



간척지대에 매설된 대구경 금속관의 외면 부식손상 평가

Assessment of external corrosion deterioration of large diameter metallic water pipes buried in reclaimed land

이호민·최태호·김정현·배철호*

Ho-Min Lee·Tae-Ho Choi·Jung-Hyun Kim·Cheol-Ho Bae*

한국수자원공사 K-water연구원

K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the corrosion damage of large diameter metallic pipes buried in reclaimed land due to the corrosion effect by soil, and to propose a method of installing metal pipes in the reclaimed land. The results are as follow. First, the soil of the reclaimed land was gray clay, the soil specific resistance indicating soil corrosiveness was at least 120 Ω -cm, the pH was weakly acidic(5.04 to 5.60), the redox potential was at least 62 mV, the moisture content was at most 48.8%, and chlorine ions and sulfate ions were up to 4,706.1 mg/kg and 420 mg/kg. Therefore, the overall soil corrosivity score was up to 19, and the external corrosion effect seems to be very large. Second, the condition of straight part of pipes was in good condition, but most of KP joints were affected by corrosion at a severe level. The reason for this seems to be that KP joints accelerated corrosion due to stress and crevice corrosion in addition to galvanic corrosion in the same environment. Third, as a result of evaluating correlations of each item that affects the corrosion on the external part, the lower the soil resistivity and redox potential, the greater the effect on the KP joints corrosion, and the moisture content, chloride ion, and sulfate ion, the higher the value, the greater the effect on the corrosion of KP joints. In addition, among soil corrosion items, the coefficient of determination of soil resistivity with corrosion of KP joints was the highest with 0.6439~0.7672. Fourth, when installing metal pipes or other accessories because the soil of

Received 20 August 2020, revised 15 October 2020, accepted 16 October 2020.

*Corresponding author: Cheol-Ho Bae (E-mail:baech@kwater.or.kr)

- 이호민 (선임연구원) / Ho-Min Lee (Senior Researcher)
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea
- 최태호 (책임연구원) / Tae-Ho Choi (Principal Researcher)
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea
- 김정현 (수석연구원) / Jung-Hyun Kim (Head Researcher)
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea
- 배철호 (수석연구원) / Cheol-Ho Bae (Head Researcher)
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

the reclaimed land is highly corrosive, it is necessary to apply a corrosion preventive method to extend the life of pipes and prevent leakage accidents caused by corrosion damage to the joint.

Key words: External corrosion, Metallic water pipes, Reclaimed land, Soil corrosivity

주제어: 외면부식, 금속관, 간척지, 토양비저항

1. 서 론

일반적으로 주철관종 또는 강관 등 상수관로로 주로 사용되는 금속관종은 대개 부식으로 인해 내면 또는 외면으로부터 두께 등이 감소하여 hole이나 내외부 하중에 의한 응력이 증가하여 결국 균열이나 파열 등 파손에 도달하게 된다. 특히 관 외면에서 부식에 영향을 주는 대표적인 인자로는 토양의 비균질적인 토양특성(토양 조직과 구조), 토양비저항, 토양 pH, 토양수분, 통기성, 용존성 염, 지표수 수위 등 다양한 요소가 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Bae et al., 2006). 그러나 Rajani (2000)는 부식 인자들의 환경적 조건들은 계절적으로 또는 국부적으로 변화하여 이러한 환경적 조건들이 관의 부식에 구체적으로 어떠한 영향을 주는지 규명하는 것은 매우 어려운 것으로 평가한 바 있다.

토양의 외부부식에 대한 영향력을 평가하는 방법으로는 가장 대표적인 방법이 미국국가규격(ANSI, American National Standards Institute)/미국수도협회(AWWA, American Water Works Association) 평가법과 독일가스수도기술협회(DVGW, Deutsche Vereinigung des Gas und Wasserfaches) 평가법이 있다. 이 두 평가법에서 평가항목, 항목수, 기준 등에서 차이가 난다. 특히 이들 평가법에서 항목상에서의 가장 큰 차이점은 부식성 판단에서 매우 중요한 항목으로 볼 수 있는 토양비저항에서 주철관종 또는 강관에 대한 측정치에 따른 영향력 기준이 다르다. ANSI에서는 주철관종에 대해서 토양비저항이 2,000 Ω-cm 이상이면 부식성에서 “0”이라는 점수를 부여하지만, 강관에 대한 DVGW에서는 10,000 Ω-cm 이상일 때 부식성이 거의 없는 것으로 보고 있다. 이러한 차이는 ANSI 평가법은 주로 주철관종에 대해서 제안된 방법이고, DVGW 평가법은 주로 강관인 가스배관에 적용되는 방법이기 때문으로 볼 수 있다 (Bae et al., 2006). 국내에서는 Jung et al. (2001)이 수행한 연구에 따르면, 주철관종에 대해서는 DVGW 평가법보다 ANSI/AWWA 등이 더 적합한 것으로 보았으며, 관 외면 부식상태와 토양

pH, 염소이온, 황산이온 등이 상관성이 높은 것으로 보고한 바 있다. Bae et al. (2006)은 국내에서 69개의 토양 샘플을 채취하여 ANSI/AWWA에 포함되는 각 항목과 주철관종에 대한 외면 최대부식속도의 상관성을 분석하였고, ANSI/AWWA 평가법에 따른 경우, 국내 토양 대부분이 부식성이 강하지 않은 비부식성 토양에 해당하는 것으로 나타났으며, 토양부식성 각 항목과 외면 부식속도간 상관성도 뚜렷하지 않은 결과를 확인했다. 이는 외면부식이 토양부식성 각 개별 항목보다는 전체 항목들이 복합적으로 관 외면부식에 영향을 주기 때문으로 보았다.

