

플랜트 하부의 강파일 인접 토양의 부식성 평가

정성원[†], 박경완, 전재영
코렐테크놀로지

The Corrosivity Evaluations on Soil Surrounding the Buried Steel Piles under Manufacturing Plants

Sungwon Jung^{*†}, Kyeong-Wan Park^{*}, Jae-Young Jeon^{*}
^{*}CorRel Technology Co., Ltd.

ABSTRACT : The corrosivity evaluations on soil surrounding the buried steel piles under manufacturing plants. It was proven that the soil structure of this sample area is composed of several soil layers, and that each layer show the different corrosivity. The predicted average corrosion rates of some layers are about 0.33mm/y, which is over than the general corrosion rate, 0.01-0.02mm/y.

초 록 : 플랜트 하부 강파일 기초 주변 토양의 부식성을 평가하기 위해서 현장조사, 현장 보링작업을 통한 시료 채취 및 실험 분석을 거친 결과를 검토하였다. 토양 분석 결과 강관파일이 타설된 토양은 여러 개의 특성이 다른 토양층으로 구성되어 있었으며, 각 지층의 화학적, 물리적 성질이 다르므로 강관파일의 타설깊이에 따른 부식성의 차이가 발생할 것을 예상할 수 있었다. 분석 결과를 토대로 정성적인 부식성 평가, 평균부식속도 및 최대부식속도를 예측한 결과, 일부 지층에서는 일반적으로 강관파일 설계시 적용되는 부식속도인 0.01-0.02mm/y 이상의 평균부식속도를 보이고 있었다 (0.33mm/y).

Key words : Plant(설비), Soil(토양), Corrosiveity factors(부식성 요소), steel piles(강관파일)

1. 서 론

하여 정성적 평가 및 정량적인 평가(부식속도)를 예측하고자 하였다.

1.1 연구의 개요

검사 대상 플랜트는 건설된지 25년이 지난 상태로써 건물의 기초가 되는 강관파일의 안전성은 건물의 안전성과 연결되어 있으므로 강관파일의 부식도를 평가하여 안전성을 조사하였다. 기초 강관파일의 부식도는 직접 굴착을 통하여 확인하기 어려우므로 강관파일 주변 토양의 부식성을 평가하여 부식성을 확인하였다.

이를 위해서는 보링작업을 통해 심도별로 채취한 토양의 화학분석 및 미생물분석 등을 거쳐서 토양 부식성을 평가

2. 실험 방법

2.1 현장조사 (토양채취)

토양 채취 장소는 플랜트의 입구 지점이다. 그림 1은 본 플랜트에서 보링작업이 이루어진 장소와 현장에서 보링작업이 이루어지고 있는 모습이다.

Fig. 2는 보링작업시 관입시험기를 통해서 채취한 토양을 심도 별로 분류하여 샘플링한 상태를 보여준다.

[†] Corresponding author
E-mail address: airwon@correltech.com



Fig. 1 Boring site

2.2 토양분석

현장에서 채취한 시료를 각종 화학분석 및 미생물분석을 실시하였다. 분석항목은 Table 1과 같다.

Table 1 Soil analysis item

물리적 특성	토질 (soil texture) 점토함량 (clay content) 지하수 심도
화학적 특성	토양 비저항 (soil resistivity) 수분 함량 (water content) pH 염소이온 농도 황산염이온 농도
미생물학적 특성	산화환원전위 (redox potential) 황산염환원세균 개체수

2.3 부식성평가

토양환경에서 발생하는 부식 현상은 자연환경에서 발생하는 현상이므로 한두 가지 변수에 의해서 좌우되지 않고, 실제로 수많은 변수들이 동시에 작용하여 부식에 영향을 미치게 된다. 따라서 토양부식의 위험성을 평가하기 위한 수단으로 되도록 많은 인자들을 분석하고, 그 분석치에 따라서 위험성 점수를 부여한 후, 총점을 기준으로 부식성을 평가하는 점수체계가 많이 사용된다. 이 조사에서는 비교적 간단한 방법인 AWWA/ANSI C105/A21.5 규격¹⁾에 제시된 방법을 사용하였다.

