

염수계 철산화균 및 황환원균에 의한 금속 부식 및 최적 제어 방안

성은혜 · 한지선 · 김창균[†]

인하대학교 환경공학과

(2008년 3월 31일 접수, 2008년 7월 9일 채택)

Metal Corrosion Mechanism by Sulfate-reducing and Iron-oxidizing Bacteria in Saline System and its Optimal Inactivation

Eun-Hae Sung · Ji-Sun Han · Chang-Gyun Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Inha University

ABSTRACT : Due to economic impairment derived from metal corrosion of pumping station installed around coastal area, it was needed for related cause-effect to be investigated for understanding practical corrosion behavior and providing proper control. This research was thus carried out to determine whether the microbe can influence on metal corrosion along with its control in the laboratory. For this study, groundwater was sampled from the underground pump station(i.e. I Gas Station) where corrosion was observed. Microbial diversity on the samples were then obtained by 16S rDNA methods. From this, microbial populations showing corrosion behaviors against metals were reported as *Leptothrix* sp.(Iron oxidizing) and *Desulfovibrio* sp.(Sulfur reducing) Iron oxidizing bacteria were dominantly participating in the corrosion of iron, while sulfate reducing bacteria were more preferably producing precipitate of iron. In case of galvanized steel and stainless steel, iron oxidizing bacteria not only enhanced the corrosion, but also generated its scale of precipitate. Sulfate reducing bacteria had zinc steel corroded greater extent than that of iron oxidizing bacteria. In the inactivation test, chlorine or UV exposure could efficiently control bacterial growth. However as the inactivation intensity being increased beyond a threshold level, corrosion rate was unlikely escalated due to augmented chemical effect. It is decided that microbial corrosion could be differently taken place depending upon type of microbes or materials, although they were highly correlated. It could be efficiently retarded by given disinfection practices.

Key Words : Iron Corrosion, Iron-oxidizing Bacteria, Sulfate-reducing Bacteria

요약 : 연안지역 주위에 설치된 각종 관망시설의 금속부식으로 인한 경제적 손실 때문에 실제적인 부식 거동을 이해하고 그것을 적절하게 조절하기 위한 부식과 관련된 원인-결과에 대한 정보를 필요로 하고 있다. 본 연구에서는 미생물 제어에 따라 금속 부식에 영향을 미치는지를 조사하기 위하여 실험실 규모로 연구를 수행하였다. 먼저 관망의 막힘 현상이 발생하는 곳(즉, I Gas Station)의 지하수를 채취한 후 16S rDNA방법으로 시료 속의 미생물 다양성을 조사하였다. 이로부터 금속을 부식시키는 거동이 관측된 미생물이 *Leptothrix* sp.(철산화)와 *Desulfovibrio* sp.(황환원)임을 알 수 있었다. 실험 결과, 철 시편의 경우 철산화 미생물에 의해 부식속도가 가장 크게 증가하였고, 반면 황환원 미생물에 의해 철침전물이 빠르게 형성되었다. 합석 시편과 스테인리스 스틸의 경우 주로 철산화 미생물이 부식뿐만 아니라 침전물 형성 속도를 증가시키는 데에도 매우 관련이 높았다. 아연 시편의 경우, 황환원 미생물이 철산화 미생물보다 더 부식에 대한 영향이 컸다. 또한 미생물 성장 제어실험에서는 염소주입이나 UV 처리는 효과적으로 미생물의 성장을 조절할 수 있었다. 그러나 미생물 제어 강도가 경제치보다 증가한다면 화학적 반응을 증가시키기 때문에 부식속도는 점차 증가하는 현상이 나타났다. 본 연구에서는 미생물 금속 부식은 미생물 종류나 금속재료에 따라 다르게 발생하며, 관련 미생물(*Leptothrix* sp.와 *Desulfovibrio* sp.)과 금속 부식 또는 침전물 생성에 높은 연관성을 가지고 있었다. 그리고 효과적인 미생물의 제어를 통해 부식 또는 침전 속도를 낮출 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 철부식, 철산화박테리아, 황환원박테리아

1. 서론

연안지역에 위치한 시설물의 부식 및 안전 확보를 위하여 염수 침투 방지 및 배제를 목적으로 설치된 펌프 및 배관은 자주 막히는 현상이 발생하며, 이는 주로 철 산화물에 의한 것으로 알려져 있다. 수중의 철분은 철박테리아

등 관련 미생물의 성장을 촉진시키며, 음료수로서 금속성의 쓴맛을 유발하고 물을 황적색으로 변색시키거나 파이프에 퇴적되어 막힘 현상을 일으킨다.¹⁾ 이와 같은 철산화로 인하여 큰 문제가 되고 있는 곳은 지하수를 이용하기 위한 관정 및 그에 연결된 펌프장이며, 신규 건축물 및 공장 등에 설치된 펌프도 스테인레스강이나 동관을 사용하지만 이곳에서도 무기성 물질의 침전으로 스케일이 발생하거나 녹이 발생하기도 한다.²⁾ 국내에서는 이 현상을 주로 물리화학적 반응으로 이해하였으나 최근의 연구들에서

[†] Corresponding author

E-mail: cgk@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7561

Fax: 032-865-1425

미생물의 활동에 의해서도 발생하는 것으로 밝혀졌다.³⁾ 즉 철박테리아는 대부분 2가철을 3가철로 산화시켜 성장을 위한 에너지를 얻고, 3가철을 철산화물 형태로 침전시켜 관정이나 펌프를 막히게 한다. 또한 용해되어 있는 철을 젤리 같은 니수(slime)로 변화시켜 관정 내에 심각한 폐쇄(clogging)를 불러일으킨다. 또한, 황박테리아는 산소가 없는 환경에서 부식을 일으키며 부식에 대한 생물학적 지표로써 여겨지고 있다.²⁾

본 연구에서는 해안 대수층 내 펌프 및 관망의 침전물 또는 부식에 관련된 미생물 및 그 성장 조건을 조사 연구하여 침전에 의한 막힘 현상의 메카니즘을 밝히고, 산화제와 UV 조사 등을 통하여 관련 미생물의 효율적 제어 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 관망의 막힘 현상이 주로 발생하는 연안지역의 지하수를 채취하여 16S rDNA 분석방법에 의하여 관련 지역의 미생물 우점종 및 그 다양성을 조사하여 연구 대상 미생물을 선정하였다. 선정 미생물을 대상으로 4종류의 금속시편에 대한 부식 생성과 침전물 형성에 미치는 영향을 결정하였고, 그 성장을 최소화하는 살균조건을 도출하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 부식 발생 지역 지하수 시료 채취

인천 연안지역의 I 천연가스 저장기지에 설치된 8개의 부식발생 피해지역의 펌프정으로부터 지하수 시료를 채취하였다. 즉 2007년 2월에 총 8곳(Butane stripper inlet, Propane stripper inlet, Stripper outlet, B-5, B-12, B-15, B-16, Construction shaft)의 관정으로부터 지하수 시료를 채취하여 각 시료에 대한 수질 분석과 16S rDNA sequence 분석을 실시하였다.