국외의 경우, Schwerdtfeger (1954)는 강관과 주철관종을 대상으로 하여 다양한 토양조건에서 무게손실을 측정하여 시간변화에 따른 관체의 부식을 단기적으로 평가하였으나, 실제 매설된 관로에 대해 적용성을 확보할 수는 없었다. Malvin (1958)의 연구에서는, 매설된 금속관의 부식에 대한 토양조건을 분석하기 위해 현장실험을 수행하였으며, 특히 토양의 비저항이 매설관의 부식에 큰 영향을 미친다는 것을 확인했다. 하지만 해당 연구에서는 토양비저항 외에 pH, 토양 함유물 등 다른 인자들을 제어하지 못하여 토양비저항의 영향정도를 평가할 수는 없었다. Moore and Hallmark (1987)의 연구에서는 미국 텍사스의 토양부식성을 평가하기 위해 15개의 각각 다른 토양에 대하여 두 깊이에서 전기저항 프로브를 통해 매립된 관로의 부식을 측정하였으나, 적용된 표준 데이터가 일부 과대평가된 것으로 밝혀졌다. Murray and Moran (1987)에서는 다양한 수분함량을 가진 토양조건에서 부식을 평가하기 위해 현장 전기 화학적 임피던스 분광법(EIS, electrochemical impedance spectroscopy measurements)을 적용하였고, 토양의 수분함량이 부식속도에 영향을 주는 것을 확인하였다.

Norin and Vinka (2003)의 연구에서는, 1년, 3년간 다양한 토양환경에 매설된 금속관의 부식을 조사하였고, 일반적인 토양과 비교하여 퇴메우기 또는 교란된 토양의 경우, 금속관에 많은 부식이 생성된 것을 확인



하였다. Yan et al. (2014)의 연구에서는 점토질 토양조건에서 수분함량을 일정하게 유지시킨 뒤 금속관을 매설하여 토양내 산화철의 비율에 따른 부식성을 평가하였고, 근래에 들어 Sotani Asadi and Melchers (2018)의 연구에서는 매설된지 34~129년 경과된 관경 200~600 mm의 주철관중에 대해 부식을 조사하였으며, 외면에서 토양과 강한 압력조건으로 접촉된 지점과, 토양의 수분함량이 높은 지점에서 부식손상이 큰 것을 확인할 수 있었다.

하지만, 이러한 기존 연구들에서 매립된 금속관의 부식은 다양한 환경 변수들의 조합을 제어, 고려하지 못하였으며, 또한 실험실에서의 연구는 현장조건을 제한적으로 반영했다는 한계가 있다. 또한 간척지대의 토양특성에 초점을 맞추어 금속관로의 외면 부식손상을 평가한 연구사례는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 간척지에 매설된 금속관로(주철관중) 구간에 대한 토양특성이 관 외면 부식손상에 미치는 영향을 평가하고, 이를 통해 간척지에 매설될 금속상수도관에 대한 설치방안을 제안하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 대상구간

본 연구에서는 간척지에 매설된 금속관중에 토양

특성이 관 외면 부식에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 전남지역의 H 계통 중 간척지를 통과하는 900 m 구간을 대상으로 선정하였다. 현재 해당 간척지는 주로 논 부지로 활용되고 있다. 해당 간척지 내 토양특성이 관 외면의 부식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 간척지 내 5개소(S-1~S-5)를 선정하여 토양특성과 매설된 관의 외면 부식손상을 평가하였다. 해당 구간 중 S-3지점은 간척지의 중앙부이며, S-1, S-5로 갈수록 간척지의 외측에 해당한다.

2.2 대상관중

간척지에 매설된 금속관은 시멘트모르터 라이닝 닥타일주철관(CML-DCIP, cement mortar lining ductile cast iron pipe)으로 2003년에 매설되었고, 관경은 700 mm이다. CML-DCIP는 제조시 관 외면은 역청계로 얇게 페인팅이 되어있으며, 관의 연결은 KP 메케니컬 조인트로 이루어진다. KP 메케니컬 조인트는 대개 관 연결 시 압륜을 사용하며, 볼트와 너트를 이용하여 압륜으로 관의 벨(bell) 부분을 단단히 고정하여 관을 연결함과 동시에 압륜으로 벨 내측의 고무링을 압착하여 수밀하는 연결방식이다. 조사대상 간척지에 매설된 CML-DCIP의 상세 제원은 Table 1과 같다. CML-DCIP가 매설된 깊이는 각 위치에 따라 1.0~2.1 m 범위이며, CML-DCIP의 관 외면을 토양 등으로 인한 부식으로부터 보호하기 위한 전기방식 등 별도의