그러므로 채취한 토양시료의 분석결과를 토대로 정성적인 부식성 평가, 평균부식속도의 예측 및 최대부식속도를 예측하고 세 가지 평가방법에서 공통적으로 위험성이 큰 토양시료의 부식성이 큰 것으로 평가하였다.

3. 결과 요약

3.1 토양 분석 결과

토양시료의 분석결과는 Table 3, Table 4와 같다. 토양분석 결과를 살펴보면 심도에 따라 토질의 차이가 크고, 심도별로 부식에 영향을 미치는 인자값이 크게 변하고 있으므로 심도에 따라서 부식성에 큰 차이가 발생한다는 것

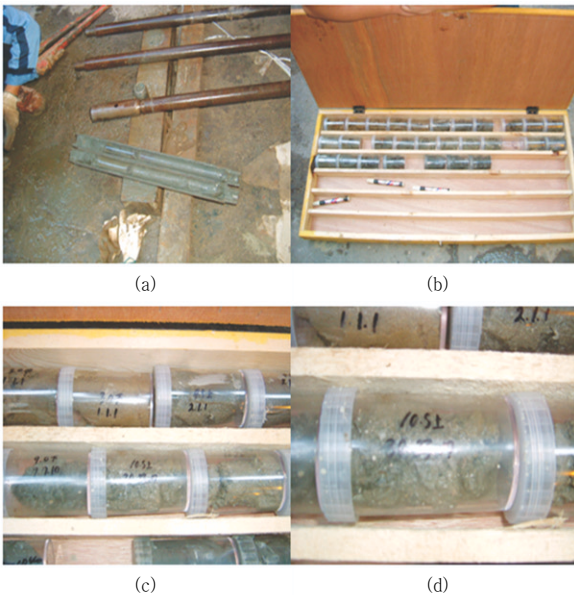


Fig. 2 Soil samples

플랜트 하부의 강과일 인접 토양의 부식성 평가

Table 2 AWWA corrosive assessment items, and ratings

평가항목	평점*
토양비저항 (매설깊이에서 측정된 single-probe법이나 soil box 를 이용하여 측정된 값)	
< 700	10
700 - 1000	8
1000 - 1200	5
1200 - 1500	2
1500 - 2000	1
> 2000	0
pH	
0 - 2	5
2 - 4	3
4 - 6.5	0
6.5 - 7.5	0**
7.5 - 8.5	0
> 8.5	3
산화환원전위 (mV)	
> 100	0
50 - 100	3.5
0 - 50	4
< 0	5
황화물 (sulfide)	
positive	3.5
trace	2
negative	0
습기 (moisture)	
배수성 (drainage) 나쁨, 항상 젖어 있는 상태	2
배수성 보통, 일반적으로 젖어 있음	1
배수성 좋음, 일반적으로 건조 상태	0

*1. 10점 이상이면 토양부식성이 크다고 판단. 방식조치 필요

*2. 황화물이 존재하고, 산화환원전위가 낮거나 음의 값이면 3점을 추가.

을 알 수 있다.

Table 5는 AWWA/ANSI C105/A21.5 규격에 제시된 방법을 이용하여 토양부식성에 대한 결과를 점수화 하였다.

표에서 알 수 있듯이 토양 심도에 따라 토질의 차이가 크기 때문에 이에 상응하는 토양부식성에 큰 차이가 나타난다. 일부 토양층에서는 부식성이 매우 크기 때문에 별도의 피복처리나 음극방식 (cathodic protection)과 같은 방식의 조치가 취해지지 않은 상태에서 매설된 강관파일은 필

Table 3 Result of soil tests

	측정심도 (m)	토질	색상	점도함량 (%)	수분 함량 (%)
A	1.5 ~ 2.0	매립토	암갈색	9.2	15.4
B	3 ~ 4.1	실트질 점토	암회색	22.3	37
C	7.5 ~ 7.8	실트질 모래	암회색	22.6	20.9
D	10.5~17.1	모래질 자갈	암회색	9.8	7.6
E	19.5~27.0	실트질 점토	암회색	16	36.9
F	31.5~35.0	모래질 자갈	암회색	12.4	10.6
H	40.5~42.5	이암	암회색	24.9	17.8