지하수 시료 취수 전 관정에 기담지된 지하수를 1 L 용량의 베일러(Cole-Parmer, USA)를 이용해 screen interval 용량 2~3배까지 purge시킨 후 각 관정에서 1 L의 시료를 채취하여 무균 채수병에 담아 4℃에서 보관 운반하였다.

2.2. 지하수 수질 및 미생물 군집 분석 방법

지하수 시료의 DO는 DO meter(YSI 550A Portable DO Meter, USA)를 사용하여 측정하였으며, ORP는 ORP meter (Orion 230A Portable ORP Meter, USA), 전도도는 전기전도계(YSI Conductivity Meter, Model 30, USA)를 사용하여 모두 현장에서 측정하였다. 중금속 농도분석을 위해 0.45 μm membrane filter(Whatman, Cat No. 6786 2502)로 여과한 다음, 유도결합플라즈마 방출분석기로 분석하였고, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₂⁻와 NO₃⁻ 농도는 이온 크로마토그래피(IC, Yong Lin Instrument, Water 432 Conductivity Detector, Korea)로 측정하였다. 용존철과 용존아연의 농도를 측정하기 위해서 채취한 시료를 0.45 μm membrane filter (Whatman, Cat No. 6786 2502)로 여과한 후, HCl을 첨가(각 시료의 최종농도를 0.24 M HCl로 조절)하여 유도결합플라즈마 방출분광분석

기(ICP-OES, Varian, Liberty Series 2, USA)로 측정하였다.

한편 미생물 군집 분석을 위하여 시료 채수 후 24시간 이내에 시료 중 100~200 mL를 3,000 rpm에서 15분간 원심분리(Hanil Science HA-1000-3, 원심분리기)하였다. 그 후 약 1 g의 원심분리 침전물을 획득하여 미생물 군집분석을 위한 시료로 사용하였다. 즉, FastPrep[®] Instrument (Q-Bio gene)를 이용해 Speed 4에서 5초간 bead beating하여 침전물로부터 cell을 분리하였다. 그 후 FastDNA[®] SPIN Kit(Bio101 system, Q-Bio gene)를 사용하여 cell로부터 총 genomic DNA를 추출하였다.⁴⁾ 추출된 genomic DNA는 eubacteria의 군집분석에 사용되는 16S universal primer(27F-5' AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG 3', 1492R-5' TAC GGY TAC CTT GTT ACG ACT T 3')를 사용하여 PCR Machine(Techgene)으로 증폭하였다.⁴⁾ PCR 수행 후 Ethidium bromide를 포함하는 0.8% agarose를 0.5 × TAE 완충용액 (Tris-acetate EDTA buffer)에서 전기영동(Mupid-α, Japan)한 후 UV transilluminator(VILBER LOURMAT, Serial No. M03 5437)로 PCR 증폭물을 확인하였다. PCR증폭 산물은 Wizard[®] SV Gel 및 PCR Clean-Up System(Promega, USA)으로 정제하였다. 정제된 16S rDNA PCR 산물을 RC013 T&A cloning vector(Real Biotech Corporation, taiwan)에 접합(ligation)시키고 숙주세포(host cell : E.coli XL1-Blue)로 형질전환(Transformation)하였다. 그 후 X-Gal과 IPTG로 처리된 LB(Luria-Bertani) 배지에 형질전환된 세포를 배양한 후 균주의 접합이 확인된 콜로니는 Wizard[®] Plus Minipreps DNA Purification System(Promega, USA)을 이용해 플라스미드를 회수하여 16S rDNA 염기서열을 분석하였다. 미생물 염기서열은 NCBI(National Center for Biotechnology Information : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) Gene Bank에 등록된 데이터베이스와 Blast search를 통하여 염기서열의 일치 여부를 비교하였으며 98% 이상 일치하는 균주를 선정하여 지점별 미생물종으로 분류하였다.

2.3. 철산화 실험을 위한 금속재료

본 실험에 이용된 부식 대상 금속 재료는 현장에 설치된 펌프 재질과 동일한 스테인레스 스틸(STS304)을 선정하였고, 그 외 철 함석 및 아연도강 등을 비교 대상 재료로 이용하였으며 각 금속 시료의 두께와 XRF의 분석 결과에 의한 각 부식생성물의 금속 구성 성분은 Table 1과 같다. 각 시편들을 동일하게 세로 8 cm, 가로 2 cm 길이로 절단한 후, 초음파 세척기(BRANSONIC 5510R-DTH, Mexico)를 이용하여 60분 동안 세척 후 부식 실험에 이용하였다.

2.4. 배지 및 미생물 성장 조건

모든 실험은 nutrient-rich medium에서 수행되었으며 그 조성은 4.12 g MgSO₄ · 7H₂O, 5 g sodium citrate, 1.26 g CaSO₄ · 2H₂O, 1.0 g NH₄Cl, 1.0 g K₂HPO₄, 3.5 g sodium lactate 그리고 1.0 g yeast extract이며 이것을 멸균수 1 L

Table 1. Characteristics of metal materials used in the test

Material	Stainless Steel (STS304)		Iron		Galvanized Steel		Zinc Steel	
Thickness (mm)	0.35		0.95		0.45		1.15	
Composition (%)	Fe	70.80	Fe	97.50	Zn	92.80	Fe	43.60
	Cr	18.70	O	2.00	Fe	6.94	Zn	32.50
	Ni	8.50	Mn	0.15	Cl	0.12	O	18.20
	Mn	1.20	Zn	0.13	S	0.06	P	4.85
	Si	0.29	Si	0.07	Si	0.05	S	0.18
	Cu	0.15	Cr	0.05	Mn	0.02	Si	0.18
	Co	0.15	S	0.03	Al	0.00	Cl	0.17
	Mo	0.09	Mg	0.02	O	0.00	Mg	0.09
	V	0.08	P	0.01			Ca	0.07
	P	0.03	Cl	0.01			Mn	0.07
	Ti	0.02	Al	0.01			K	0.05
							Cr	0.02

에 가하여 배지로 이용하였다.⁵⁾ 한편 현장 지하수에 함유된 염분 농도와 유사하도록 배지에 0.01 M NaCl(최종농도)을 넣고 2 N NaOH를 이용하여 pH 7.5로 조절한 후 121°C에서 20분 동안 멸균(MLS-3780 SANYO, Japan)하여 실험에 사용하였다.

미생물 균집 결과 발견된 미생물 중 부식을 일으키는 철산화 박테리아(DSMZ 10631)와 황환원 박테리아(DSMZ 10617)를 독일 미생물 보존은행으로부터 분양받아 실험에 이용하였다.

철산화 박테리아의 배양을 위하여 Spaerotilus-*Leptothrix* medium(1.00 g Yeast extract, 1.50 g Peptone, 0.20 g MgSO₄ · 7H₂O, 0.05 g CaCl₂, 0.50 g Ferric ammonium citrate, 0.05 g MnSO₄ · H₂O, 0.01 g FeCl₃ · 6H₂O)을 초순수 1 L에 가하고, 1 N H₂SO₄를 이용하여 pH 7.2로 조절한 후 121°C에서 20분 동안 멸균하였다(MLS-3780 SANYO, Japan). 그 후 호기성 상태에서 철산화 미생물을 접종하여 2일 동안 30°C 200 rpm으로 진탕 배양하여 부식 실험에 이용하였다.

