 일으키는 경

우도 있다.

2.5 토양의 부식성 평가법

부식환경으로서의 토양의 부식성을 평가할 때, 지금까지는 토양의 비저항이 부식의 지배적 인자라는 점에서 부식성을 비저항만을 가지고 판단해 왔으나, 근래에는 토양의 여러 인자들을 종합적으로 고려하여 토양의 부식성을 평가하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이러한 방법에서는 부식을 유발하는 인자들 뿐 아니라 부식을 억제하는 기능을 갖는 인자들 까지도 고려되고 있어서 토양의 부식성을 종합적으로 평가할 수 있는 방법으로 평가되고 있다. 이와 같이 여러 가지 부식성 인자에 가중치를 주어 토양의 부식성을 평가하는 방법의 일례를 Table 6, 7, 8에 나타내었다.

Table 6은 토양의 부식성을 평가하는 한 방법으로, 인자에서 적어도 10개 이상에 대해 각각의 평가지수를 구하고 그 합계치로 부터 Table 7에 의해 토양의 부식성을 판정한다. 또한 ANSI 21.5-1972(AWWA C105-72)에서는 Table 8의 방법으로 토양의 부식성을 평가해서 방식 조치의 판단 기준으로 사용하고 있으며, 일본 닥타일 주철관 협회에서도 규격(JDPA-Z-2005)으로 채용하고 있다. Table 8의 평가지수 산정시 황화물이 존재하고 산화환원 전위가 낮을 때는 pH범위에 대하여 각각 3점을 가산하며, 합계 점수가 10점 이상인 경우에는 부식성 토양이라고 판정하고 방식 조치를 실시한다.

3. 매설금속 부식의 특징

토양속에 매설된 금속의 부식은 부식공학에서 주로 취급되는 액상 또는 기상에서의 부식양상과 비교하여 구분되는 특징을 갖는다. 주로 지하에 매설되어 사용되는 금속 재료에서 관찰될 수 있는 부식의 유형을 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. 부식은 일반적으로 직류 전기 철도나 전기 방식 설비와 같은 인위적인 전기 설비에서

Table 6. Corrosion factors of soil and their weight

항 목	점 수							
	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	
토양 조성	C, CM S, SM		S, SL LM, SA		A, AM H		T, LS SA	
지하수 수위			없음		약간있음			
토양 조건(1)			SN		Sr			
(2)			S1		S2			
비저항(Ω -cm)			>10,000	10,000~5,000	5,000~2,300	2,300~1,000	<1,000	
수분 함량(%)			<20	>20				
pH			>6		<6			
총산도(pH7) (me/kg)			<2.5	2.5~5	>5			
산화환원 전위(pH7)(mV)	>400 VS		200~400 VM		0~200 VW		<0 VN	
총 알칼리도 (pH4.8) = (me/kg) (CaCO ₃ mg/Kg)	>1,000 >50,000	200~1000 10,000~ 50,000	<200 >10,000					
황화물(S ²⁻ mg/kg)			없음		<0.5		>0.5	
숯, 재, 코크스 Cl ⁻ (mg/kg)			없음				있음	
황산염 이온(mg/kg)			<200	200~500	500~1,000	>1,000		

C:calcareous SN:natural bed SL:sandy loam(loam<75%)
 CM:marly limestone Sr:embanked bed LM:marly loam
 SM:sandy marl(limesilt) S1:same kind of soil in construction area SA:sandy clay(silt<75%)
 S:sand (+2) S2:different kind of soil in construction area A:clay
 S:loam (0) VW:weak ventilation H:clat loam
 VM:middle ventilation SA:marshy soil LS:thick loam
 VS:strong ventilation AM:humus
 T:peat

Table 7. Corrosivity of soils

평가지수 합계	부 식 성
>0	거의 없다(very weak)
0~-4	약함(weak)
-5~-10	중간 (middle)
<-20	강함 (strong)

의 미주 전류에 기인하는 전식과, 전기적 원인
 들 없이 자연 상태에서 생기는 자연 부식으로
 크게 나뉜다.