Table 4 Result of soil tests (continue)

	pH	비저항 (Ohm.cm)	Cl- (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	SRB (cells/g-soil)	산화환원 전위 (mV/NHE)
A	8.62	9091	0	10	3700	0.312
B	6.02	685	1320	580	1440000	0.012
C	7.71	1724	620	130	180000	0.006
D	8.84	8333	0	20	4560	0.417
E	8.67	787	880	530	1100000	0.089
F	8.25	12500	0	10	1500	0.188
H	7.12	391	350	2820	400000	0.22

Table 5 Soil corrosive environments Score

	측정 심도 (m)	심도 (m)	층 두께 (m)	비저항	수분 함량	pH	황화물	산화 환원 전위	총점
A	1.5	2.0	2.0	0	1	3	0	0	4
B	3	4.1	2.1	10	2	0	0	4	16
C	7.5	7.8	3.7	1	2	0	0	4	7
D	10.5	17.1	9.3	0	0	3	0	0	3
E	19.5	27.0	9.9	8	2	3	0	3.5	16.5
F	31.5	35.0	8.0	0	1	0	0	0	1
G	-	36.5	1.5	-	-	-	0	-	-
H	40.5	42.5	-	10	1	0	0	0	11

연적으로 부식이 진행되었을 것이다.

3.2 부식성의 정량적 평가

경험적으로 토양환경에서 철강재료의 최대부식속도 (maximum corrosion rate)는 시간에 따라서 다음과 같이 그 속도가 감소하는 멱급수의 법칙(power law)을 따르는 것으로 잘 알려져 있다. 즉,

$$P=kt^n \quad (1)$$

여기에서 P는 시간 t에서의 최대부식깊이 (maximum corrosion depth), k와 n은 시간과 무관한 상수이다. n값은 철강재료의 경우 토양의 종류에 따라서 0.1-0.9사이의 다양한 값을 보이는 것으로 알려져 있다. n이 클수록 부식성이 더 큰 토양이라고 말할 수 있다. 이러한 경험식을 바탕으로 하여 토양인자와 매설시간, 그리고 금속의 부식량을 이 식에 맞춰서 설명하려는 노력이 지속적으로 진행되어 왔고, 그 중에서도 미국의 표준청(National Bureau of Standards; NBS)에서 실시한 여러 토양환경에서의 금속 시편 매설시험 결과가 잘 알려져 있다.^[2]

이 식들을 그림으로 표현하면 아래의 Fig. 3 및 Fig. 4와

Table 6 Maximum corrosion rate and

통기성	비저항 (Ω cm)	WT (oz/ft ²)	PT (mil)
Good, Fair, Poor	> 1000	1.8T0.39	35T0.32
Very Poor	> 1000	2.7T0.58	13T0.82
Good, Fair, Poor	500 - 1000	3.7T0.61	42T0.42
Very Poor	500 - 1000		
Good, Fair, Poor	< 500	8.7T0.56	60T0.43
Very Poor	< 500		

같다.

즉, 토양의 통기성이 나쁘고 토양 비저항이 작은 토양에서는 부식속도가 시간에 따라 감소하기는 하지만 그 감소폭이 통기성이 좋은 토양에 비해서 상대적으로 작기 때문에 부식의 위험이 항상 존재하게 된다. 따라서 초기에는 통기성이 좋은 토양에서 부식이 더 발생할 수도 있으나 시간이 지나게 되면 혐기성의 토양에서 부식이 더 발생하게 된다. 따라서 통기성이 나쁘고 비저항이 작은 혐기성 토양

