

1년 동안 서울지역 토양에 매설된 스테인리스강의 부식

현 영 민·김 희 산[†]·김 영 호¹·장 현 정²·박 영 복²·최 영 준²

홍익대학교 재료공학부

¹POSCO Technical Research Lab., ²서울시 상수도연구원

(2012년 3월 27일 접수, 2012년 4월 26일 수정, 2012년 4월 26일 채택)

Corrosion of Stainless Steel Pipes Buried in the Soils of Seoul Metropolitan During One Year

Youngmin Hyun, Heesan Kim[†], Young-Ho Kim¹, Hyunjung Jang²,
Youngbog Park², and Youngjune Choi²

School of Mat. Sci. and Eng. Hongik University 300, Sinanri, Yeongigun, Chochiwoneup, Chungnam, 339-701, Korea

¹POSCO Technical Research Lab., 180-1 Songdo-dong, Incheon, 406-840, Korea

²Waterworks Research Institutes Seoul Metropolitan Government, 552-1 Cheonhodaero Gwangjin-gu, Seoul 143-820, Korea

(Received March 27, 2012; Revised April 26, 2012; Accepted April 26, 2012)

Factors affecting corrosion of stainless steels such as pH, oxidation and redox potential (ORP), soil resistivity, water content of soil, chloride ion concentration, bacteria activity, and corrosion potential have been investigated using soil analysis, bacterial analysis, surfacial analysis, and analysis of corrosion potentials of several stainless steels buried in 8 sites of Seoul metropolitan for one year. Corrosion potential was affected by occurrence of corrosion as well as bacteria activity but the behavior of corrosion potential with time is different depending on occurrence of corrosion and bacteria activity. The main factor affecting corrosion of stainless steels in soil is level of chloride ion concentration which is also a main factor affecting corrosion of stainless steels in chloride containing drinkable water. Furthermore, guideline of stainless steels in drinkable water is concluded to be applicable to that in soil by the results from surfacial analysis.

Keywords : soil, stainless steels, microbial activity, corrosion potential, chloride concentration

1. 서 론

수도물의 오염의 원인중 하나로 수도관의 외부 부식이 문제점으로 제기되면서 정부는 '녹슬지 않는 수도관 사용'을 의무화하고 있다.¹⁾ 스테인리스강은 기존 수도관 소재인 아연도강관 대신 위생성 및 내식성 뿐만 아니라 가공성이 우수하여 2차가공이 매우 용이하다. 이외에 스테인리스강은 외장성도 우수하여 파이프가 노출되는 경우에도 추가적인 표면처리가 필요 없다는 장점이 있다. 앞에서 열거한 장점들로 인하여 향후에는 스테인리스강의 수요가 더 늘어날 것으로 전망된다. 그러나 우수한 내식성에도 불구하고 스테인리스강도 특정한 부식환경 노출될 경우 공식(pitting)이나 틈부식(crevice corrosion)과 같은 국부부식이 발생하여 지하에 매설된 일부 스테인리스강 배관에서 누수가 관찰되고 있으며 이는 2010년 기준으로 전체 누수건수의 약 20%에²⁾

해당한다. 최근에 보고된 결과에 따르면¹⁾ 스테인리스강의 부식은 염소 이온에 가장 민감하지만 통기도 및 함수비(water content)에도 영향을 받는다. 환경적인 인자 이외에 재료의 틈 존재 유무, 용접부 그리고 수직배열에도 영향을 받는다. 관이 수직으로 배열된 경우 산소 농도 차로 인해 갈바닉 셀이 형성되어 부식에 더욱 민감해지기 때문이다. 이외에 부식에 영향을 미치는 인자로는 표 1에 언급된 토양의 pH, 토양 비저항, 황산이온 농도 그리고 미생물 및 외부 누수 전류 등이 있다.³⁾

본 연구에서는 토양의 특성에 따른 스테인리스 시편의 초기 부식 거동 조사를 통하여 스테인리스강의 부식에 미치는 토양의 주요 인자 및 스테인리스강의 사용 가이드 라인을 제시하고자 서울 지역 8곳에 표 2의 성분을 지닌 10 종의 시편을 그림 1에 나타난 배열로 토양에 매설한 후 1년 동안 폭로실험을 실시하였다. 또한 스테인리스강의 부식 발생과 부식 전위의 상관성을 조사하고자 토양 폭로실험이 실시된 8곳의 토양에서 부식 전위를 측정하였다.

[†] Corresponding author: heesankim@hongik.ac.kr

Table 1. Properties affecting soil corrosion of steels and their scores depending on their values⁴⁾

Properties	Range	Score	Properties	Range	Score
Resistivity (Ω-cm)	< 700	10	Redox potential (ORP, mv)	> 100	0
	700 - 1000	8		50 - 100	3.5
	1000 - 1200	5		0 - 50	4
	1200 - 1500	2		< 0	5
	1500 - 2000	1	Water Content (%)	> 20	2
> 2000	0	10 - 20		1	
		< 10		0	
pH	< 2	5	Chloride and sulfate (mg/kg)	< 100	2
	2 - 4	3		> 100	3.5
	4 - 6.5	1	no	0	
	6.5 - 7.5	0			
	7.5 - 8.5	1			
	> 8.5	3			
Summation of scores (Σscore)			Corrosivity of soil		
0 - 2			Very mild		
3 - 5			Mild		
6 - 9			Severe		
> 10			Very severe		

Table 2. Chemical compositions and PREN* of stainless steels (wt%)