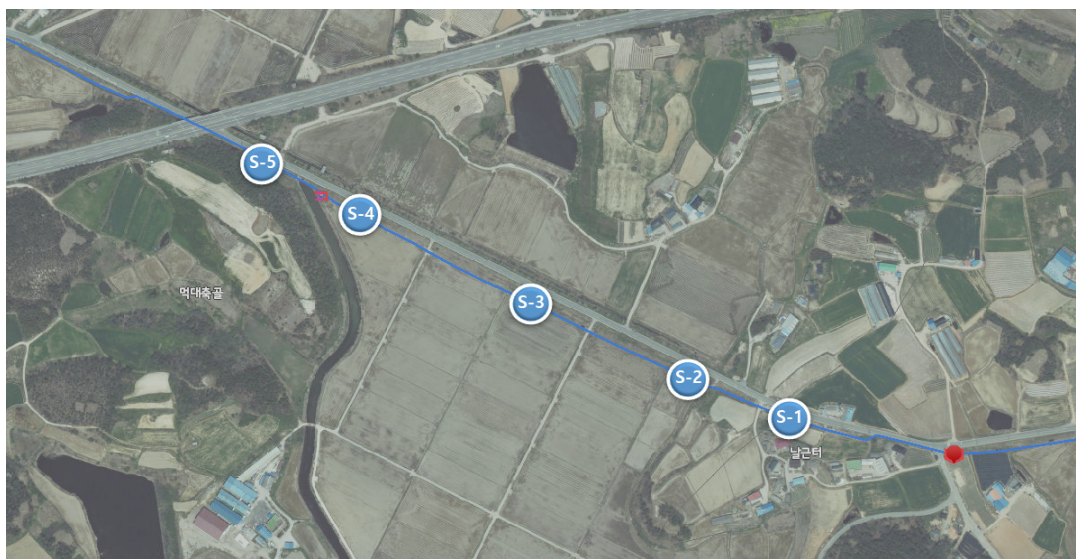


Fig. 1. Investigation site of research.

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

Table 1. Specifications of pipe and connecting components

Categories		Specifications	Notes
Pipe type		CML-DCIP	
Installation year		2003	
Diameter (mm)		700	
Thickness (mm)		12	Class 2
Coating	Internal	Cement mortar lining	
	External	Bituminous material	
Compressing bend	Thickness (mm)	9	
	Width (mm)	90	
	Bolt hole (EA)	16	
Bolt	Diameter (mm)	22.17	24 mm
	Length(screw length) (mm)	105(65)	
Nut	Diameter (mm)	24	
	Width (mm)	38.94	
	Thickness (mm)	8.37~9.45	

운영은 없는 상황이다. 또한 관 주변의 토양은 대부분 진한 회색을 나타내는 점토성 토양이었다.

2.3 조사방법

본 연구에서는 간척지에 매설된 금속관인 CML-DCIP의 부식손상을 평가하기 위하여 조사지점(5개소)에 대하여 각각 굴착을 한 후 매설된 관을 외부로 노출시킨 상태에서 관 주변의 토양을 분석하여 토양부식성을 평가하고, 이후 CML-DCIP의 직관부와 연결 부속류에 대하여 각각 부식이 발생된 면적, 깊이 등을 상세 조사하였다.

토양 부식성은 ANSI/AWWA의 토양부식성 평가방법을 수정하여 적용한 방법 (Kim et al., 2002)으로 평가하였다. 해당 방법은 Table 2와 같이 토양비저항, 토양 pH, 토양 산화환원전위, 함수율, 산화물(염/황화물) 등 5개 항목을 측정하여 각 측정된 항목 값의 조건범위에 맞는 점수를 모두 합산하고, 점수에 따라 부식성을 지수로 표현하여 판단하는 방법이며, 판단기준은 Table 3과 같다. Table 4와 같이, 토양부식성 평가에 필요한 5개 항목 중 토양비저항, pH, 산화환원전위, 함수율 등은 현장에서 측정하였고, 산화물은 관 주변 토양을 채취한 후 즉시 실험실에서 용출시험을 통하여 측정하였다.

굴착 후 간척지 토양특성으로 인한 CML-DCIP의 부식에 의한 영향을 직관부와 KP 메케니컬 조인트의 부속류(압륜, 볼트, 너트 등)로 구분하여 조사하고,

Table 2. ANSI/AWWA evaluation method(modified)

Categories	Range	Weight factor
Electrical resistivity of soil	< 700 Ω-cm	10
	700~1,000	8
	1,000~1,200	5
	1,200~1,500	2
	1,500~2,000	1
	> 2,000 Ω-cm	0
pH	0~2	5
	2~4	3
	4~6.5	1
	6.5~7.5	0
	7.5~8.5	1
	> 8.5	3
Redox potential	> 100 mV	0
	50~100 mV	3.5
	0~50 mV	4
	(-)	5
Moisture content	> 20%	2
	10~20%	1
	< 10%	0
Oxide (chloride/sulfide)	> (+)100 mg/kg	3.5
	< 100 mg/kg (trace element)	2
	(-)	0

Table 3. Evaluation standard of corrosivity by soil condition

Evaluation score	Range
< 2	Insignificant corrosivity
2~5	Low corrosivity
5~10	Moderate corrosivity
> 10	High corrosivity

**Table 4.** Soil corrosivity measure methods

Categories	Measure method	Equipment	Notes
Electrical resistivity of soil	Soil box method	Nilsson soil resistance meter model 400 (Miller soil box)	Field
pH	pH meter	PRN-41 (Ag-AgCl electrode)	Field
Redox potential	ORP meter	PRN-41 (Ion electrode)	Field
Moisture content	Soil moisture monitor	ECH ₂ O check	Field
Oxide (chloride)	Spectrophotometer	DR/4000 (Mercuric thiocyanate method)	Lab
Oxide (sulfide)	Spectrophotometer	DR/4000 (Sulfa ver 4 method)	Lab

정량적으로 평가하기 위하여 관 주변 대부분의 토양 등 불순물을 제거한 후, 전동 브러싱 등을 이용하여 표면처리를 거쳐 불순물이 없고 순금속이 드러난 상태에서 부식이 발생한 면적, 깊이 등을 각각 조사하였다.