3.1 전기 부식

매설된 금속이 전기적인 원인에 의해 부식되
 는 현상을 전기 부식이라 한다. 매설된 금속 구
 조물과 토양이라는 주변 환경을 생각해 볼 때
 에, 토양으로 유입된 전류가 가장 흐르기 쉬운

(전기 저항이 작은) 경로는 저항이 작은 금속
 구조물이다. 따라서 토양으로 유입된 전류는 거
 의 모두가 금속 구조물로 유입되는데, 이처럼
 유입된 전류에 의해 발생하는 부식을 전기 부식
 이라고 한다.

부식현상을 전기화학적인 관점에서 보면 양극
 반응과 음극반응으로 구분할 수 있는데, 양극반
 응의 결과인 부식은 전류가 금속으로 부터 전해
 질로 유출되는 곳에서 발생하며, 반대로 음극반
 응은 전류가 전해질로 부터 금속으로 유입되는
 곳에서 일어나게 됨을 알 수 있다. 이와 같이
 전류의 방향에 따라 양극반응과 음극반응이 발
 생하는 위치를 명확히 구분할 수 있게 되는데,
 이것으로 부터 전기부식은 물론 전기방식의 원
 리를 설명할 수 있다. 다시 말해서 전류가 유출

Table 9. 지하철 1호선에서 4호선까지의 변전소의 위치

호선	변전소명	역사명	호선	변전소명	역사명
1	시청	시청	3	독립문	독립문
1	종로5가	종로5가	3	종로3가	종로3가
1	계기	계기	3	약수	약수
1	군자기지	군자기지	3	압구정	압구정
2	을지3가	을지3가	3	고속터미널	고속터미널
2	상왕십리	상왕십리	3	남부터미널	고속터미널
2	성수	성수	3	매봉	매봉
2	강변	강변	3	대청	대청
2	신천	신천	3	수서기지	수서기지
2	선릉	선릉	4	당고개	당고개
2	서초	서초	4	창동기지	창동
2	낙성대	낙성대	4	쌍문	쌍문
2	신림	신림	4	미아3거리	미아3거리
2	대림	대림	4	성신여대	성신여대
2	영등포구청	영등포구청	4	동대문운동장	동대문운동장
2	합정	합정	4	회현	회현
2	이대	이대입구	4	삼각지	삼각지
3	지축기지	지축기지	4	이촌	이촌
3	연신내	연신내	4	충신대입구	충신대입구
3	녹번	녹번	4	남태령	남태령

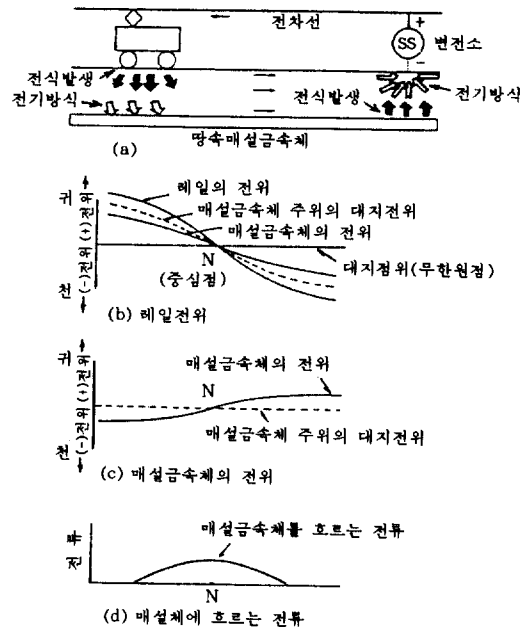


Fig. 2. Conceptual explanation of stray current corrosion.