한편 황환원 박테리아의 경우 Postgate C medium(0.5 g KH₂PO₄, 1.0 g NH₄Cl, 4.5 g Na₂SO₄, 0.06 g CaCl₂ · 2H₂O, 0.06 g MgSO₄ · 7H₂O, 6.0 g sodium lactate, 1.0 g Yeast extract, 0.004 g FeSO₄ · 7H₂O, 0.3 g sodium citrate)을 초순수 1 L에 가한 후 1 N H₂SO₄를 이용하여 pH 7.2로 조절한 후 121°C에서 20분 동안 멸균하였다(MLS-3780 SANYO, Japan). 이와 같이 준비된 배지에 혐기성 조건(Anaerobic chamber, BD)하에서 황환원 미생물을 접종한 후 2일 동안 30°C 200 rpm으로 진탕 배양하여 부식 실험에 이용하였다.

2.5. 부식 실험방법

부식 실험은 4종류의 시편이 담지된 nutrient-rich medium에 실험 대상 미생물을 접종시켜 수행하였으며 상세한 내용은 Table 2(a)에 요약한 바와 같다.

Table 2. a) Experimental condition for different types of coupons exposed in various conditions contacting with microorganism and nutrient media

	STS304	Iron	Galvanized Steel	Zinc Steel
Medium	Nutrient medium in 0.01 M NaCl			
	Iron Oxidizing Bacteria + nutrient medium in 0.01 M NaCl			
	Sulfate Reducing Bacteria + nutrient medium in 0.01 M NaCl			
	IOB + SRB + nutrient medium in 0.01 M NaCl			

* IOB: Iron oxidizing bacteria, SRB: Sulfur reducing bacteria

b) Experimental condition for different types of coupons exposed in various disinfection conditions employing NaOCl or UV illumination

	IRON			STS304		
	SRB	IOB	SRB+IOB	SRB	IOB	SRB+IOB
Treatment	Bacteria + nutrient medium in 0.01 M NaCl					
	Bacteria + nutrient medium in 0.01 M NaCl + NaOCl 2, 20, 200 ppm					
	Bacteria + nutrient medium in 0.01 M NaCl + UV(253.7 nm, 1032 μW/cm ²) 1, 2, 3 day					

먼저 2 L 용량의 삼각플라스크에 일정 규격으로 절단된 시편을 각각 5조각씩(20 mm × 80 mm × 5조각) 넣고 nutrient-rich medium을 1.5 L 가한 후 실리콘 재질의 마개를 이용하여 병 입구를 막아 대기에 의한 부식 영향을 최소화하였다. 또한 온도가 증가하면 산소의 확산이 빨라져 부식속도가 증가하기 때문에 이를 방지하기 위해 온도를 30°C로 일정하게 유지되는 인큐베이터(Incubator, VISION Scientific Co., Korea)에 준비된 삼각플라스크를 넣은 후, 매 2일마다 100 mL 시료를 채취하여 중금속의 농도와 pH, DO, ORP, 전도도 등의 수질항목을 분석하였다. 시료 채취 후, 100 mL는 nutrient-rich medium으로 다시 보충하였다.

또한 부식 제어를 위해 미생물의 살균방법으로써 NaOCl 주입 및 UV 조사에 따른 미생물의 살균 및 철산화 억제능을 비교 평가하였으며 상세한 실험 조건은 Table 2(b)에 요약한 바와 같다.^{6,7)}

즉, 500 mL 삼각플라스크에 nutrient-rich medium을 넣은 후 그 입구를 실리콘 스톱퍼로 밀폐한 후, 온도가 30°C로 일정하게 유지되는 인큐베이터에 삼각플라스크를 넣고 실험을 개시하였다. 매 7일 간격으로 1,000 ppm NaOCl을 이용하여 수조내 그 농도가 차례로 2, 20 및 200 ppm까지 되도록 증가시켰으며 2일마다 각각 총철과 용존철의 농도를 분석하였다. UV조사의 경우 미생물 사멸효율이 가장 높은 파장으로 알려진 253.7 nm에서 미생물 살균 실험을 수행하였으며, 수조를 Clean bench 안에 놓고 UV lamp(SANKYO DENKI G30T8)를 1032 μW/cm²의 강도로 조사하였으며 매 7일 간격으로 노출시간을 증가시켰다. UV lamp에 접촉하기 전에 이들 동안 30°C 인큐베이터에서 안정화단계를 거쳤으며, Clean bench 안에서 노출 시간 1일, 2일 및 3일 이후 매 2일 간격으로 시료를 채취하여 각각 총철과 용존철의 농도를 분석하였다.

2.6. 부식 실험 채취 시료의 수질 분석 및 미생물 수 측정

총철과 총아연의 농도를 측정하기 위해서 채취한 시료를 EPA Methods 3015A에 준하여 Microwave 추출기(MARS X Microwave, CEM corporation, USA)로 추출한 뒤 0.45 μm membrane filter로 거른 후 유도결합플라즈마 방출분광분석기(ICP-OES, Varian, Liberty Series 2, USA)로 그 농도를 결정하였다. 또한 반응 28일 후 부식 결과 생성물에 대한 성분은 XRD 및 XRF로 분석되었다. 그 외 수질 분석 항목(용존철과 용존아연)은 지하수 수질 분석 방법과 동일하게 수행하였다.

미생물을 계수하기 위해 본 실험에서는 황환원 박테리아는 Postgate C 배지를 이용하여 분석하였으며, 철산화 박테리아는 Spaerotilus-Leptothrix 배지를 이용하여 계수하였다. 이를 위하여 121℃에서 20분 동안 멸균하여 미리 제조된 배지를 Petri Dish에 부어 배지가 굳기 전에 자동피펫을 이용하여 시료를 접종하였다. 접종한 배지를 30℃ 인큐베이터(Incubator, VISION Scientific Co., Korea)에서 48시간 배양한 후 30~300개 범위의 배지를 선택하여 콜로니를 계수하였으며 그 값은 CFU(Colony Forming Unit)/mL로 표기하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 수질 분석 결과

녹발생 피해지역의 펌프정으로부터 지하수 시료를 채취하여 수질 분석한 결과는 Table 3과 같다. B15 및 B16 지점은 측정된 pH가 각각 10.3, 8.8로 염기성 환경이며 그 외 지점들은 중성 환경이었다. ORP 측정 결과 B5와 B12 지점은 환원 환경인데 반해 B15와 B16는 산화 환경이었다. 그러나 B5와 B12 지점은 DO가 낮고, 환원 환경임에도 불구하고 철산화 반응이 일어나 용출된 철농도가 높았으며 반면 B15와 B16 지점은 산화 환경임에도 불구하고 철농도가 낮게 측정되어 침전물의 생성이 단순하게 ORP 및 DO와 같은 물리화학적 특성으로 설명되지 않는 것으로 판단되었다. 한편, B-5 지점에서는 총철의 양보다 Fe²⁺의 양이 더 높은 것으로 측정되었는데 이는 실험 절차상 2가철 분석방법인 ortho-phenanthroline 법에서는 필터에 의한 여과과정이 누락되어 있기 때문에 흡광도 측정시 미세한 부유물에 의해 오차가 발생되었다고 판단된다.⁸⁾ 또한, TOC 측정 결과 탄소원은 모든 지점이 1.17 mg/L 이하로 검출되었다. 그 결과 채취된 지하수 관정 내에는 종속 영양균의 수가 적을 것으로 판단되었으며, 미생물 군집조사 결과에서도 대부분의 미생물이 빈영양 상태에서 생육할 수 있는 미생물이나 독립영양 미생물임을 확인하였다. 한편 모든 시료 채취 지점이 연안지역에 위치하고 있기 때문에 조수간만에 의한 해수침투의 영향으로 인해 염소 이온(Cl⁻)의 농도가 200~20,000 ppm까지 측정되었다.