3. 연구결과

3.1 토양 부식성 평가

CML-DCIP가 매설된 H 계통 5개소에서 대한 토양부식성 항목 측정 결과는 Table 5와 같다. Table 5에서 보면 간척지 중앙 부근인 S-3과 S-4 지점 등의 토양비저항은 120~2000 Ω·cm로 매우 낮게 측정되었으며, 외측(S-1, S-5)으로 갈수록 토양비저항이 높아지는 경향을 보였다. 일반적으로 토양비저항이 상대적으로 낮으면 그만큼 부식에 영향을 주는 부식 전류의 흐름이 좋아지므로 부식이 보다 촉진될 수 있다 (Booth and Tiller, 1962; Hamilton, 1960; Malvin, 1958; Rajani and Makar, 2000). 토양 pH는 5.04~5.60 범위로 큰 차이가 없었으며, 산화환원전위는 S-3 지점이 62 mV로 매우 낮아 토양특성이 다른 위치에 비하여 상대적으로 산소가 적은 혐기적 환경인 것으로 보인다. 일반적으로 철의 부식은 호기성 미생물 보다는 주로 혐기성 미생물에 의해서 발생되는

것으로 알려져 있다 (Javaherdashti, 1999; Javed et al., 2015; Li et al., 2001). Table 5에서 함수율은 토양 내 통기성과 관련된 지표로, 함수율이 높다는 것은 그만큼 상대적으로 물이 빠져나가기 어려운 토양특성이므로, 통기성이 낮아 혐기성 미생물의 서식에 유리한 환경으로 볼 수 있다. 함수율의 경우에도 조사지점 중 토양비저항 값이 낮았던 S-3과 S-4 지점에서 상대적으로 높게 나타나 부식성이 높은 것을 확인할 수 있었다 (Gupta and Gupta, 1979; Noor and Al-Moubaraki, 2014). 토양 내 염소이온, 황산이온 등도 S-2~S-4 지점에서 높게 나타나는 특성을 보였으며, 외측으로 갈수록 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 연속적인 H 계통의 간척지구간이라도, 구간 전체가 동일한 토양특성을 보이기도 하는 간척지 중간지역에서 상대적으로 토양비저항, 산화환원전위는 낮고, 함수율, 염소, 황산이온 등은 높아 관 외면 부식에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

Fig. 2는 각 조사지점 별로 측정된 토양부식성에 영향을 주는 항목을 통해 종합적으로 토양의 부식성을 점수로 환산한 결과이다. Fig. 2와 같이, 간척지 내 5개 조사지점 중 토양비저항이 낮았던 S-3, S-4 지점의 토양부식성 점수가 10점 이상으로 부식이 “매우강함”으로 나타났으며, S-1, S-2, S-5 등은 점수가 6~7점으로 “중간수준”의 부식성을 보였다. 따라서 간척지 내에

Table 5. Soil corrosivity test results at the sites

Sites	Electrical resistivity of soil (Ω·cm)	pH	Redox potential (mV)	Moisture content (%)	Chlorine ion (mg/kg)	Sulfate ion (mg/kg)
S-1	5,200	5.24	134	35.3	198.7	28.5
S-2	2,000	5.60	121	36.7	365.3	420.6
S-3	530	5.53	62	46.8	606.5	312.3
S-4	120	5.49	124	48.8	4,706.1	348.0
S-5	2,100	5.04	152	37.1	249.2	260.1

Note: All items except chlorine ion and sulfate ion were measured at the survey sites

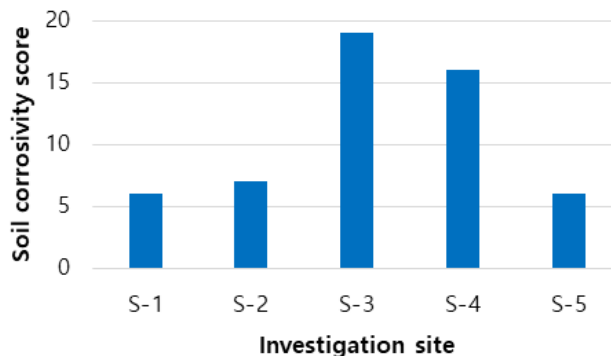


Fig. 2. Soil corrosivity score at the sites.

조사지점 별로도 부식성 수준의 차이가 있어, 관 외면 부식에 미치는 영향에도 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 또한 간척지의 경우 토양특성이 부식을 더 크게 촉진시킬 수 있으므로, 금속관의 경우에는 이러한 토양특성을 고려한 부식 예방 차원의 설치와 매설환경 조성이 매우 중요할 것으로 판단된다.

3.2 금속관의 부식특성

본 연구에서는 간척지에 매설된 주철관중에 대한 관 외면 부식손상 상태를 조사하기 위하여 5개소에 대하여 굴착 후 관을 노출한 상태에서 외부 불순물 등을 제거하고, 표면 블러싱을 한 후 부식손상 상태를 직관부와 KP 메케니컬 조인트 부속류로 구분하여 현장에서 조사하였고, 그 결과를 Fig. 3과 Table 6에 나타내었다.

Fig. 3와 같이, 보면 조사대상 구간 내 5개소 지점 중 닥타일주철관의 직관부는 대부분 부식손상의 흔적이 거의 발생되지 않았으며, 간척지 중앙 부근인 S-4 지점에서만 부식으로 인한 일부 표면부식이 얇게 진행된 상태였고, 국부적으로 진행된 부식깊이 또한 0.6 mm 이하로 매우 낮게 나타났다. 반면 닥타일주철관

의 KP 메케니컬 조인트 부속류인 압륜, 볼트, 너트 등에서는 부식이 비교적 심각하게 진행이 되는 것으로 나타났다. 조사지점별로 보면, 간척지 중앙부에 위치한 S-2~S-4 지점의 연결 부속류의 부식상태가 매우 심각하였고, 간척지 외측으로 갈수록 부식손상 정도는 약화되는 것으로 나타났다. 이는 앞서 토양부식성 평가결과에서 간척지 중앙부가 가장 토양부식성이 강하고, 외측으로 갈수록 부식성이 감소하는 경향과도 일치하는 것으로 판단된다.