No	Family	UNS or Commercial name	Chemical Compositions (wt%)				PREN
			Cr	Ni	Mo	N	
1	Austenite	S30400	18.3	8.1	-	-	18.3
2	Austenite	S31603	17.7	12.1	2.1	0.2	24.6
3	Ferrite	S44500	21.0	-	-	-	21.0
4	Ferrite	S44400	18.6	-	2.0	-	25.2
5	Duplex	POSCO 329LD	20.2	2.5	1.4	0.16	29.6
6	Duplex	S32205	22.4	5.9	3.4	0.17	38.7
7	Duplex	S32507	25.0	6.9	3.8	0.28	45.9

PREN* (pitting resistance equivalent number) = %Cr + 3.3 × %Mo + 30 × %N

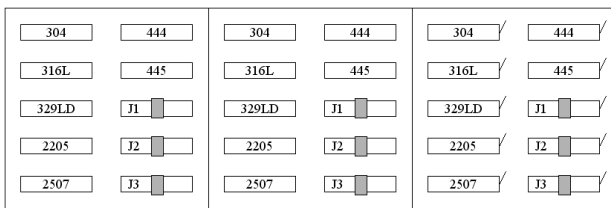


Fig. 1. Layout of stainless steel specimens buried in soil.

2. 실험 방법

2.1 폭로 실험

서울 지역 8곳의 토양에서 폭로 실험을 위하여 지표에서 1.5 m 깊이에 수평으로 그림 1과 같이 시편을 매설하였다. 1년, 2년, 5년의 폭로 기간에 따라 시편의 부식 정도를 조사 하게 위하여 시편 3 set가 매설되었다. 특히 5년후 회수할 시편의 경우 부식 전위를 매 5분간격으로 HIOKI사 data logger (8340-20 MEMORY HILOGGER)에 의해 측정되었다. 이를 위해 시편의 끝부분을 전기적 연결하고 절연처리를 충분히 했으며 시편 근처에 황산/황산구리 기준전극을 매설하였다. 매설에 앞서 10종의 관을 50 cm로 길이로 절

단하고 토양에 폭로된 동안 관 내부로 지층수의 유입을 최소화하고자 양 끝은 고무 마개로 막았다. 10종의 시편 중 7종은 표 2에 표시된 화학 성분을 지닌 상업용 스테인리스강관을 사용하였고 나머지 3종은 각기 다른 관 연결방식으로 조립된 상업용 type 304관을 사용하였다. 현재 폭로 실험이 진행 중에 있어서 본 논문에서는 약 1년간 노출된 시편의 표면 검사 결과와 약 1.5년간 측정된 부식전위 결과만을 나타내었다. 1년간 폭로된 관의 육안 검사를 통하여 부식 여부를 일차적으로 현장에서 판단하였다. 미생물 부식이 예상되는 경우에는 현장에서 fixative (2% paraformaldehyde and 2% glutaraldehyde in 0.05 M sodium cacodylate buffer)를 사용하여 고착을 시킨 후 0 °C 상태로 보관하여 2시간 이내에 실험실로 이송하였다. 반면 부식이 미미하거나 일반 무기물 부식으로 판단되는 경우에는 차후 SEM 분석을 위해 증류수로 세척하여 건조한 후 실험실로 이송하였다. 실험실로 이송된 시편은 무기물 분석과 박테리아 분석용 시편으로 분리하고 무기물 분석용 시편은 적절한 크기로 절단한 다음 증류수로 세척하고 질소 가스를 이용하여 건조시킨 후 분석 전까지 데시케이터에 보관시켰다. 미생물이나 biofilm 분석용 시편은 가능한 빨리 다음과 같은 전처리를 수행하였다. 형광현미경, DIC (Differential Interference Contrast) 현미경, 그리고 광학현미경(Carl Zeiss Axioplan 2)에 의한 분석을 위하여 시편에서 부식생성물을 멸균된 스테인리스 칼로 긁어낸 다음 2% Karnovsky's Fixation으로 고착시킨 이후 DAPI(4',6-diamidino-2-phenylindole)로 염색하여 미생물을 관찰하였다.⁵⁾

2.2 토양 분석

스테인리스강의 부식에 영향을 미치는 토양인자를 조사하고자 시편이 매설된 8곳의 장소에 대하여 미생물의 농도와

토양 입자분포, 토양 비저항, 토양 pH, 산화환원전위 (oxidation-reduction potential: ORP), 황산과 염소 이온, 함수비(water content)를 조사하였다. 환경부에서 발간된 노후 수도관의 평가 및 관리 매뉴얼⁶⁾에 제시된 방법에 따라 분석하였으며 각 항목의 절차는 표 3에 간략하게 요약하여 나타내었다. 미생물은 상용화된 MICKIT 5 (BTI Products, LLC Bayfield, CO)를 이용하여 5 종류의 미생물 군(low nutrient bacteria (LNB), iron related bacteria (IRB), anaerobic bacteria(ANA), acid producing bacteria (APB), sulfate reducing bacteria (SRB))에 대하여 현장에서 분석하였다. 미생물의 좀 더 정확한 분석을 위하여 pyrosequencing에 의해 토양으로부터 추출된 세균 유전자를 동정하는 분석방법이 사용되었다.⁷⁾ 토양 세균군 집구조를 분석하기 위해 우선 토양용 FastDNA SPIN Kit (MP BIO Laboratories, USA)를 이용하여 genomic DNA를 추출한 후 polymerase chain reaction (PCR)을 통해 증폭시켰다. 이후 QIAquick gel extraction kit (Qiagen, Germany)를 통해 정제된 PCR 생성물은 GS Junior Titanium system (Roche, Germany) 염기서열분석기를 이용하여 pyrosequencing을 실시하였다. 이후 GL FLX software (Roche), Hidden Markov Model (HMMER 3.0; <http://hmm.janelia.org/>), 그리고 BLASTN search를 통해 불필요한 서열들을 제거하였다. 이후 Ez Taxon-extended database를 이용하여 BLASTN 탐색 실행으로 찾은 상위 다섯 개의 hits을 대상으로 pair-wise alignment를 실행한 뒤 얻은 similarity를 기준으로 분류학적 동정을 수행하였다. 3% 서열 불일치도를 기준으로 CD-HIT program을 이용하여 시료 내에 존재하는 종의 수, operational taxonomic unit (OTU)를 구하였다. 그러나 5th site의 토양으로부터는 염기서열 분석에 실패하여 나머지 7곳의 토양에 대