Table 3. Water quality parameters and their concentrations of samples taken from bores located in I gas station

Parameters	Sampling point			
	B5	B12	B15	B16
pH	6.3	6.2	10.3	8.8
DO(mg/L)	0.7	1.4	3.3	2.9
ORP(mV)	-93	-60	8.2	35
EC(mS/cm)	18.2	42.2	0.06	34.0
Turbidity(NTU)	43.6	10.6	12.7	33.6
TOC(mg/L)	1.17	0	0	0
Cl(mg/L)	2398.6	21324.3	112.7	16665.4
NO ₃ ⁻ (mg/L)	132.0	0	887.5	329.3
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	258.9	1093.6	3421.3	650.9
Mn ²⁺ (mg/L)	10.3	16.8	0	0.6
T-Fe(mg/L)	96.6	229.6	9.3	25.2
Fe ²⁺ (mg/L)	145.9	65.3	1.9	0.9

3.2. 미생물 군집 분석 결과

철 침전물 생성에 영향을 미치는 대표 미생물 종을 선정하기 위해 철 침전물에 의해 피해가 발생한 지역의 시료를 대상으로 16S rDNA방법을 이용하여 미생물 군집조사를 실시하였다. Table 4는 연구 대상지의 B5, B12 및 B16 지점에서 발견된 미생물 종류와 그 발현 빈도수를 작성한 것이다. NCBI Database상에 존재하는 세균과 본 연구의 대상 시료에서 채취된 16S rDNA의 염기서열이 98%이상 일치하는 종만 분류하여 나타내었다. 미생물 군집 분석을 위해 총 96개의 clone을 분석하였으며 그 결과, 약 70% 이상이 아직 이름이 알려지지 않은 Uncultured bacteria로 분석되었고, 이름이 알려진 세균 중에는 *Spingomonas echinoides*가 20개, *Desulfovibrio aespoensis*가 6개, *Fusibacter* sp. *S1*와 *Ralstonia pickettii*, *Lactobacillus fermentum*은 각각 1개 등으로 분석되었다.

이 가운데 *Ralstonia pickettii*는 수 mM 농도의 중금속환경에서도 생존할 수 있는 독립 영양 미생물로서 혐기성조건에서도 생존 가능한 미생물로 알려져 있다.⁹⁾ *Spingomonas echinoides*는 다양한 종류의 유기화합물을 영양원으로 사용할 수 있는 능력이 있기 때문에 담수 또는 염수환경에서도 생존할 수 있으며 빈영양 상태에서도 생육할 수 있다.⁹⁾ *Desulfovibrio aespoensis*는 황환원 미생물로 잘 알려져 있으며, 전자공여체로 lactate, formate, 수소를 이용하고 전자수용체로 sulfate를 이용하여 H₂S로 환원시키며 염수환경에서도 생존할 수 있다.¹⁰⁾ *Fusibacter* sp. *S1*는 oil field에서 주로 발견되는 thiosulfate를 환원시키는 미생물로서, 0~10%의 NaCl 농도에서도 생장할 수 있다.⁹⁾

이와 같이 지점별 미생물 발현 빈도수 분석 결과 실험 대상 미생물은 각 지점에서 빈도수가 높은 것으로 정하되, 현장 조건과 같이 DO가 낮고, 해수 환경에서도 성장할 수 있는 미생물을 선정하였다. 그 결과, 황환원 미생물로서 *Desulfovibrio* sp.인 *Desulfovibrio aespoensis*로 결정하였다.

Table 4. Frequency of microorganism observance throughout various monitoring wells of sampling point(Similarity $\geq 98\%$)

GenBank Accession Number	Clone name	B5	B12	B16	C/S
AJ012461	<i>Spingomonas echinoides</i>	●	●	●	●
AF477498	<i>Lactobacillus fermentum</i>	●			
AM157417	<i>Staphylococcus epidermidis</i>		●		
AY725424	<i>Desulfovibrio aespoensis</i>	●		●	
DQ908951	<i>Ralstonia pickettii</i>			●	
AF491333	<i>Fusibacter sp. SA1</i>	●			
AJ306752	uncultured bacterium SHA-32	●	●	●	●
AY570634	uncultured bacterium PL-5B10	●			

이와 더불어 철산화 미생물이 부식에 미치는 영향과 황환원 미생물과의 연관성을 살펴보기 위해 철산화 미생물의 대표종을 선정하였다. 철산화 미생물의 대표종을 선정하기 위하여 시료로부터 얻은 genomic DNA를 *Leptothrix mobilis* primer로 PCR 증폭한 후 PCR 산물을 확인하였고, 그 결과 산화환경을 나타내던 B15와 B16 지점의 시료에서 *Leptothrix mobilis*가 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 황환원 미생물과 더불어 부식 실험을 수행하기 위한 철산화 미생물로서 *Leptothrix mobilis*를 선정하였다.¹⁰⁻¹²⁾

3.3. 부식 실험 결과

3.3.1. 황환원균과 철산화균이 철의 용출에 미치는 영향

0.01 M NaCl의 염분 농도에서 철의 부식 속도와 미생물의 영향을 파악하기 위해 미생물의 농도 변화를 살펴보았다. 실험 개시 후 초기에는 각 미생물 농도가 약 230,000 cell/mL로 비슷하였지만 실험 개시 9일 후에는 황환원 미생물의 수(42,000 cell/mL)는 감소하고 철산화 미생물의 수(820,000 cell/mL)는 오히려 증가하였다. 이는 철시편으로부터 용출된 철이 철산화 미생물에 의하여 3개월로 산화되어 지속적인 미생물의 에너지 공급원으로 작용했기 때문으로 판단된다. 또한 23일 이후에는 황환원 미생물과 철산화 미생물을 혼합 접종한 반응기의 황환원 미생물수가 황환원 미생물만 단독 접종한 반응기의 미생물 수 73,000 cell/mL 보다 약 66배 많은 4,820,000 cell/mL를 나타내었다. 이것은 두 미생물을 혼합 주입했을 때, 호기성균인 철산화 미생물의 급격한 증식에 의한 산소 소모로 인해 황환원 미생물의 최적 조건인 혐기성 상태를 형성해 주었기 때문으로 판단되며, DO농도 확인 결과 0.1 mg/L 이하로 유지되었다.