Table 6에서 각 지점의 KP 메케니컬 조인트 부속류에 대하여 부식면적과 깊이 등을 비교해 보면, 압륜부는 간척지 중앙 부근인 S-2~S-4 지점에서 모두 약 80%의 부식면적이 나타났으며, 간척지 중앙에서 외측 부근인 S-1 지점은 50%, S-5 지점은 5% 수준으로 낮게 나타났다. 볼트의 경우에는 압륜부 내부의 경우 직접 관측에 어려움이 있어 볼트의 머리 부분과 볼트와 너트 연결부위, 그리고 끝단 부분을 관측한 결과, 볼트 머리 부분은 대부분 부식에 의한 손상을 받은 상태였고, 볼트의 중앙과 끝단 부분의 직경은 2.54~22.17 mm까지 감소하여 볼트 끝단 부분이 소멸되거나 크게 감소한 것으로 나타났다. 너트의 경우에는 간척지 중앙에 위치한 S-2~S-4 지점에서 너트 대부분이 부식손상을 받은 상태(100% 수준)이며, 일부 너트 두께가 소멸되거나 너트 외부로 부식깊이가 1.0~8.39 mm까지 진행된 것으로 나타났다. 따라서 전체적으로 보면, 간척지에 매설된 닥타일주철관의 경우, 직관부의 부식에 의한 관 외면 손상은 상대적으로 없었으나, 관의 연결에 사용되는 주요 접합 부속류인 압륜, 볼트, 너트 등은 매우 심각한 수준으로 부식의 영향이 있는 것으로 판단된다.

다만 조사결과에서 닥타일주철관 직관부는 대체로 부식의 영향을 받지 않았으나, KP 메케니컬 조인트를 구성하는 압륜, 너트, 볼트 등이 상대적으로 매우 큰 부

Table 6. Corrosion conditions of pipes and connecting components at the survey sites

Sites	Straight pipe		Compressing bend		Bolt (diameter=22.17 mm)		Nut (thickness=9.45 mm)	
	Corrosion area (%)	Corrosion depth (mm)	Corrosion area (%)	Corrosion depth (mm)	Corrosion area (%)	Reduced diameter at tip (mm)	Corrosion area (%)	Corrosion depth (mm)
S-1	0	0	50 <	1.83	90 <	2.54	20 <	1.0
S-2	0	0	80 <	2.45	100 <	3.77	50 <	2.0
S-3	0	0	80 <	4.06	100 <	9.27	80 <	4.5
S-4	< 80	< 0.6	80 <	4.05	100 <	22.17	100 <	8.39
S-5	0	0	5 <	1.50	100 <	14.96	50 <	1.29



Fig. 3. Corrosion conditions of pipes, compressing bends, bolts and nuts at the sites(after abrasive brushing).



Fig. 4. Corrosion conditions of bolts and nuts before and after abrasive blasting.

식 영향을 받은 이유는 일반적으로 조인트 등을 구성하는 압륜, 볼트, 너트 등은 관을 연결하고, 이탈을 방지하기 위한 힘이 작용하게 되므로, 직관부와 달리 조인트 각 부위에 따라서는 집중응력(concentration stress)이 발생하며, 응력이 집중될 때 부식이 더 가속화되는 것으로 보인다 (Buechel and Pappas, 2015). Fig. 4의 S-4 지점에서

일부 채취한 볼트와 너트의 블라스팅 후 상태에서 알 수 있듯이, 볼트에 너트가 체결된 부위가 너트로 부식으로 보호될 것으로 추정되나, 반대로 너트로 인한 응력이 크게 작용하여 볼트와 너트 모두 부식으로 심각하게 손상이 되어있는 것으로 나타났다. 더불어 조인트 특성상 관을 연결한 뒤 되메움 후에는 인근 토양이 압륜 내 불

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp.345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

트, 너트 부근 등에 혼입 또는 주변에 고정되게 되므로, 틈새부식에 의한 영향이 가중되는 환경이었고 (Collins, 1993), 특히 간척지로서 염소농도가 높아 전반적으로 조인트 부위가 산성화되어 동일한 환경에서도 직관부 보다는 조인트 부분에서 전체적으로 부식이 더 촉진되었던 것으로 보인다.

또한 동일한 부식 환경에 있더라도 닥타일주철관 직관부가 상대적으로 부식의 영향이 발생되지 않은 이유로는 KP 메케니컬 조인트에 작용되는 이러한 집중응력, 틈새부식 등으로 인해 조인트 자체(압륜, 볼트, 너트 등) 부식이 촉진, 음극(cathode) 역할을 하게 되어 주변 직관부는 양극(anode)화가 되고 부식에 의한 영향이 상대적으로 크게 작용하지 않았던 것으로 보인다. 이는 일반적으로 동일한 단일관 표면에서도 전위차에 따라 일부는 음극으로, 다른 부위는 양극으로 작용하게 되어 관 표면의 부식이 불균일하게, 전체 부식이 아닌 국부적인 형태로 공식(pitting)이 진행되는 현상과 유사한 것으로 판단된다. 일반적으로 동일한 금속 표면에서도 부식이 먼저 발생하는 다양한 원인으로서는 닥타일주철관 제조특성 상 주조를 통해 제조되며, 금속 내 흑연 등이 불균일하게 존재, 위치에 따라 성분이나 조직이 상이하여 갈바닉 효과로 각 위치에서의 전위차가 달라지고 음극, 양극이 다르게 나타날 수 있으며 (Collins, 1993), 또한 앞서 S-4 예에서 보듯이 표면에 작용하는 응력의 차이로 인해 응력이 작게 작용하는 부위는 상대적으로 음극으로 작용하기

쉽고, 그 반대는 양극으로 작용하여 부식이 가속화될 수 있기 때문이다.