Table 3. List of properties measured for soil analysis and description on measurements⁶⁾

Properties	Description on analysis
Particle size distribution	Measuring particle size of soil according to KS F 2302 and KS F 2309 Defining particle size as an minimum sieve size which 60% of soil can pass through
Resistivity of soil, Ω - cm	Measurements by four point probe method
pH of soil	Measuring pH of distilled water where inorganic species dissolved from soil
Redox potential, mV	Measuring redox potential of distilled water where inorganic species dissolved from soil
[SO ₄ ²⁻], ppm	Measuring [SO ₄ ²⁻] by Turbidimetric method ppm: mg of sulfate per kg of dry soil
[Cl ⁻], ppm	Measuring [Cl ⁻] by AgNO ₃ titrimetric method ppm: mg of chloride per kg of dry soil
Water content, %	Measuring water weight per dry soil weight according to KS F 2306

하여 pyro-sequencing 분석 결과만 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양 부식성

스테인리스강의 부식에 미치는 토양의 인자를 알아보고 자 스테인리스 관이 매설된 서울시 8장소의 토양의 입자 크기 분포와 미국주철관 협회에서 제시한 인자인 비저항, pH, ORP, 함수비 그리고 염소 및 황산이온농도를 표 4에 나타내었다. 4th site의 토양은 미세한 silt 토질인 반면 나머지 장소의 토양은 모두 sand의 토질을 지녔으나 입자크기는 장소에 따라 약 0.1~2 mm이다. 토양의 비저항은 1st site에서 가장 높고 8th site에서 가장 낮았으며 나머지 장소에서 8~20 kΩ-cm이다. 또한 토양의 함수비, ORP, pH는 각각 10~20%, 165~230 mV, 6.3~8.3이었다. 황산이온 농도는 13~336 ppm의 범위에서 장소에 의존한 반면 염소이온 농도는 4~729 ppm의 범위에 있었지만 7th site와 8th site를 제외하고는 낮았다. (3~14 ppm) 미국 주철협회에서 제안된 부식도 평가(표 1) 기준에 따라 얻어진 부식도 점수는 표 4의 마지막 열에 표시된 바와 같이 3~4.5로 서울시 8곳의 토양 환경에 의존되지 않음을 알 수 있었다. 그러나 이 평가 기준은 주철관이 노출된 환경의 부식도에 관한 것으로 스테인리스강의 노출환경 부식도와는 평가 기준은 다르다. 예를 들면 약산성이나 중성이 스테인리스강의 부식에 미치는 영향은 미미하며 황산이온이 가진 억제재 역할 때문에 스테인리스강의 부식은 오히려 억제된다. 반면 염소 이온 농도는 스테인리스강의 부식에 미치는 영향이 가장 큰 인자 중 하나이지만 토양의 염소 농도(표 4)와 표 7에 제시된 수질 환경에서 스테인리스강의 사용기준을 따르면 8th site에서만 type 304의 부식이 발생할 것으로 예상된다.

금속은 무기물뿐만 아니라 미생물에 의해서도 부식되기 때문에 표 5와 Fig. 2는 스테인리스강의 부식에 영향을 미치는 것으로 알려진 미생물(8)의 활동도를 2가지 방법으로 측

정하였다. 전자는 상용화된 현장분석용 kit (MICKIT 5)를 사용하여 얻어진 결과로 철 산화박테리아(iron oxidizing bacteria: IOB)에 해당하는 IRB나 APB의 농도가 장소에 무관하게 일정하였다. 반면 SRB의 활동도는 5th site에서 가장 높았고(>100 K), 4th site와 7th site에서 가장 낮은(1~10 K) 반면 이외의 장소에서 10~100 K이었다. 현장 분석용 kit를 사용하여 얻어진 미생물 농도는 대체적으로 채취된 장소에 거의 무관하였다. 그러나 그림 2에 나타난 것처럼 DNA pyrosequencing을 통한 종 개수(OTU)는 표 5와 달리 OTU가 박테리아 group (SRB, IOB, manganese oxidizing bacteria (MOB)) 뿐만 아니라 장소에도 민감하였다. 특히 토양에 따른 SRB 및 IOB의 OTU는 그림 3 (a)와 그림 3 (b)에 나타난 것처럼 8th Site에서 가장 높고 1st site에서 가장 낮았으며 나머지 5개 장소에서 SRB 및 IOB별로 OTU의 순서도 유사했다. 반면 MOB는 위의 결과와 달리