Table 10. 지하철 5호선에서 8호선까지의 변전소의 위치

호선	변전소명	역사명	호선	변전소명	역사명
5	개화산	개화산	6	삼각지	삼각지
5	마곡	마곡	6	한강진	한강진
5	화곡	화곡	6	신당	-
5	목동	목동	6	안암	-
5	영등포시장	영등포시장	6	상월곡	-
5	밤섬	밤섬	6	태릉앞	-
5	공덕	공덕	7	수락산	-
5	충정로	충정로	7	증계	-
5	을지5가	을지5가	7	불암	-
5	행당	행당	7	상봉	-
5	마장	마장	7	중곡	-
5	군자(농동)	농동	7	전대입구	-
5	광나루	장신대	7	청담	-
5	강동	강동	7	논현	-
5	고덕	고덕	7	내방	-
5	올림픽공원	올림픽공원	7	남성	-
5	오금	오금	7	상도(중대앞)	-
6	연신내	연신내	7	보라매	-
6	용암	용암	7	남구로	-
6	수색	수색	7	철산	-
6	합정	합정	8	석촌	-
6	대흥	대흥	8	복정	-

케도의 절연 설비에 도 불구하고 토양속으로 누설된 전류는 매설된 금속 구조물로 유입되고 이것을 따라 흐르다가 최종적으로 지하철의 변전소로 회귀하게 된다. 변전소 부근의 구조물에서는 전류의 유출(금속으로 부터 토양으로)이 일어나므로 이 곳에서 부식이 발생하고, 반대로 전기가 유입되는 곳은 전기방식된다. Fig. 2에 이와 같은 상황을 도식적으로 나타내었다. 이 그림에서는 레일의 전위, 매설 금속체 주변의 대지전위 및 금속체의 전위변화를 동시에 보여 주고 있다. 레일의 전위는 변전소 부근에서는 매설 금속체 주위의 대지전위에 비해 낮지만, 전류의 유입이 발생하는 전차 위치 부근에서는 높아진다. 한편, 매설 금속체의 전위는 이와 반대가 된다(Fig. 2(b)). Fig. 2(c)는 금속체 주변의 대지 전위를 기준으로 했을 경우의 매설 금속체의 전위(대지전위)를 나타내는데 이것으로 누설 전류의 유출입을 알 수 있기 때문에 Fig. 2(d)의 금속체를 흐르는 전류의 분포도와 함께

전기부식 판정의 중요한 자료가 된다.

레일과 매설 금속체의 전위가 일치하는 곳을 중성점(N)이라고 한다. 중성점은 대략 변전소와 전차 위치의 중간 지점에 위치하는데, 이 점에서는 레일도 매설 금속체도 대지와와의 사이에 전류 유출입이 없고, 또 매설 금속체를 흐르는 전류는 최대가 된다. 중성점을 경계로하여 변전소 측은 매설 금속체에서 대지로 전류가 유출되는 지역, 즉 전기부식이 일어날 수 있는 위험 지역이고, 그 반대 측은 대지로 부터 금속체로 전류가 유입되는 안전 지역이다. 따라서 매설 금속체의 대지전위는 전자에서 귀하게(+)되고, 후자에서는 천하게(-)된다. 반면, 레일에 대해서는 완전히 그 반대가 된다는 것은 Fig. 2(a)와 (b)를 보면 명백하다.

3.1.2 간섭에 의한 전기부식

어떤 설비의 방식을 위해 전해질(토양)을 통하여 전류를 흘리는 방식법을 전기방식이라고 한다. 전기방식을 위해 전류가 흐르게 되면 전해질에서는 전위 분포가 발달하게 되는데, 이 전위 분포는 인접한 다른 시설물의 전위를 변화시키게 된다. 이 때 전해질에서의 전위 분포는 전해질의 비저항 및 전류의 크기에 따라 좌우되며, 인접한 시설물에 미치는 영향의 크기는 이격 거리 및 상대적인 배치 구조 등에 따라 달라진다. 이와 같이 주변의 전기적 환경이 변화함에 따라 인접한 다른 시설물의 전위 분포가 달라지는 현상을 간섭(interference)이라고 한다.