실험시작 14일 경과 후 황환원 미생물을 접종한 반응기의 경우 배지의 색이 검은 색으로 변했으며, 두 미생물을 혼합 접종한 반응기의 경우도 22일 경과 후 검은 색을 나타내었다(Fig. 1). 이러한 흑색의 생물막은 황환원균인 *Desulfovibrio sp.*에 의해 발생하는 FeS의 생성에 의한 것으

로 잘 알려져 있으며, 특히 실험 시간의 장기간 소요시 형성되는 혐기성 조건에서는 SRB 활성화에 의하여 그 현상이 더욱 증가하게 된다.⁶⁾ 반면 철산화 미생물을 접종한 반응기의 경우 적갈색을 띄었는데 이것은 철이나 망간 성분이 주로 산화되는 호기성 조건에서 발생하며, XRD 분석 결과 그 생성물은 magnetite(Fe_3O_4) 형태로 밝혀졌다.

0.01 M NaCl의 염분 농도에서 철의 부식 속도와 철침전물 생성에 미치는 미생물의 영향을 파악하기 위해서 총철과 용존철의 농도를 살펴보았다. Fig. 2(a)와 같이 실험 개시 후 초기에 철 시편이 nutrient-rich medium에 노출되었을 때 모든 반응기(Blank, 철산화균 접종반응기, 황환원균 접종반응기, 철산화균과 황환원균 혼합접종반응기)에서는 철이 활발히 용출되는 모습을 볼 수 있었다. 그러나 실험개시 7일 경과 이후 Blank의 철 용출 속도는 감소하였지만 그 외 미생물을 접종한 반응기에서는 계속해서 철이 용출되고 있는 것을 관찰할 수 있었다.

Table 5는 실험 개시 28 일 후의 각 반응기(Blank, 철산화균 접종반응기, 황환원균 접종반응기, 철산화균과 황환원균 혼합접종반응기)별 총 철 농도와 용존철의 농도를 나타내고 있다. Table 5에서 보는 바와 같이 철산화 미생물을 접종한 반응기에서는 총 철의 농도가 10,230 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높아 철 시편으로부터 철 용출이 가장 활발히 일어났고, 철침전물 생성의 경우는 총철과 용존철의 농도차로 볼 때 황환원 미생물을 접종한 반응기(철침전물 농도; 7,036 $\mu\text{g/L}$)에서 가장 높은 것으로 나타났다. 즉 철산화 미생물은 철 시편의 부식 속도를 증가시키는 반면 황환원 미생물의 경우에는 부식속도뿐만 아니라 철침전물의 형성에도 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

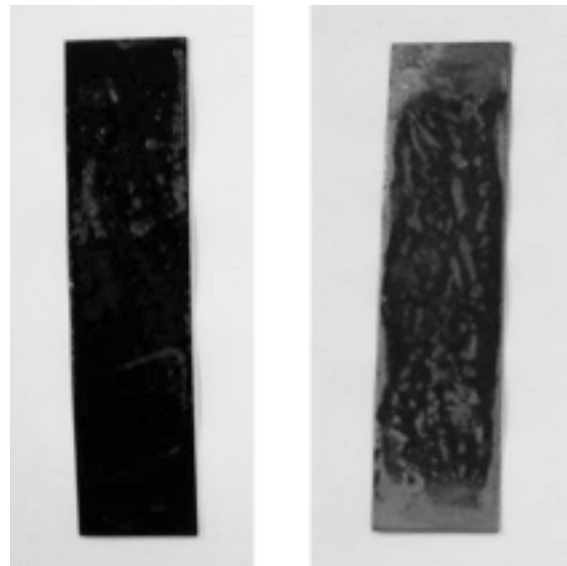
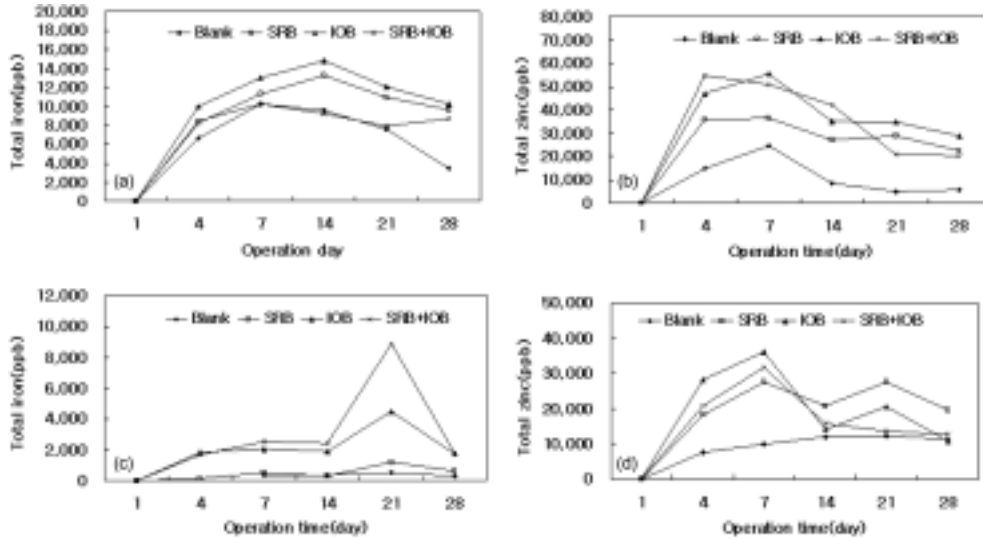


Fig. 1. Picture of iron coupons after exposure time(left : iron coupon of sulfate reducing bacteria injection reactor, right : iron coupon of iron oxidizing bacteria injection reactor)



* SRB(Sulfate reducing bacteria inoculated into a reactor), IOB(Iron oxidizing bacteria inoculated into a reactor), SRB + IOB(Sulfate reducing bacteria and Iron oxidizing bacteria inoculated into a reactor)

Fig. 2. Microbial leaching of total iron or total zinc from coupons under 0.01 M NaCl. (a) Iron (b) Galvanized Steel (c) STS 304 (d) Zinc steel.

Table 5. Concentration of total iron and dissolved iron after exposure for 28 days according to four different types of coupons

Coupons	ppb	Blank	SRB	IOB	SRB+IOB
IRON	Total iron	3,479	9,686	10,230	8,727
	Dissolved iron	3,168	2,649	4,643	2,437
	Iron precipitant	311	7,037	5,588	6,290
Galvanized steel	Total zinc	5,722	22,334	28,797	20,222
	Dissolved zinc	3,900	3,591	3,384	5,211
	zinc precipitant	1,822	18,743	25,414	15,011
STS304	Total iron	329	658	1,748	1,804
	Dissolved iron	38	369	209	330
	Iron precipitant	290	289	1,538	1,473
Zinc steel	Total zinc	11,277	19,581	10,779	12,690
	Dissolved zinc	1,764	5,285	2,272	3,475
	zinc precipitant	9,514	14,297	8,507	9,216