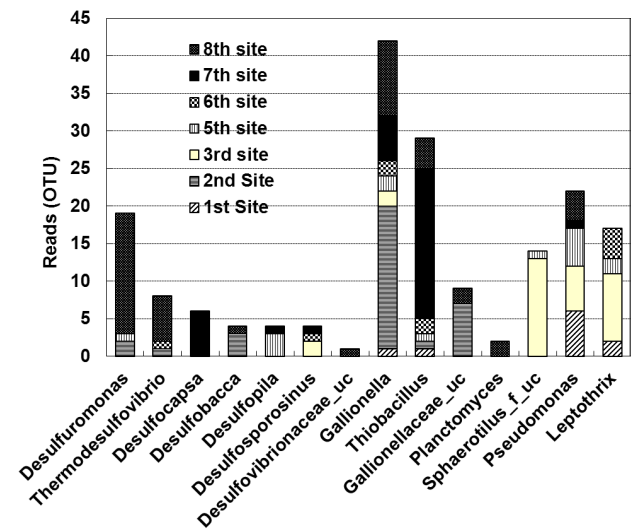
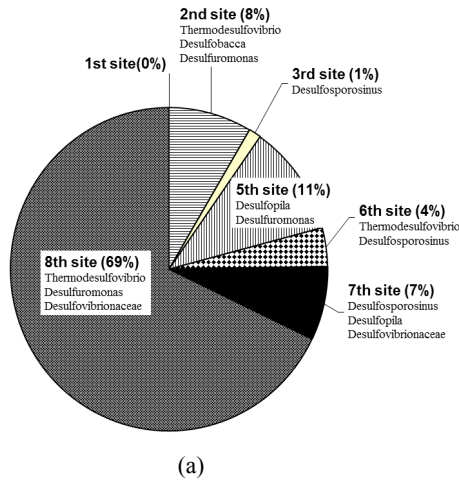


Fig. 2. Operational taxonomic units (OTUs) of bacteria analyzed at 7 sites except 5th site.

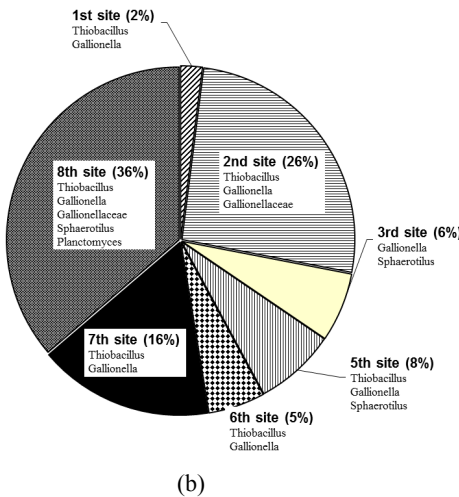
Table 4. Summaries on properties of soil measured at 8 sites

Site No	Type of soil /size(mm)	ρ (kΩ-cm)	pH	ORP (mV)	Water cont. (%)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	Corros. of soil/score
1	Sand/0.5	56.54	6.27	165	10.5	13.52	3.56	Mild/4
2	Sand/2	19.79	7.18	218	15.4	10.16	4.27	Mild/3
3	Sand/2	16.96	8.34	188	16.7	32.54	5.02	Mild/4
4	Silt/10 ⁻²	19.32	7.53	198	21	73.54	9.64	Mild/4
5	Sand/2	15.08	8.21	191	10.9	47.08	5.93	Mild/4
6	Sand/0.4	8.48	7.68	213	18.3	197.02	14.20	Mild/4.5
7	Sand/1	10.37	7.48	227	16.1	107.2	53.82	Mild/4.5
8	Silt-Sand/0.1	2.64	7.50	208	19.8	335.9	728.5	Mild/4.5

SRB



IOB



MOB

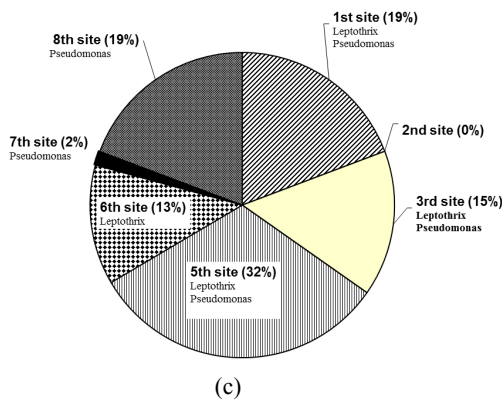


Fig. 3. Relative OTUs of sulfate reducing bacteria (SRB) (a), iron oxidizing bacteria (IOB) (b), and manganese oxidizing bacteria (MOB) (c) in soil of 7 sites except 5th site by using pyro-sequencing method.

8th site 뿐만 아니라 1st site에서도 높은 OTU를 보인 반면 비교적 SRB와 IOB의 높은 OTU를 보인 7th site에서 낮은 MOB의 OTU를 보였다. 현장 kit 분석 결과에 비해 실험실 동정분석 결과가 박테리아 group 및 장소에 의존적임을 보였다. 이는 실험실 동정분석 결과 더 정확하다는 앞선 결과⁹⁾와도 일치하여 다음에서 언급될 부식 전위 및 강의 부식 속도에 미치는 박테리아의 영향을 설명에 동정 분석 결과를 사용하였다.