일반적으로 희생양극을 적용한 경우에는 양극으로 부터의 전류 출력이 작아서 전해질의 전위가 국부적으로만 변화되기 때문에 그다지 큰 문제가 되지 않으나, 외부 전원 장치, 선택 배류기, 혹은 강제 배류기에 의한 전기 방식을 실시한 경우에는 토양 속을 흐르는 전류가 크므로 광범위하게 토양의 전위를 변화시키게 되고 주변의 구조물들에 간섭을 일으키게 된다. 다시 말해서 피방식 구조물에 인접해 있는 다른 매설

금속체에 방식 전류의 일부가 유입되고, 이 전류의 유출부에서는 부식이 진행되는데 이것을 간섭에 의한 전기부식이라 한다.

간섭에는 양극간섭, 음극간섭, 합동간섭, 점핑간섭 등이 있는데 실제 배관에서 가장 흔히 나타나는 간섭은 양극간섭과 음극간섭이다. 양극간섭(anodic interference)이란 양극 근처의 대지가 원거리 대지(remote earth)에 대하여 양(+)의 전위를 갖게되어 주변의 시설물이 음극화되는 간섭이다. 예를 들어 시설물 A의 부식 방지를 위하여 설치한 양극이 이것에 가까이 있는 시설물 B도 음극화 시키는 경우이다. 이 때 시설물 B는 음극화되므로 방식이 이루어지는데, 만약 시설물 B에도 별도의 전기방식 설비가 적용되고 있는 경우에는 과방식(overprotection)될 우려가 있다. 현재 우리 나라에는 가스관과 같은 폴리에틸렌 피복관의 과방식에 대한 기준이 없어서 이러한 과방식이 크게 문제시되고 있지는 않으나, 과방식은 피복의 박리나 강관의 수소취성 혹은 응력부식 균열을 유발시킬 수 있으므로 양극간섭에 의한 과방식에 대한 주의가 필요하다.

음극간섭(cathodic interference)이란 전기 방식에 의해 음극화된 시설물 근처의 대지가 원거리 대지에 비하여 음(-)의 전위를 갖게되어 주위의 시설물을 양극화시키는 간섭이다. 즉, 음극 주변의 시설물이 양극화되어 전위가 상승하게 되는데, 이 결과 양극화된 시설물은 부식되게 된다. 합동간섭이란 음극간섭과 양극간섭이 동시에 관찰되는 경우를 의미하며 매설 배관처럼 장거리에 걸친 대형 시설물에서 흔히 관찰된다. 또한 전기방식을 실시한 매설관이 절연 이음매를 통해 비방식 매설관과 접촉되어 있는 경우에 같은 간섭에 의한 전기부식이 비방식 매설관에 생기는 일 있다. 이것을 따로 jumping 간섭이라 한다.

3.1.3 교류에 의한 전기부식(교류 부식)

일반적으로 교류에 의한 부식은 직류에 비해

훨씬 작은 것으로 알려져 있다. 철, 동 및 납에 있어서 교류전류에 의한 부식속도는 직류전류의 경우에 비교하여 1%이하에 지나지 않는다고 한다. 그러나 알루미늄은 수십%에 달한다고 한다. 동 경우, 마이크로셀 부식과 비교하면 교류전류 크기가 $20\text{mA}/\text{cm}^3$ 이상이 되면 부식이 증대되는데 저전류 밀도의 교류는 마이크로셀 부식을 감소시킨다고 한다. 교류전류는 부식에 미치는 영향보다는 안전이라는 관점에서의 대책이 더욱 필요하다고 생각된다.

3.1.4 이상 전식

전철 차고 등에서는 레일이 차고 실내나 배관류 등의 저접지 구조물과 전기적으로 접촉하는 경우가 있고, 이 때에는 국소적으로 수십~수백 [A]의 큰 누전류가 생기는 일이 있다. 이와 같이 큰 전류에 의한 전식은 매우 단시간에 설비장해를 주기 때문에 이상 전식이라 부른다.