3.3.2. 황환원균과 철산화균이 합석의 용출에 미치는 영향

0.01 M NaCl의 염분 농도에서 합석의 부식 속도와 미생물의 영향을 파악하기 위해 미생물의 농도 변화를 살펴 보았다. 실험 개시 후 초기에 모든 반응기(철산화균 접종 반응기, 황환원균 접종반응기, 철산화균과 황환원균 혼합 접종반응기)의 미생물의 농도는 약 300,000 cell/mL로 비슷하였지만, 실험 개시 7일 경과 이후 철산화균을 단독 접종한 경우(6,200,000 cell/mL)가 황환원균의 독립(470,000 cell/mL) 및 혼합(2,300,000 cell/mL) 접종의 경우보다 박테리아 수가 3~13배 정도 많은 것으로 관찰되었다. 한편 Beech 등에 의하면 부식속도는 황환원 미생물의 수와는 관련이 없으며, 황환원 미생물의 신진대사결과 생성된 H₂S의 산화에 의해서 좌우된다고 보고되고 있다.^{13,14)} 또한 Poulson 등

에 의하면 *Desulfovibrio desulfuricans*는 아연의 농도가 13 mg/L 이상이 되면 성장이 억제되는 것으로 보고되었다.¹⁵⁾

XRF의 분석 결과 아연이 합석의 구성성분 중 약 92.8%를 차지하고 있으며 아연의 부식 속도와 침전물의 생성에 미치는 미생물의 영향을 조사하기 위하여 총 아연과 용존 아연의 농도 값을 비교 평가하였다. Fig. 2(b)와 같이 실험 개시 후 철산화균 접종반응기, 황환원균 접종반응기, 철산화균과 황환원균 혼합접종반응기에서는 미생물의 활발한 활동에 의해 합석 시편으로부터 용출된 총 아연의 양이 Blank의 경우 보다 3~4배 높은 것으로 관찰되었다. 또한 Blank에서는 용출되는 총 아연의 농도가 5,722 µg/L(7일 후)에서 5,000 µg/L(2 8일 후)까지 감소하였지만 철산화균 접종반응기, 황환원균 접종반응기, 철산화균과 황환원균 혼합접종반응기에서는 약 20,000 µg/L 정도를 유지하며 지속적으로 용출되는 것이 관찰되었다. 따라서 아연을 용출시키는 미생물이 밀접한 관계를 가지고 있음을 보여주었다.

실험 개시 28일 후의 각 반응기의 수용액상 생성된 총 아연 농도와 용존 아연 농도는 Table 5에 제시되었다. 철산화 미생물을 접종한 경우에 합석 시편으로부터 총 아연 성분의 용출이 가장 활발히 일어났고(28,797 µg/L), 반면 용존 아연의 농도는 가장 낮은 것(3,383 µg/L)으로 측정되었다. 따라서 철산화 미생물은 합석 시편의 아연 부식 속도를 증가시키는 동시에 아연 침전물 형성을 촉진시키는 것으로 판단되었다.

3.3.3. 황환원균과 철산화균이 스테인리스 스틸의 용출에 미치는 영향

0.01 M NaCl의 염분 농도에서 스테인리스 스틸(STS 304)의 부식 속도와 미생물의 영향을 파악하기 위해 미생물의 농도 변화를 살펴보았다. 미생물 주입 후 초기에 미

생물의 농도는 약 230,000 cell/mL로 비슷하였지만 실험 개시 9일 경과 이후 철산화 미생물의 수가 황환원 미생물의 수보다 10배 정도 증가하였다. 이는 철산화 미생물이 스테인리스스틸로부터 용출된 2가철을 3가철로 산화시키면서 신진대사 및 증식에 필요한 에너지를 더 충분히 이용할 수 있었기 때문으로 판단되었다. 또한 9일 경과 이후 철산화균과 황환원균을 혼합 배양한 경우가 독립적으로 미생물을 배양한 경우보다 총 미생물수가 10~20배 정도 많았다. 이는 혼합 배양한 경우가 실험 개시 초기부터 철 용출에 따른 2가철 생성에 따라 철산화 미생물의 증식활동이 활발하였고 이에 따라 수용액 중 산소농도가 감소하여 황환원 미생물의 최적 조건인 혐기성 상태가 형성되어 시너지 효과(synergy effect)가 동시 다발적으로 발생하였기 때문으로 판단되었다.¹⁶⁾

0.01 M NaCl의 염분 농도에서 미생물 증식에 따른 스테인리스 스틸 시편의 부식 속도와 침전물 생성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 총 철과 용존철의 농도를 Fig. 2(c)에 비교 평가하였다. Fig. 2(c)와 같이 Blank로부터 용출되는 철의 농도는 500 µg/L로 미생물을 접종한 반응기의 총 철 농도(21일 경과시점 기준 철산화균과 황환원균을 혼합 접종한 반응기; 8,896 µg/L, 황환원균 접종반응기; 1,219 µg/L)에 비해 현저히 낮았다.

Table 5에 나타낸 바와 같이 혼합 배양한 경우 시편으로부터 철의 용출(1,804 µg/L)이 가장 활발히 일어났다. 한편 황환원 미생물만 단독 배양한 경우와 Blank의 경우 철 침전물의 농도가 비슷한 값을 나타내고 있어, 황환원 미생물에 의한 스테인리스 스틸로부터의 철의 용출은 거의 없는 것으로 판단되었다. 총철과 용존철의 농도차로 볼 때 철산화 미생물을 접종한 경우 철침전물의 생성이 가장 많은 것(1,538 µg/L)으로 나타났다. 혼합배양의 경우 철침전물의 농도(1,538 µg/L)가 철산화 미생물 단독 접종 의 경우(1,473 µg/L)와 유사하게 측정되었다. 따라서 스테인리스 스틸의 경우 부식 속도와 침전물의 형성에는 철산화 미생물이 지배적으로 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

Xu 등에 의하면 염소 농도(Cl⁻) 242.66 mg/L에서 316L 스테인리스 스틸에 대한 부식실험 결과 황환원 미생물이나 철산화 미생물이 존재할 때가 미생물이 없는 환경보다 표면 부식이 훨씬 증가하는 것으로 보고되었으며 부식 생성물 또한 두 가지(철산화균, 황환원균) 미생물을 혼합했을 때 더욱 심각하다고 밝혀졌고,¹²⁾ 이는 본 실험과 유사한 결과였다.

3.3.4. 황환원균과 철산화균이 아연도강의 용출에 미치는 영향

0.01 M NaCl의 염분 농도에서 아연도강의 부식 속도와 미생물의 영향을 파악하기 위해 미생물의 농도 변화를 살펴 보았다. 미생물 접종 후 모든 반응기(철산화균 접종반응기, 황환원균 접종반응기, 철산화균과 황환원균 혼합접종반응기)에서의 초기 미생물의 농도는 약 300,000 cell/mL

로 비슷하였고, 7일 경과 이후 철산화균의 수가 혼합 접종이나 독립적으로 접종한 황환원 미생물의 경우 보다 약 10배 정도 우점하는 것을 볼 수 있었다. 이는 아연도강 시편으로부터의 철의 용출은 황환원 미생물보다 철산화 미생물에 의하여 더 지배적으로 발생함을 보여주고 있다.