3.2 부식 전위

일반적으로 부식전위는 산화 및 환원 반응의 전위뿐만 아니라 속도에도 의존되기 때문에 부식 전위의 변화가 부식 발생의 직접적인 증거가 될 수 없지만 동일한 환경에서 부식 전위의 변화가 금속의 부식 속도의 변화에 의한 것이라는 가정 하에 스테인리스강의 부식 전위가 증가하여 안정한 상태를 유지하는 경우 산화막이 형성으로 인해 스테인리스강은 안정한 부동태 상태에 있다 (Type I). 반면 부식이 발생된 경우에도 부식 전위는 감소하지만 혐기성 박테리아의 활동도, 수분 함량의 변화, 그리고 산소의 접근성에 의한 변화로 인해 ORP 전위가 감소한 경우에도 부식전위가 감소되는 경우로 (Type II) 이 경우 부식 전위가 낮아진 원인들이 제거되면 부식전위는 다시 부동태 상태에서 부식 전위로 회복된다. 마지막 경우는 부식 전위가 Type II와 유사하게 낮은 값을 지니지만 위에서 언급된 부식전위의 저하 원인이 제거되더라도 부동태 상태에서 부식 전위로 회복되지 못한다. (Type III) 국부 부식이 부식 전위의 회복을 억제하는 원인이다. 위에서 언급된 3가지 경우를 근거로 8개 장소에서 관찰된 부식 전위를 조사해 보면 그림 4에 표시된 바와 같이 Type I은 1st site~4th site의 4 곳에 매설된 10종의 스테인리스강이고 Type II는 5th site와 6th site에 매설된 10종의 스테인리스강과 7th site와 8th site에 매설된 type 304와 type 316L를 제외한 5종의 강이다. 반면 Type III는 7th site와 8th site에 매설된 type 304, type 316L 및 type 304의 연결 관이다. 부식 전위의 변화 거동과 pyrosequencing법에 의해 측정된 전체 OUT(그림 2)이나 그림 3 (c)에 나타난 MOB의 OTU와 관련성을 찾을 수 없었다. 그러나 그림 3 (a)와 그림 3 (b)는 2nd site를 제외하고 전위의 변화가 관찰되는 매설장소에서 SRB와 IOB의 OTU가 상대적으로 높음을 보였다. 즉, 고온 및 잦은 강우 대기 환경으로 인해 토양 미생물의 활동도가 증가되어 부식 전위가 감소하지만 저온 및 건조한 대기 환경에서는 미생물의 활동도가 저하되어 부식 전위가 증가된 것으로 판단된다. 그러나 미생물의 활동도가 증가되는 고온 대기 환경 시기에 부식 전위의 감소는 IOB와 SRB중에서 혐기성 박테리아인 SRB가 부식 전위에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 또한 Type III가 염소 농도가 높은 7th site와 8th site(표 4)에 노출된

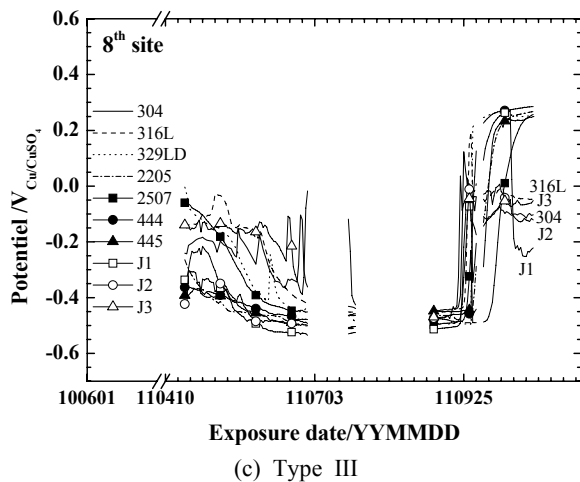
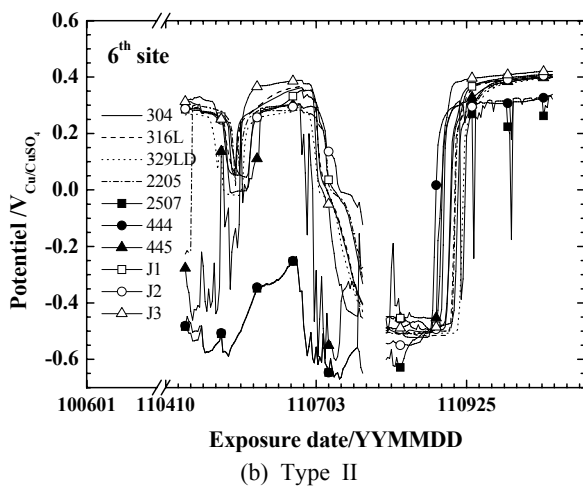
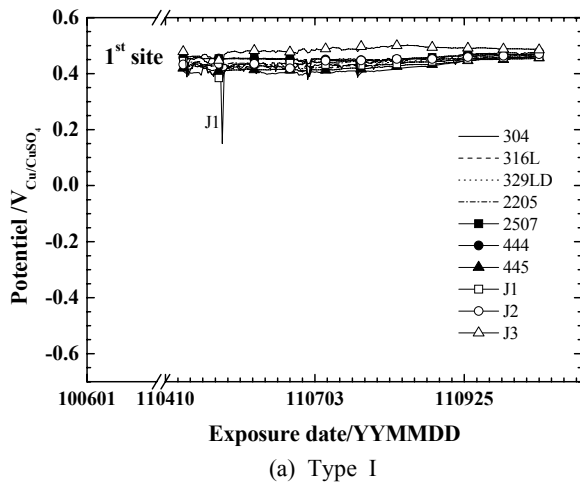


Fig. 4. Corrosion potential-vs.-time curves of stainless steels exposed to 8 site soils, which were classified into Type I (a), Type II (b), and Type III (c).

낮은 내공식지수(pitting resistance equivalent number: PREN)을 지닌 type 304, type 316L 및 type 304의 연결관에서 관찰되었다는 사실은 부식 전위의 변화가 미생물의 활동도 이외에 염소 부식에 의해 영향을 받음을 보여주고 있다.