따라서 간척지 등 부식성이 매우 높은 토양환경에서는 닥타일주철관의 KP 메케니컬 조인트 연결방식 외의 방법(타이튼 접합 등)이 고려되어야 할 것으로 판단되며, 매설 시 관 외면 보호를 위한 폴리에틸렌 encasement, 또는 운영 시 전기방식이 필요할 것으로 판단된다 (ANSI/AWWA C105/A21.5-99, AWWA, 1999).

또한 강관의 경우에도, 간척지에 KP 메케니컬 조인트 연결방식은 동일한 부식손상을 받을 수 있으므로 KP 메케니컬 조인트의 사용을 지양하여야 하며, 용접 마감인 경우에는 현장 용접부 마감 도장에 매우 주의가 필요할 것으로 판단된다.

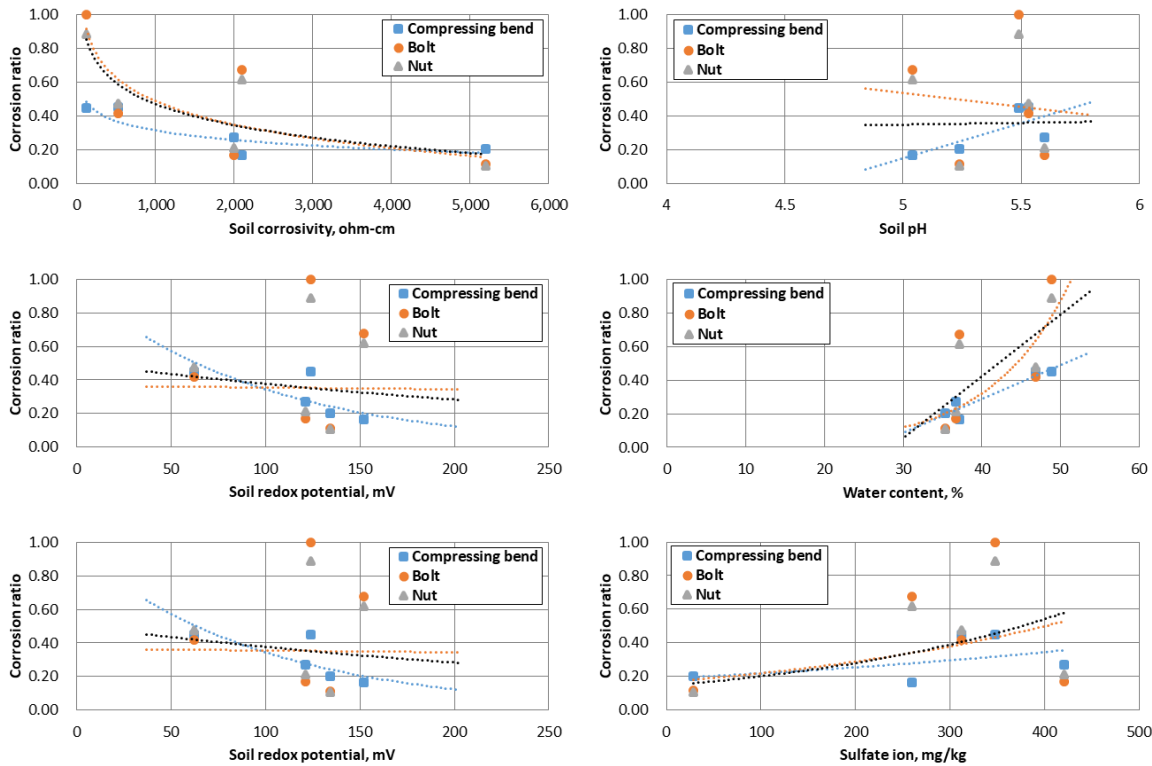
3.3 토양 부식성과 부식손상과의 관계

본 연구에서는 간척지의 토양특성이 금속관의 외면 부식특성에 미치는 영향 관계를 파악하기 위하여 토양부식성 각 항목, 그리고 점수와 부식이 상대적으로 높은 조인트를 구성하는 압륜, 볼트, 너트와의 관계를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에서 부식비율 (corrosion ratio)은 각 조인트 압륜, 너트 등은 초기두께 볼트는 직경을 기준으로 부식이 진행될 최고 깊이를 나눈 값이다. 또한 각 관계식과 결정계수(R²)를 Table 7에 나타내었다. Fig. 5와 같이, 토양비저항, 산화환원전위 등은 그 값이 커질수록 조인트를 구성하

Table 7. The relationships among KP joint components and soil corrosivity factors