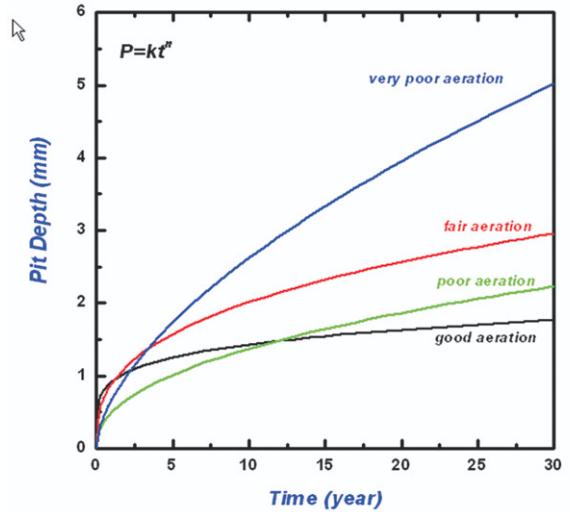


Fig. 3 Maximum corrosion depth curves

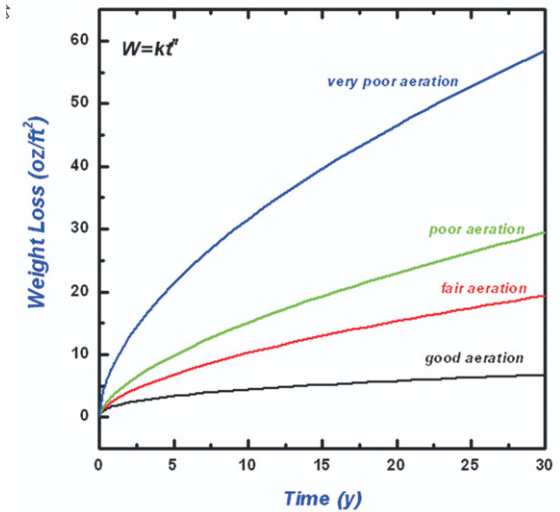


Fig. 4 Maximum corrosion rate curves

인 점토층일수록 부식성이 더 크다고 판단할 수 있다.

이 자료를 근거로 하여 토양환경에서 발생하는 철강재료의 부식속도를 예측할 수 있다. 여러가지 토양인자 중에서 비저항과 통기성(즉, 산화환원전위)을 이용하여 평균 무게 감량을 예측한 결과를 Table 7에 나타내었다.

토양비저항과 토양의 통기성을 측정할 수 있다면 토양의

플랜트 하부의 강과일 인접 토양의 부식성 평가

Table 7 Prediction of weight Loss at steel pipe file

	비저항 (Ohm .cm)	산화환원 전위 (mV/ NHE)	적응식	25년간 예상 부식량 (g/m ²)	25년간 평균 두께 감소 (mm)	예상 평균 부식 속도 (mm/y)
A	9091	0.312	1.8T0.39	1959	2.49	0.10
B	685	0.012	3.7T0.61	8172	11.07	0.44
C	1724	0.006	2.7T0.58	5416	6.88	0.28
D	8333	0.417	1.8T0.39	1959	2.49	0.10
E	787	0.089	3.7T0.61	8172	11.07	0.44
F	12500	0.188	1.8T0.39	1959	2.49	0.10
H	391	0.22	8.7T0.56	16358	20.79	0.83
산술평균				6285	8.18	0.33

화학적 인자만을 고려한 철강재료의 평균부식속도에 대한 예측이 가능하다. 또한, 앞의 식 [1]을 이용한 최대부식깊이(또는 최대부식속도)에 대한 예측도 가능하다.

국내에서는 토양에 매설된 가스공급배관을 대상으로 하여 토양비저항, 통기성과 같은 인자 이외에도 염소이온농도, 점토함량, 황산염환원세균 개체수와 같은 여러 가지 인자들을 도입, 다양한 토양인자의 영향을 위의 정량적인 예측식에 도입하고자 하는 시도를 통해서 다음과 같은 최대부식깊이에 대한 예측식이 도출되었다.