3.3 폭로시편 분석

1년간 폭로후 시편의 부식 정도를 1차 육안검사와 2차 현미경 관찰을 이용하여 평가하였다. 표 6은 이들의 결과를 요약한 내용으로 부식전위의 변화가 관찰되지 않은 매설장소(1st site~4th site)에서 채취된 시편에서는 부식 위치(관 표면, 고무마개와 접촉 부위, 연결부)에 무관하게 부식이 관찰되지 않았지만 부식 전위의 변화가 관찰된 폭로 토양에서는 그 정도에 따라 차이가 있지만 부식이 관찰되었다. 즉, 저온 건조 시기에 부동태 상태에서 관찰되는 부식전위로 회복된 경우 스테인리스강의 부식 특이인 공식이나 틈부식의 발생 없이 미미한 표면 변색만 관찰되었다. 즉, 그림 5에 나타난 바와 같이 얼룩 수준의 녹("a little" in Table 6)으로 화학적 방법으로 제거된 이후 어떤 형태의 공식이나 재료의 부식 흔적을 주사전자현미경으로 관찰할 수 없을 정도로 부식 정도가 매우 미미하였다. 그러나 이처럼 부식이 거의 진행되지 않았음에도 일부 Type II에 속하는 장소(6th site)에 노출된 시편에서 그림 6의 (a)에 나타난 것과 같이 끈적하면서 미끈미끈한 막이 관찰되었다. 이 film은 그림 6의 (b)에 나타난 바와 같이 탄소와 산소로 구성된 것으로 보아 bi-film으로 예상된다. 또한 Type III에 속하는 장소(8th site)에 노출된 시편에 형성된 녹 주위에서 미생물이 존재를 형광현미경을 통하여 관찰할 수 있었으나 이들 미생물의 동정을 확인하지는 못했다. 위의 사실로부터 적어도 전위 변화의 주요 원인 중 하나가 미생물의 활동도에 의한 것이라는 것과 Type II에 해당하는 시편에서 부식의 미 발생으로부터 미생물의 활동도 증가가 반드시 부식의 발생을 의미하지 않는다는 사실을 알 수 있었다.

반면 Type III의 거동을 보이는 시편 중 8th site에서 노출된 type 304강의 연결관 시편에서만 틈부식이 관찰되었다. 이는 앞서 언급한 3가지 형태의 부식 전위 양상과 일치하지 않는 것으로 보인다. 그러나 다음의 두 가지 인자를 고려시 type 304 및 type 316L의 틈 부위에서 부식이 발생되었을 것으로 판단된다: 첫째는 부식이 발생하지 않은 경우 부식 전위는 미생물 활동도나 화학적 환경 변화에 의해 변화될 수 있는데 본 결과의 경우 동일 장소에 매설된 강 중 내공식 저항성이 낮은 type 304과 type 316L의 부식전위만 $-0.1 \sim 0.0$ V에 위치하였다. 둘째는 그림 1에 나타난 바와 같이 부식 여부를 조사한 시편과 부식전위를 측정된 시편이 동일하지 않기 때문에 부식 분석용 시편에서는 관찰되지 않았지만 부식 전위 측정용 시편에서는 관찰될 수 있다. 다시 말하

Table 5. Results of Bacteria analysis by MICKIT 5

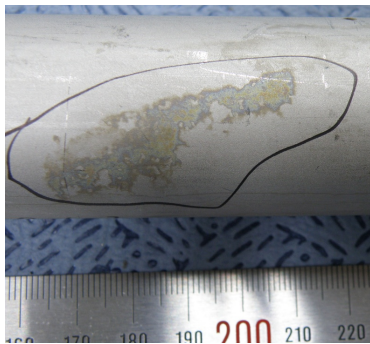
Site No	Concentrations (number of bacteria per one dip*)				
	LNB	IRB	ANA	APB	SRB
1	> 100K	NA	> 10M	> 10M	10K ~ 100K
2	> 1M	> 100K	> 10M	1M ~ 10M	10K ~ 100K
3	> 1M	> 100K	> 10M	> 10M	10K ~ 100K
4	> 1M	> 100K	> 10M	1M ~ 10M	100K ~ 1M
5	10K ~ 100K	> 100K	> 10M	> 10M	1K ~ 10K
6	10K ~ 100K	> 100K	> 10M	> 10M	10K ~ 100K
7	1M	> 100K	> 10M	> 10M	1K ~ 10K
8	> 1M	> 100K	> 10M	> 10M	10K ~ 100K

One dip \approx 0.4g

Table 6. Summaries of type of shape of corrosion depending on location of corrosion and type of corrosion in Fig. 4

Trends in Corrosion potential with time	Surface of pipe	Surface contacting Rubber stopper	Joint
Type I	No	No	No
Type II	A little*	A little*	No
Type III	A little*	A little*	Crevice+

A little* means that rust was rarely observed but was so very thin that the change of surface morphology could not be defect using SEM with 5K magnification after removing the rust in nitric acid sol'n. Crevice+ was observed at joint parts of type 304 buried in 8th site.



(a)

Element	Concentrations	
	wt %	at %
O K	8.67	24.22
Al K	0.80	1.32
Si K	1.08	1.72
P K	0.56	0.81
Cr K	17.69	15.21
Fe K	64.32	51.48
Ni K	6.88	5.24

(b)

Fig. 5. Typical photograph of “a little” (Table 6) rust of type 304 exposed to 6th site (a) and chemical compositions of the rust by EDS (b).

면 높은 염소 이온 농도로 인해 관의 양 끝에 고무마개와 접촉되는 면에서 틈부식의 발생이 매우 민감하다는 것이다. 이처럼 틈부식의 민감성은 동일 site에서 type 304 관의 연결부에서 틈부식의 발생과 잘 일치한다. 끝으로 부식 전위가 측정된 시편의 부식 여부는 차후에 분석을 실시한 이후 발표할 예정이다.