이상 전식에 관여하는 전류값은 크기 때문에 부식뿐 만이 아니라 그 전류 경로에서는 불꽃, 발열과 같은 문제를 낳는 경우도 있다. 또한 차고 건물이나 그에 접속되어 있는 배관류 등에는 레일의 대지전압이 더해지기 때문에 감전의 문제도 생길 수 있다. 이와 같이 이상 전식은 단시간에 큰 장해를 초래할 수 있으므로 특수한 경우를 제외하고는 레일이 저접지 구조물과 전기적으로 접속되는 설비를 금하고 있다.

3.2 자연부식

이상에서 설명한 전기부식은 토양 속에 매설된 금속구조물에서 특별히 관찰되는 부식 유형이고, 토양에서도 수용액에서와 같은 부식이 발생할 수 있다. 이하에서는 이러한 부식을 외부의 전기적 요인에 의한 부식과 구별하기 위해 “자연부식”이라고 이름하고자 한다. 다시 말해서, 자연부식이란 부식의 특별한 유형은 아니고 전기부식 이외의 부식을 총칭하는 말이다.

토양에 매설된 강관의 경우, 강관 주변의 토

양은 지하수나 여러 가지 물질에 의해 전해액과 마찬가지로 전기를 통하기 쉬운 상태 즉 전해질로 되어있다. 전자 전도체인 매설 금속 구조물과 이온 전도체인 토양이 접촉하는 경우(폐쇄 회로 형성)에는 부식이 발생하게 된다. 이처럼 부식이 진행되고 있는 금속의 표면은 현미경적인 관점에서 보면 부식이 진행되는 양극부와 전자가 소모되는 음극부로 구분할 수 있다. 그러나 육안관찰에 의해서는 부식부와 부식되지 않는 부위를 구분할 수 없는 경우가 보통이며 혼합전위 이론에 의한 자연전위가 측정된다. 이처럼 양극부와 음극부가 미세하게 분포된 국부 전지에 의해 진행되는 부식을 마이크로셀 부식(microcell corrosion)이라고 한다.

토양에서의 자연부식은 일반적으로 관찰되는 microcell corrosion 보다는 macrocell corrosion에 의해 진행되는 경우가 많다. 다시 말해서, 상대적으로 전위가 천한 부분(anode 부위)과 전위가 귀한 부분(cathode 부위)이 명확히 구분되는 macrocell(거시적 전지)을 형성하여 anode 부위에서 부식이 진행되는 경우가 많다. 이러한 부식은 동일한 금속이 상이한 전위값을 갖게되는 환경에 걸쳐 매설되어 있는 경우나, 동일한 환경에서 상이한 전위를 나타내는 금속을 조합하여 사용하는 경우에 발생한다. 마크로셀 부식은 다음과 같은 특징이 있다.

① 마이크로셀 부식과 달리 anode부와 cathode 부가 명확히 분리되어 있다.

② Anode의 부식은 anode의 면적에 비해 cathode의 면적이 상대적으로 크면 빠르게 진행되며, 부식 속도는 거의 [cathode면적/anode 면적]의 비에 비례한다.

매설 배관에서 관찰되는 마크로셀 부식의 대표적인 타입을 열거하면 다음과 같은 것이 있다.

(1) 콘크리트/토양 마크로셀 부식:콘크리트 속의 철은 부동태화하여 귀한 전위를 보이는 cathode가 되고, 토양 속의 철은 천한 전위이기 때문에 anode가 되어 부식이 촉진된다.