이 결과는 약 4년에 걸쳐서 부식이 발생한 배관을 직접 굴착하고, 그 부식량을 측정하였으며 이와 동시에 배관의 부식부위와 접촉하고 있는 토양을 직접 채취하여 총 16개 항목에 이르는 토양인자를 분석한 후 부식량과 토양인자의 상관관계에 대해서 통계적인 처리를 통해서 부식속도 예측식을 도출한 것이며, 그 예측식은 다음과 같다.^[4]

$$P_{\max} = 1.65P_{ct}^{0.372} \quad (2)$$

여기에서

SRB : 황산염환원세균 (sulfate-reducing bacteria)의 개체수 (cells/g-soil)

P/S : 관대지전위 (pipe-to-soil potential; V/CSE)

Cl⁻ : 염소이온농도 (ppm)

Eh : 산화환원전위 (reduction-oxidation potential; V/NHE)

Clay : 점토함량 (clay content: %)

pH : 토양 pH

ρ : 토양비저항 (soil resistivity; $\Omega \cdot \text{cm}$)

t : 매설시간 (y)

이 식을 통해서 얻은 예측 최대부식속도와 실제 부식이 발생한 배관에 대해서 현장에서 측정된 실측 최대부식속도의 관계를 그림으로 나타내면 다음 Fig. 5와 같다.

그림에서 보듯이 예측값과 실측값이 매우 잘 일치함을

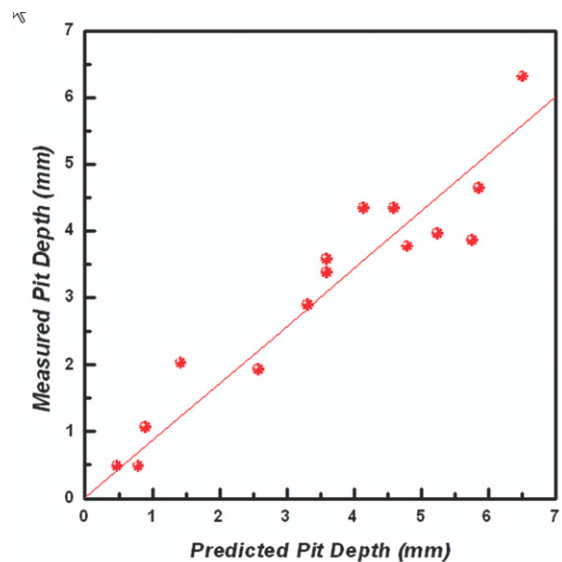


Fig. 5 Comparing the predicted value and the actually measured value of the maximum corrosion rate of steel at underground

알 수 있다. 따라서 토양인자 및 주변인자에 대한 현장조사 및 실험실 분석 등이 치밀하게 이루어진다면 식 [2]와 같이 토양환경에 매설된 철강재료의 부식속도를 여러 가지 토양인자 및 매설시간의 함수로서 충분히 예측하는 것이 가능하다.

이 식을 이용하여 이번 조사에서 얻은 토양분석 자료를 이용하여 각각의 지층별로 최대부식깊이를 예측할 수 있으며 그 결과는 Table 8과 같다.

각 토양깊이에 따른 예상 최대부식속도는 0.02~3.02mm/y 편차가 매우 크며 평균값은 각각 1.12mm/y였다. 지층에 따라서 부식성이 매우 큰 토양층이 존재하는

Table 1 Risk causes in plant utility project

	25년간 평균두께 감소 (mm)	예상 평균 부식속도 (mm/y)	25년간 최대 부식깊이 (mm)	예상 최대 부식속도 (mm/y)
A	2.49	0.10	0.77	0.03
B	11.07	0.44	75.57	3.02
C	6.88	0.28	44.23	1.77
D	2.49	0.10	0.67	0.03
E	11.07	0.44	46.16	1.85
F	2.49	0.10	0.78	0.03
H	20.79	0.83	27.74	1.11
평균	8.18	0.33	27.99	1.12

것을 확인하였다. 25년간의 최대 부식깊이를 계산해보면 부식성이 큰 지층에서는 부식이 심하게 진행되어 강관을 관통했을 가능성이 존재하는 것을 알 수 있다.