Categories	Compressing bend (C)	Bolt (B)	Nut (N)
Soil resistivity of soil (Ω-cm)	= -0.08ln(C) + 0.87 (R ² = 0.7672)	= -0.201ln(B)+1.8778 (R ² = 0.6439)	= -0.181ln(N)+1.7187 (R ² = 0.7126)
pH	= 7E-0.5e ^{1.5523C} (R ² = 0.6385)	= -0.1619B+1.3468 (R ² = 0.0106)	= 0.2579e ^{0.0607N} (R ² = 0.0003)
Redox potential (mV)	= 0.9528e ^{-0.01C} (R ² = 0.5782)	= 0.3662e ^{-3E-04B} (R ² = 0.5782)	= 0.502e ^{-0.003N} (R ² = 0.0127)
Water content (%)	= 0.0202C-0.5169 (R ² = 0.8966)	= 0.0058e0.1004B (R ² = 0.4861)	= 0.03689N-1.0465 (R ² = 0.5507)
Chlorine ion (mg/kg)	= 4E-05C+0.2539 (R ² = 0.4187)	= 0.0002B+0.2907 (R ² = 0.6405)	= 0.0001N+0.3064 (R ² = 0.6026)
Sulfate ion (mg/kg)	= 0.1879e0.0015C (R ² = 0.249)	= 0.1667e ^{0.0027B} (R ² = 0.249)	= 0.145e ^{0.0033N} (R ² = 0.3254)
Soil corrosivity evaluation score	= 0.0202C+0.0984 (R ² = 0.9156)	= 0.1649e ^{0.0732B} (R ² = 0.2628)	= 0.1617e ^{0.0763N} (R ² = 0.3206)

Note: C, B, N are corrosion ratios of KP joint



pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

Fig. 5. The relationship of soil corrosivity factors and corrosion ratio of the KP joint(compressing bend, bolt, nut).

는 압륜, 볼트, 너트 등의 부식비율은 비선형적으로 감소하는 경향을 보였고, 토양 함수율, 염소, 황산이온 등은 그 값이 커질수록 부식비율이 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 토양비저항은 그 값이 증가할수록 토양 내 부식 전류의 흐름에 대한 저항이 증가하므로 전체적으로 부식에 미치는 영향이 상대적으로 감소하기 때문으로 판단된다. 산화환원전위도 그 값이 증가하면, 토양의 전체적인 특성이 호기성이 되므로, 부식을 유발하는 혐기성 미생물의 서식에 불리한 환경이 되고, 상대적으로 부식에 의한 영향을 덜 받는 것으로 보인다. 다만 토양 함수율, 염소, 황산이온 등은 그 값이 증가하면, 상대적으로 통기성이 악화되고, 또한 염 또는 황화물 등에 의해 부식에 미치는 영향이 커지는 것으로 판단된다. 특히 간척지의 경우 염화물의 농도가 높게 나타나, 황화물보다는 염화물과 부식비율과의 관계가 더 뚜렷한 경향을 보이는 것으로 보인다. 토양 pH는 변화의 폭이 매우 좁아 KP 메케니컬 조인트 부속류에 따라 다른 경향을 보여 뚜렷한 증감에 대한 상관성은 보이지 않았던 것으로 판단된다.

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

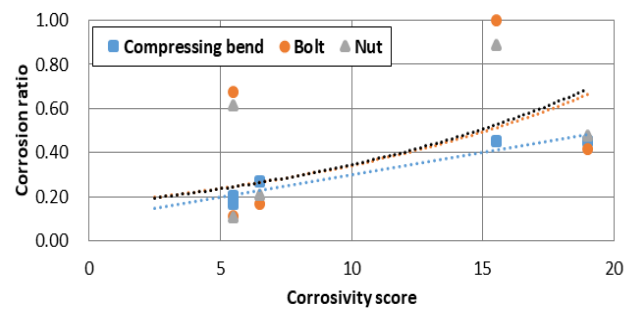


Fig. 6. The relationship of soil corrosivity score and corrosion ratio of the KP joint(compressing bend, bolt, nut).

Fig. 6에서 토양비저항 각 항목에 대한 부식영향력을 토양부식성 점수로 표현한 지수와 KP 메케니컬 조인트 부속류의 부식비율 간 관계를 보면, 전체적으로 점수가 높아질수록 부식비율도 선형 또는 비선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다만 간척지의 경우에는 낮은 토양비저항 점수에서도 부식이 크게 진행되는 것으로 나타나, 기존 토양부식성을 나타내는 점수에 대한 기준을 하향 조정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Table 7에서 각 토양 부식성 항목 관계식과 결정계수(R^2)를 보면, 토양부식성 항목에 대하여 일부 KP 메

케니컬 조인트 부속류를 제외하고는 대부분 낮지 않은 상관성을 보이는 것으로 판단된다. 특히 다른 항목보다 토양비저항에 대한 결정계수가 전체적으로 높아, 간척지에 매설된 KP 메케니컬 조인트에 대한 부식영향을 예측하는데 도움을 줄 것으로 판단된다. 또한, 닥타일주철관이며 관 연결방식이 KP 메케니컬 조인트로 간척지에 매설할 경우에는 토양비저항 등을 측정하여 부식에 대한 영향력을 평가하고, 부식성이 높게 예측되는 경우에는 반드시 조인트 부분에 대한 방식이 가능한 형태로의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 간척지에 매설된 금속관종인 닥타일주철관에 대한 토양에 의한 부식영향에 따른 부식손상 등을 평가하고, 향후 간척지에 매설될 금속상수도관에 대한 설치 방안을 제안하고자 하였고, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 간척지의 토양은 토양 자체가 회색을 띠는 점토성 토양이었으며, 토양부식성을 나타내는 토양비저항은 최소 120 Ω-cm까지 나타났고, pH는 약산성(5.04~5.60)에 해당했으며, 산화환원전위는 최소 62 mV, 함수율은 최대 48.8%, 염소이온과 황산이온 등은 최대 4,706.1 mg/kg, 420 mg/kg으로 전체적으로 토양 부식성 점수가 최대 19까지 나타나 관 외면 부식에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 조사되었다.