(2) 통기차 부식(산소농도전지 부식): 동일한 토양일 경우에도 지하수 조건 등에 의해 산소의 농도차가 있을 경우에, 산소농도가 높은 부위의 배관은 산소전극(cathode)이 되고 농도가 낮은 부위의 배관은 anode가 되어 macrocell을 형성한다. Nernst식으로 통기차 부식이 일어날 경우의 anode와 cathode의 전위차를 계산해 보면 $PO_2=0.2$ [기압], $pH=7$, $[Fe^{2+}]=10^{-4}$ [몰/ℓ] 일 경우에 약 $E_{O_2}-E_{Fe} = 0.432 - (-0.0558) = 0.99$ [V] 정도이다.

(3) 이종 금속 부식: 상이한 두 종류의 금속이 전기적으로 접촉되면 전위가 귀한 금속이 cathode가 되고, 친한 금속이 anode가 되어 부식된다. 이것을 전지기호로 나타내면 “(-)친한 전위 금속 | 전해질 | 귀한 전위 금속(+)”가 된다.

Microcell에 의한 자연부식 이외에도, 매설된 금속에서는 미생물의 작용에 의한 부식이 자주 관찰되고 있는데, 이에 관해서는 별도의 논문에서 다루고자 한다. 토양에서의 부식을 결정짓는 인자에는 토양의 비저항, pH, 산소 농도, 미생물 등이 있으며 이들에 대해서는 위에서 설명하였다.

4. 전기부식과 자연부식의 판별법

매설된 구조물에 부식이 발생하였을 경우 부식의 원인을 파악하는 것은 매우 중요한 일로서 방식법 역시 이러한 원인 파악에 근거하여 수립되어야만 한다. 전기부식과 자연부식은 뚜렷이 구분되는 몇가지 특성이 있는데 이하에서는 이러한 특성들에 대해서 알아보려고 한다.

4.1 외관 관찰 등에 의한 판별법

부식 원인을 파악하기 위해서는 부식환경이나 부식된 시편에 대한 외관을 원형 상태에서 관찰하는 것이 가장 중요하면서도 일차적인 접근 방법이다. 전기부식의 경우에는 부식부위 이외의 금속 표면은 비교적 깨끗한 상태를 보이는데 경우에 따라서는 원 상태의 금속 광택을 그대로

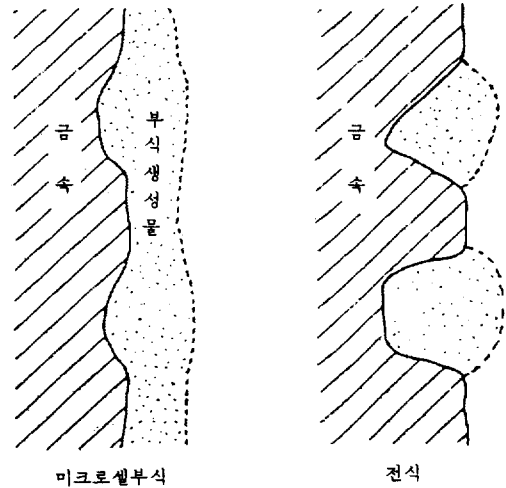


Fig. 3. Schematic illustration showing the appearance difference between natural corrosion and electrolytic corrosion.

유지하기도 한다. 부식 부위에는 강관의 내부보다 외부에서 비교적 적은 수의 절구형이나 도랑형의 구멍이 불균일하게 분포하게 된다. 이에 비해 자연부식의 경우는 부식이 전체의 금속 면에서 발생하며 부식의 형태도 일반적으로 구멍 형태보다는 부식 부위가 전체적으로 들어가는 접시 모양을 보여준다.

납은 전기부식의 경우 부식부위에 작은 구멍이 나고 때로는 호와 같이 파인 긴 도랑이 생긴다. 이 구멍은 불균일하게 분포하거나 케이블을 따라서 일직선으로 분포한다. 자연부식의 경우에는 앞에서 말한 철과 같은 경향이다. 전기부식과 자연부식의 일반적인 형태를 Fig. 3에 도식적으로 나타내었다.