토양 분석, 부식 전위 분석 및 부식 여부조사를 통하여 서울시 토양 환경에서 스테인리스강의 부식 전위는 미생물의 활동도 뿐만 아니라 부식의 발생 여부에 영향을 받으나 부식은 미생물 활동도 보다는 표 4에 표시된 염소 이온의 농도와 기하학적 틈의 존재에 민감하였다. 즉, [Cl⁻]가 55 mg/1 kg-dry soil 이하인 7곳의 토양에서 어떤 스테인리

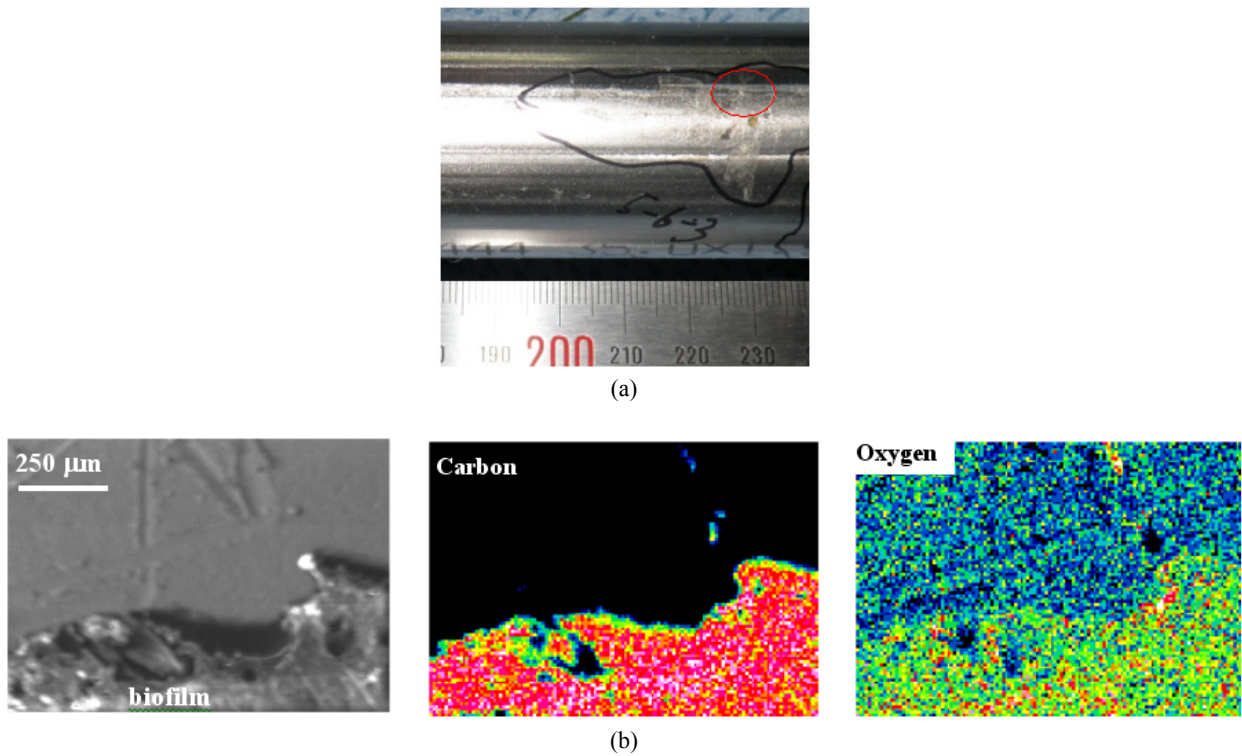


Fig. 6. Typical photographs of a biofilm formed on type 444 exposed to 6th site (a) and EDS mappings of the film (b).

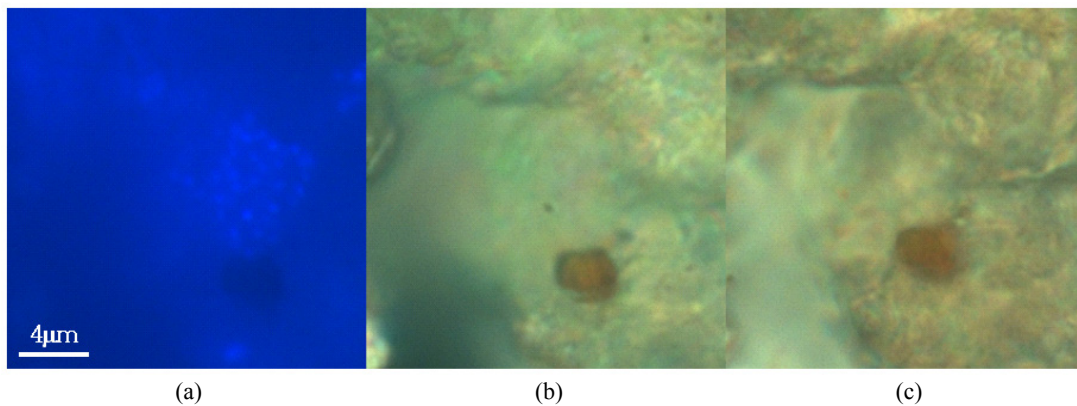


Fig. 7. Typical photographs of rust formed on type 304 exposed to 8th site by using fluorescence microscopy (a), DIC microscopy (b), and optical microscopy (c).