둘째, 간척지에 매설된 금속관종인 닥타일주철관은 조사시점까지는 직관부 상태는 양호한 상태였으나 KP 메케니컬 조인트 부속류인 압륜, 볼트, 너트 등은 대부분 심각한 수준으로 부식에 의한 영향을 받고 있었다. 이러한 이유는 동일한 부식 환경에서 직관부와는 달리 갈바닉 부식외에도 조인트 부속류에 응력, 틈새부식 등이 작용하여 부식이 가속화되었던 것으로 판단된다.

셋째, 간척지에서 관 외면 부식에 영향을 주는 각 항목 별 상관성을 평가한 결과, 토양비저항, 산화환원전위 등은 낮을수록 KP 메케니컬 조인트 부속류 부식에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났으며, 함수율, 염소이온, 황산이온 등은 그 값이 높을수록 KP 메케니컬 조인트 부속류 부식에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 또한 토양부식성 항목 중 토양비저항

이 조인트 부속류 부식과의 결정계수가 0.6439~0.7672로 가장 높게 나타났다.

넷째, 간척지 토양의 경우, 부식성이 매우 강하여 닥타일주철관과 같은 금속관종이나 기타 부속류 등을 설치할 때에는 반드시 부식차단을 위한 예방적 조치(전기방식, 폴리에틸렌 encasement 등)를 해야 관의 수명 연장과 함께 조인트의 부식손상에 의한 누수사고 등을 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물 관리 연구 사업의 ‘비파괴 종합적 성능평가 기술 개발’ 과제로 지원을 받아 연구되었습니다. (127575)

References

- American Water Works Association. (1999). American national standard for polyethylene encasement for ductile-iron pipe systems.
- Bae, C.H., Kim, J.H., Park, S.Y., Kim, J.H., Hong, S.H. and Lee, K.J. (2006). Assessment of soil characteristics on external corrosion of water pipes, J. Korean Soc. Water Wastewater, 20(5), 737-745.
- Booth, G.H. and Tiller, A.K. (1962). Polarization studies of mild steel in cultures of sulphate-reducing bacteria. Part 3.-Halophilic organisms, Trans. Faraday Soc, 58, 2510-2516.
- Buechel, F.F. and Pappas, M.J. (2015). *Principles of human joint replacement: design and clinical application*.
- Chung, W.S., Lee, H.D., Yu, M.J. and Kwak, P.J. (2001). Evaluation of external corrosion on the drinking water pipelines using soil corrosive parameters, J. Korean Soc. Environ. Eng., 23(10), 1611-1620.
- Collins, J.A. (1993). *Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention*. John Wiley & Sons.
- Gupta, S.K. and Gupta, B.K. (1979). The critical soil moisture content in the underground corrosion of mild steel, Corros. Sci., 19(3), 171-178.
- Hamilton, H.L. (1960). Effects of Soil Corrosion on Cast-Iron Pipe, J. Am. Water Works Assoc., 52(5), 638-650.
- Javaherdashti, R. (1999). A review of some characteristics of MIC caused by sulfate-reducing bacteria: past, present and future, Anti-Corros. Method. M., 46, 173-180.
- Javed, M.A., Stoddart, P.R. and Wade, S.A. (2015). Corrosion



- of carbon steel by sulphate reducing bacteria: Initial attachment and the role of ferrous ions, *Corros. Sci.*, 93, 48-57.
- Kim, J., Choi, D., Lee, H., Sung, K., Kim, S., Kim, J. and Kim, Y. Korea Water Resources Corporation. (2002). Effective evaluation of deterioration through the internal and external examination in water mains, 35.
- Li, S.Y., Kim, Y.G., Jeon, K.S., Kho, Y.T. and Kang, T. (2001). Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil, *Corrosion*, 57(9), 815-828.
- Malvin, R. (1958). Underground corrosion: Part I: Corrosion mechanism of metals in soil, *Anti-Corros. Method. M.*, 5(1), 5-9.
- Moore, T.J. and Hallmark, C.T. (1987). Soil properties influencing corrosion of steel in Texas soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51(5), 1250-1256.
- Murray, J.N. and Moran, P.J. (1989). Influence of moisture on corrosion of pipeline steel in soils using in situ impedance spectroscopy, *Corrosion*, 45(1), 34-43.
- Noor, E.A. and Al-Moubaraki, A.H. (2014). Influence of soil moisture content on the corrosion behavior of X60 steel in different soils, *Arab. J. Sci. Eng.*, 39(7), 5421-5435.
- Norin, M. and Vinka, T.G. (2003). Corrosion of carbon steel in filling material in an urban environment, *Mater. Corros.*, 54(9), 641-651.
- Rajani, B. (2000). *Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life*. American Water Works Association.
- Rajani, B. and Makar, J. (2000). A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains, *Can. J. Civ. Eng.*, 27(6), 1259-1272.
- Schwerdtfeger, W. J. (1954). Laboratory measurement of the corrosion of ferrous metals in soils, *Corrosion*, 10(1), 30-36.
- Soltani Asadi, Z. and Melchers, R.E. (2018). Long-term external pitting and corrosion of buried cast iron water pipes, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 53(2), 93-101.
- Yan, M., Sun, C., Xu, J., Dong, J. and Ke, W. (2014). Role of Fe oxides in corrosion of pipeline steel in a red clay soil, *Corros. Sci.*, 80, 309-317.

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383