XRF 분석 결과 아연도강의 구성성분은 철이 43.6%, 아연이 32.5%로 시편 내 아연의 농도가 철보다 약 11% 적지만, 실험 개시 7일 경과 후 용출된 철의 농도(철산화균 접종반응기, 7일 후 농도 1,194 µg/L)보다 아연(철산화균 접종반응기, 7일 후 농도 18,482 µg/L)의 농도가 약 15 배 정도 높았다. 이것은 미생물에 의한 부식 속도가 철보다 아연이 빠르다는 것을 보여준다. Fig. 2(d)에서 볼 수 있듯이 실험 초기 7일 동안은 철산화 미생물의 활발한 활동에 의해 아연도강 시편으로부터 아연이 가장 많이 용출되었다. 한편, 실험개시 28일 경과 이후, 철의 경우 철산화균과 황환원균을 혼합 접종했을 때가 가장 많이 용출되었고(총철농도-철산화균과 황환원균 혼합접종반응기 2,064 µg/L), 아연의 경우 황환원균을 단독 접종한 경우가 아연의 용출이 가장 높았다(총아연농도-황환원반응기 19,581 µg/L).

실험 개시 28일 경과 후 아연도강의 부식에 따른 총 아연 농도와 용존 아연의 농도를 Table 5에 나타내었다. 황환원 미생물을 접종한 경우 아연의 용출이 가장 활발히 일어났고(19,581 µg/L), 또한 아연 침전물의 생성도 가장 많은 것(14,296 µg/L)으로 나타났다. 따라서 아연도강 시편의 경우 황환원 미생물에 의하여 아연 부식 속도와 아연 침전물 생성이 상당히 영향을 받는 것으로 나타났다.

모든 실험조건에 불문하고 일정기간이 경과한 후에는 모든 재질의 시료에서 공통적으로 부식량이 저하되는 현상을 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다. 이것은 닫힌계(본 실험의 경우 밀폐형)에서 발생한 과잉의 H₂S로 인해 미생물 활동이 저해되어 부식속도가 저하된 것으로 판단된다. Sungur 등에 의하면 자연 상태에서는 부식속도가 실험실의 밀폐형 조건의 부식속도보다 높게 유지되어 계속적인 부식이 일어날 수 있다고 보고하였다.¹⁴⁾

3.5. 미생물 제어 실험 결과

3.5.1. 철 시편내 황환원균과 철산화균의 성장거동

Fig. 3(a)~(b)는 철 시편내 황환원균과 철산화균의 존재 하에서 NaOCl을 주입하거나 UV조사를 하였을 때 미생물 살균 영향을 나타낸 것이다.

미생물 감소량은 Blank를 기준으로 했을 때 Blank보다 미생물의 수가 더 많아졌을 경우는 (-)값으로, Blank보다 미생물의 수가 적어졌을 경우는 (+)값으로 표현하였으며, (+)값일수록 미생물 제어가 더 효과적이었던 것을 나타낸다. UV조사의 경우 황환원균은 2일과 3일 동안 조사 후 각각 93%, 98% 사멸하였고, 철산화균의 경우에는 그 수가 2일 동안 조사했을 때 95% 감소하였지만 UV를 1일 또는 3일 동안 조사 후에는 오히려 미생물수가 각각 56%, 52% 증가하여 UV처리에 따른 뚜렷한 미생물 사멸 경향

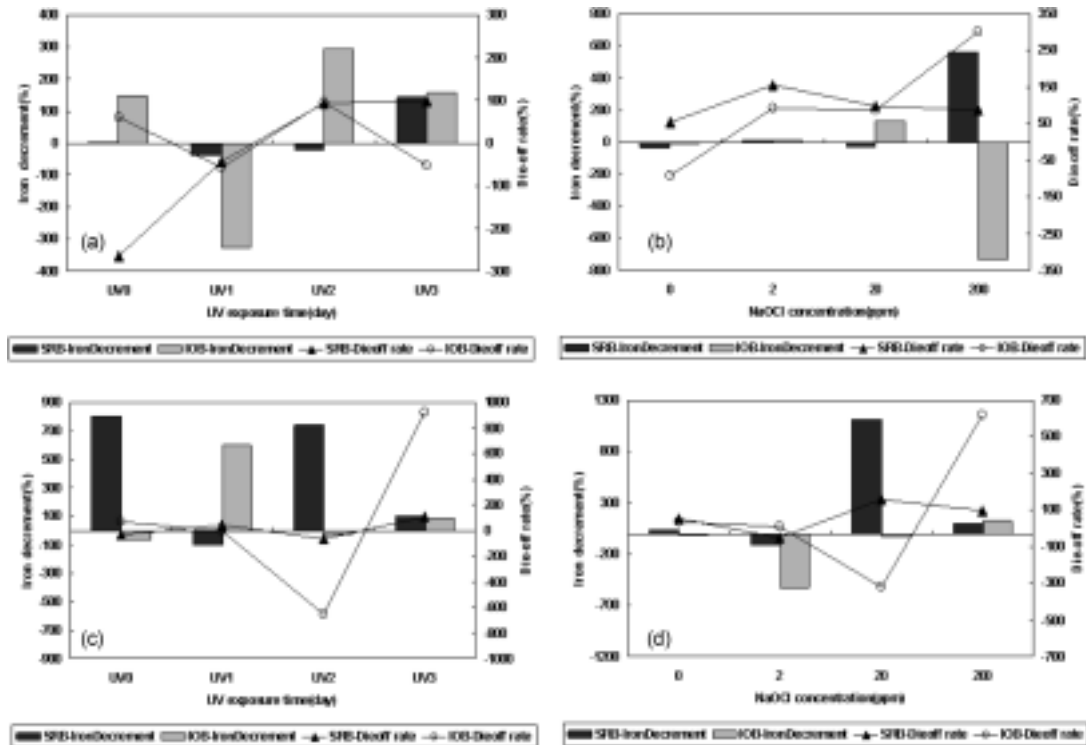


Fig. 3. Die-off rate or iron decrement of bacteria when exposed to NaOCl or under UV illumination in the presence of coupon. (a) when iron coupon under UV illumination (b) when iron coupon contacted in NaOCl solution (c) when STS 304 coupon under UV illumination (d) when STS 304 contacted in NaOCl solution.

을 나타내지 않았다.

총철 감소량은 Blank를 기준으로 했을 때 Blank보다 총철감소량이 많은 경우는 (+)값으로, Blank보다 총철감소량이 작은 경우는 (-)값으로 표현하였으며, (-)값일수록 산화제에 영향을 받아 시편으로부터 오히려 철의 용출이 증가했음을 나타낸다. 총철 변화량의 측정 결과는 Fig. 3(a)~(b)에서와 같이 황환원균의 경우 UV 노출 3일 혹은 NaOCl 200 ppm일 때 철 시편으로부터 용출되는 철의 양이 UV는 143%, NaOCl 562% 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 철산화균의 경우에는 UV 노출 1일 혹은 NaOCl 200 ppm일 때 철 시편으로부터 용출되는 철의 양이 각각 326%, 728% 증가하는 것으로 관찰되었다. 따라서 철 시편에 부착 성장하는 황환원 미생물(*desulfovibrio* sp.)의 경우에는 미생물학적인 제어를 위해 염소의 투입이나 UV 처리는 금속 부식속도에 영향을 미치지 않기 때문에 유용하지만 철산화 미생물(*Leptothrix* sp.)의 경우에는 미생물 성장 제어를 위해 투여한 NaOCl이 산화제로 작용하여 금속 부식 속도가 더 빨라지기 때문에 사용시 적절한 농도를 투여하여야 한다.