스강도 부식이 관찰되지 않은 반면 $[Cl^-]$ 이 약 729 mg/1 kg-dry soil인 8th site 토양에서는 type 304의 연결 부위에서 틈부식이 관찰되었다. 결론적으로 서울시 토양에서 관찰된 스테인리스강의 부식의 주 원인은 염소에 의한 틈부식임을 알 수 있었다. 토양에서 염소 농도의 단위(weight of Cl^- per 1 kg-dry soil)는 수질에서 염소이온의 농도 단위(weight of Cl^- per 1kg-water)와 다르기 때문에 표 7에 요약된 물 환경에 따른 스테인리스강의 사용기준을 단순히 토양환경에 적용시킬 수 없으나 함수비를 고려하여 토양에

서 염소 농도를 수질에서의 염소 농도로 환산할 경우 토양에서 스테인리스강의 사용기준은 표 7에 나타난 음용수에서 스테인리스강의 사용 기준과 잘 일치하였다. 위의 사실로부터 함수율을 고려하여 계산된 토양의 염소이온의 농도 값과 표 7의 비교를 통하여 토양에서 스테인리스강의 상용기준을 지시 할 수 있었다.

Table 7. Summary of the suitability of stainless steels in various waters at temperatures normally encountered in drinking water supply and treatment⁽¹⁰⁾

Type of water	Chloride (ppm)	Comment	Stainless steel grades
Pure water	-	< 5	304
Supply water	> 350	Type 304 suitable up to 200ppm	304, 316
Fresh water or ground water	< 1,000	Type 304 suitable up to 200ppm only Type 316 suitable up to 1,000ppm only	304, 316, 2205, Super austenitic stainless steels (ASS), Super duplex stainless steels (DSS)
Brackish water	10,000-15,000	Estuary or tidal waters type 2205 suitable up to 3,600ppm only	2205, Super ASS, Super DSS
Sea water	15,000-26,000 (2.5-4% NaCl)	> 3,000	Super DSS, Super ASS

4. 결 론

스테인리스강의 내식성에 미치는 토양인자를 조사하고 서울시 토양에서 스테인리스강의 사용 기준을 제시할 목적으로 수행된 연구 중 1년간 매설된 스테인리스강관, 매설 토양 및 부식 전위의 분석으로부터 얻어진 결과는 다음과 같다:

1) 토양 미생물 분석을 위해 현장용 kit 분석보다 pyro-sequencing 분석이 더 적절하였다. 이는 토양 별로 미생물 종류 및 농도의 의존성 정도뿐만 아니라 낮은 부식전위가 얻어진 토양에서 높은 SRB의 OTU의 분석결과에 근거한다.

2) 스테인리스강의 부식전위는 SRB의 활동도 증가와 부식의 발생에 의해 낮아진다. 전자의 경우 대기 온도가 낮아지는 시기에 미생물의 활동도가 감소되어 부식 전위가 부동태 상태의 부식전위로 회복되지만 후자의 경우 대기 온도가 낮아지더라도 부식 전위가 완전히 회복되지 않는 특징을 보였다.

3) 서울시 8곳의 토양에 1년간 폭로실험을 통하여 [Cl⁻]가 55 mg/1 kg-dry soil 이하인 토양에서 스테인리스강의 부식이 발생하지 않은 반면 [Cl⁻]가 729 mg/1 kg-dry soil인 8th site 토양에서 type 304의 연결 부위에서 틈부식의 발생으로부터 토양에서 스테인리스강의 부식은 미생물 활동도 또는 다른 어떤 인자보다 [Cl⁻]에 의존함을 알았다.

4) 서울시 토양에서 1년간 폭로실험으로부터 토양환경에서 스테인리스강의 사용 기준은 토양의 함수율을 고려시 염소이온이 함유된 수질에서 스테인리스강의 사용기준과 동일함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 포스코의 지원 하에 이루어졌으며 이에 감사

드립니다.

참 고 문 헌

1. M. S. Cho, C. J. Park, and Y. H. Kim, *The CSSK 40th Anniversary Inter. Symp. On Corrosion Protection*, p. 10, CSSK, Jeju, Korea (2011).
2. Y. B. Park, *2011 Annual Seminar for Convergence Technology on Waterworks*, p. 149, Waterworks Research Institute Seoul Metropolitan Government, Seoul, Korea (2011).
3. H. Kim and Y. Hyun, *Mechanisms on corrosion of stainless steels buried in soil of Seoul metropolitan*, p. 1, POSCO, Pohang, Korea (2011).
4. Korea Water and Wastewater works Association (KWWA), *Standards for Waterworks*, p. 248, Ministry of Environment, Gwacheon, Korea (2010).
5. H. Kim and Y. Hyun, *Mechanisms on corrosion of stainless steels buried in soil of Seoul metropolitan*, p. 32, Pohang, Korea (2011).
6. J.-H. Yoon, J.-W Kim, D.-Y. Choe, N.-Y. Lee, and K.-S. Sung, *Guideline Manual on evaluation and maintenance of aged water pipe*, p. 152, Ministry of Environment, Gwacheon, Korea (2002).
7. H. Kim and Y. Hyun, *Mechanisms on corrosion of stainless steels buried in soil of Seoul metropolitan*, p. 33, Pohang, Korea (2011).
8. B. J. Little and J. S. Lee, *Microbiologically Influenced Corrosion*, p. 23, John Wiley & Sons, Hoboken (2007).
9. B. J. Little, P. A. Patrica, A. Wagner, and F. Mansfeld, *Microbiologically Influenced Corrosion*, p. 43, NACE International, Houston (1997).
10. Duncan Munro et al., *Operational Guidelines and Code of Practice (OGCP) for Stainless Steel Products in Drinking Water Supply, in OGCP for Stainless Steel Products - DWI Application 56.4.477*, p. 12 and p. 17, The Steel Construction Institute (SCI), Ascot, UK (2002).