4.2 화학적 판별법

부식 생성물, 지하수, 토양의 화학 성분만으로 그 부식 원인을 확정적으로 판단하는 것은 어려운 일이나 대략적인 파악을 하려면 화학적 판별법은 유력한 수단이 될 수 있다. 즉 매설 금속체 주변의 토양이 보유하고 있는 이온을 검출함으로써 부식원인을 추정할 수 있다. 특히 납의

Table 11. Characteristics of corrosion products of lead

전기부식	자연부식
부식생성물은 다량의 염화물, 황산염을 함유한다. 심한 경우는 과산화연을 발견할 수 있다. 또한 이들 생성물은 투명하거나 백색의 습윤한 결정형을 이룬다.	부식 생성물은 주로 탄산염, 염기성 탄산납, 산화납등이고, 드물게 과산화연을 발견할 수 있다. 생성물은 불투명하고, 분말형이다.

경우 전기부식과 자연부식 간에는 그 부식 생성물이 Table 11과 같은 차이가 있다는 것이 알려졌다, 이와 같이 생성물의 분석으로 화학 조성이 밝혀지면 양자의 판별상 참고가 된다.

4.3 전기적 판별법

매설 금속체의 대지전위, 전류의 경시 변화를 측정하는 전기적 방법은 전기부식과 자연부식을 상당히 정확하게 판별할 수 있다. 측정 결과 매설 금속체의 대지전위(pipe/soil potential)가 자연전위(corrosion potential)보다 귀한(+) 전위 영역에 있으면 전기부식의 위험도가 크고, 천한(-) 전위영역에 있으면 전기부식의 위험도가 적으며, 더욱 천하면 음극방식 상태로서 안전하다고 할 수 있다. 그러나 천한 전위영역에 있어도 부식의 피해가 있다면 강한 macrocell에 의한 자연부식을 받았다고 판단할 수 있다.

전기부식의 경우에는 매설 금속체에 중성점이 존재하고 또한 전류의 흐름을 알 수 있는데, 자연부식의 경우에는 중성점이 없고 일반적으로 부식에 의한 전류도 발견할 수 없게 된다. macrocell 형성에 의한 자연부식의 경우에는 부식에 따른 전류를 발견할 수 있는 경우도 있다. 그러나 전류의 흐름을 확인할 수 있다해도, 외부 전원으로 부터의 누설전류에 의한 전기부식

의 경우와 macrocell에 의한 자연부식의 경우의 전류 특성은 매우 달라서 쉽게 구분이 가능하다. 즉, 전자는 전차 전류 등에 기인한 것이기 때문에 그 변동과 같이 매설 금속체의 대지전위 및 전류의 경시 변화가 심한 변동을 보이는데, 후자에서는 일반적으로 전류값이 작고 거의 일정한 값을 보이기 때문에 양자를 확인할 수 있게 되는 것이다. 누설전류에 의한 전기부식이라고 판단될 경우에는 누설전류의 직접 원인인 전철의 레일 혹은 전기방식 중인 다른 매설 금속체와 피해 매설 금속체와의 전위차 등을 측정할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. R. U. Lee and A.H.Clark, "Corrosion of Steel Piling in Soil", Corrosion 93, paper no. 6, NACE Houston, TX (1993).
2. Resource conservation and Recovery Act, Subtitl 1, "Underground Storage Tanks", 40CFR Parts 280 and 281, Federal Register, Friday, September 23, 1988.
3. J. A. Lehmann, "Fifty Years of Cathodic Protection of Underground Storage Tanks", Corrosion93, paper no. 7, NACE Houston, TX (1993).
4. D.Ronay, I. Fesus and Z. Wolkober, "New Aspects in Research of Biocorrosion of Underground Structures", U.K.Corrosion 87, Brighton, UK (1987).
5. V.Betina, "Soil Biology" in "Chemistry and Biology of Water, Air and Soil", J. Tolgyessy ed., Elsevier (1993).