물론 강관파일의 경우에는 상대적으로 국부부식이 발생하여도 전체 강관파일의 면적과 비교할 때 부식된 부위가 지극히 적어서 구조적이나 경제적으로 그리 큰 문제가 되지 않을 수도 있다. 따라서 예상 최대부식깊이를 이용하여 기계적인 안전성까지 유추하기에는 부적합하고 평균부식속도를 적용하는 것이 타당할 것이다.

일반적으로 강관파일을 시공할 경우 대부분의 경우 예상 부식속도를 약 0.02mm/y 정도의 부식속도를 가정하고 100년 정도의 수명을 예상하여 약 2mm의 부식여분(corrosion allowance)을 부여하여 강관파일의 두께를 선정하게 된다. 또한, 여기예다가 최대허용강도를 설계할 때에도 안전계수를 도입하므로 실제 하중을 지탱하는데 필요한 두께보다 3-4mm 이상의 여분을 두는 셈이 된다.

기계적인 측면에서 약 4mm 정도의 두께 여유가 있고, 50년 정도의 수명을 가정한다면 4mm/50년 = 0.08mm/y 이상의 부식속도가 예상되는 토양에 강관파일이 특별한 방식조치없이 매설된다면 안전성 측면에서 위험이 있다고 평가할 수 있다.

따라서 평균부식속도가 0.08mm/y이상이고 ANSI부식성지수가 10점 이상이며 최대부식속도가 비정상적으로 큰 구간을 부식위험성이 큰 위험구간으로 선택하였다.

결과적으로 토양심도로 나누었을 때

- B (심도 2.0 - 4.1m)
- E (심도 17.1 - 27.0m)
- H (심도 36.5 - 42.5m)

의 구간의 부식위험성이 크다고 판단되며, 평균적으로도 0.33mm/y의 평균부식속도가 예상되므로 부식위험성이 크다고 할 수 있다. 결론적으로 강관파일에 대한 전기방식과 같은 적절한 방식조치를 취해야만 안전성을 유지할 수 있을 것이다.

4. 결론

- 1) 플랜트 하부 강파일 기초 주변 토양의 부식성을 평가하기 위해서 현장조사, 현장 보링작업을 통한 시료 채취 및 실험실 분석을 거친 결과를 검토하였다.
- 2) 토양 분석 결과 강관파일이 타설된 토양은 여러 개의 특성이 다른 토양층으로 구성되어 있었으며, 각 지층의 화학적, 물리적 성질이 다르므로 강관파일의 타설 깊이에 따른 부식성의 차이가 발생할 것을 예상할 수 있었다.
- 3) 분석 결과를 토대로 정성적인 부식성 평가, 평균부식속도 및 최대부식속도를 예측한 결과, 일부 지층에서는 일반적으로 강관파일 설계시 적용되는 부식속도인 0.01- 0.02mm/y 이상의 평균부식속도를 보이고 있었다 (0.33mm/y).
- 4) 세 가지 평가방법에서 공통적으로 부식의 위험성이 존재하는 구간을 방식조치가 필요한 구간으로 판단하였다. 그 결과,

- B (심도 2.0 - 4.1m)
- E (심도 17.1 - 27.0m)
- H (심도 36.5 - 42.5m)

의 구간의 부식위험성이 크다고 판단되며, 평균부식속도를 고려한 (0.33mm/y) 예상부식깊이가 부식여분(2mm)을 초과하는 것으로 예상된다.

- 5) 결론적으로 적절한 방식조치(전기방식과 같은)를 취해야만 안전성을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. American Water Works Association(AWWA) Manual M27, 1st ed., "External Corrosion - Introduction to Chemistry and Corrosion," (1999).
2. ANSI (American National Standards Institute) A21.5 (1972).
3. 부식방식핸드북, 사단법인 일본부식방식협회, 丸善株式會社 P.205 (2001).
4. S.Y. Li, J.Y. Jeon and Y.T. Kho, "Statistical Approach to Underground Corrosion of Carbon Steel Pipeline," 12th Asian-Pacific Corrosion Control Conference (APCCC), Seoul, Korea, Oct.8-12 (2001). 