3.5.2. 스테인리스 스틸 시편내 황환원균과 철산화균의 성장거동

Fig. 3(c)~(d)는 스테인리스 스틸 시편에 대하여 NaOCl 혹은 UV 조사의 경우 황환원균과 철산화균의 성장 거동을 도시하였다.

Fig. 3(c)에 제시된 바와 같이 황환원 미생물의 경우 UV 2일 처리 후에는 미생물 수가 65% 증가하였지만, UV 1일과 3일 처리 후에는 미생물 수가 각각 39%, 103% 감소하였다. 철산화 미생물의 경우 UV로 3일 처리 후에만 미생물 수가 감소하였고 1일과 2일의 경우는 감소하지 않았다. 한편 Fig. 3(d)와 같이 황환원균은 NaOCl을 20 ppm과 200 ppm을 첨가하였을 때 미생물의 수가 각각 156%, 95% 감소하였고 NaOCl을 2 ppm 첨가하였을 때는 미생물의 수가 50% 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 철산화균은 NaOCl 2 ppm 및 200 ppm 첨가한 경우 미생물 수가 각각 9%와 616%로 감소하였다.

황환원균에 대한 총철 변화량의 측정 결과 Fig. 3(c)~(d)에서 보는 바와 같이 UV를 2일, 3일 동안 조사했을 때와 NaOCl 20, 200 ppm 첨가하였을 때 철 시편으로부터 용출되는 철의 농도가 감소하는 것을 관찰할 수 있었고, UV 1일 노출 혹은 NaOCl 2 ppm을 첨가하였을 때에는 용출되는 철의 농도가 각각 103%, 110% 증가하였다. 따라서 스테인리스 스틸(STS304)시편의 경우 NaOCl의 투입이나 UV 처리는 황환원 미생물(*desulfovibrio* sp.)의 살균 목적에 효율적으로 사용되어, 그 자체가 금속 부식속도에 영향을 미치지 않기 때문에 살균제로서 매우 유용하다고 판단되었다.

철산화균의 총철 변화량 측정 결과 Fig. 3(c)~(d)에서 보는 바와 같이 UV 1일과 3일 조사했을 때 각각 594%, 87% 감소하였고, NaOCl 200 ppm일 때 철 시편으로부터

용출되는 철의 농도가 124% 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 한편, NaOCl을 2 ppm 주입하였을 때 총철의 농도는 135 µg/L 정도 상승하였고(미생물제어를 하지 않았을 때의 총철의 농도 보다 531% 상승), 이는 미생물 성장 제어를 위해 투여한 NaOCl이 오히려 산화제로 작용하였기 때문에 금속부식 속도가 더 빨라진 것으로 판단되었다. 따라서 스테인리스 스틸(STS304)시편에 부착하여 성장하는 철산화 미생물(*Leptothrix* sp.)에 대한 미생물학적인 제어를 위하여 NaOCl을 과잉으로 주입하는 경우 그 자체에 의한 부식이 발생할 수 있기 때문에 적절한 처리 농도로 조절하여 사용하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 철산화 미생물인 *Leptothrix* sp. 및 황환원 미생물 *Desulfovibrio* sp.를 염수계에 존재하는 대표 미생물로 선정하여 이들이 철의 부식속도와 침전물 형성에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 그 성장을 제한하는 살균 조건을 도출하고자 하였다.

1) 관 재질에 따라서는 아연도강과 철의 부식정도가 STS 304와 합석의 경우보다 높게 나타났으며 특히 아연도강의 경우 가장 높은 부식도를 나타내었다. 부식속도가 비교적 높았던 아연도강과 철 시편의 경우 다른 두개의 시편의 경우보다 많은 양의 침전물을 확인할 수 있었다.

2) 철 시편에 대한 미생물에 의한 산화 영향을 평가한 결과 철산화 미생물을 접종한 반응기에서 부식속도가 가장 크게 증가하였고, 황환원 미생물을 접종한 경우 철침전물을 형성시키는데 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3) 합석 시편에 대한 미생물 반응결과 황환원 미생물보다 철산화 미생물이 부식 속도를 증가시킬 뿐만 아니라 철 침전물 형성을 촉진시키는 것으로 나타났다.

4) 스테인리스 스틸(STS 304)의 경우 부식속도와 철침전물 형성에 대한 황환원 미생물의 영향은 거의 없었으며, 주로 철산화 미생물에 의해 영향을 받았다. 또한 단독 미생물을 접종했을 때보다 황환원 미생물과 철산화 미생물을 혼합 배양했을 때 서로의 시너지 효과에 의해 황환원미생물과 철산화미생물의 수가 높았다.

5) 아연도강 시편은 철이 43.6%, 아연이 32.5%임에도 불구하고, 용출된 아연의 양이 철에 비해 15배로 높아 미생물에 의해 아연의 부식 속도가 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 철산화 미생물보다 황환원 미생물에 의해 더 많은 영향을 받는 것으로 확인되었다.

6) 미생물에 의한 부식을 제어하기 위하여 살균 실험을 수행한 결과, 철이나 스테인리스 스틸에서 염소의 주입이나 UV 조사로 인해 미생물 농도가 감소되었으나, 철산화 미생물의 경우에는 높은 NaOCl 농도(철시편의 경우 NaOCl 200 ppm, 스테인리스스틸 시편의 경우 NaOCl 2 ppm)에서는 미생물이 재성장하거나 부식 속도를 증가시키는 현

상이 발견되었다. 이는 미생물의 제어를 위해 사용한 염소 주입이 때로는 금속 부식을 촉진시키는 역할을 하기 때문이며, 따라서 처리시 적절한 처리 농도를 조절하고 처리 후의 미생물의 재성장 제어에 대한 대안도 필요하다고 판단되었다.

사 사

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-D00204).

참고 문헌

1. 한국가스공사 연구개발원, “강구조물의 부식감시 및 방지 기술개발”, 과학기술부, 제3장, pp. 454~455(2004).
2. 농림부, “지하수 관정의 적정관리를 위한 사후관리 방안 에 관한 연구”, 농어촌진흥공사, pp. 171~186(1997).
3. David, E. and Niels, P. R., “Investigation of an iron-oxidizing microbial mat community located near Aarhus, Denmark: field studies,” *Environ. Microbio.*, **11**, 4022~4031(1994).
4. Tanner, M. A., Everett, C. L., Coleman, W. J., Yang, M. M., and Youvan, D. C., “Complex microbial communities inhabiting sulfide-rich black mud from marine coastal environment,” *Biotechnology*, **8**, 1~16(2000).
5. Congmin Xu, Yaoheng Zhng, Guangxu Cheng and Wensheng Zhu “Pitting corrosion behavior of 316L stainless steel in the media of sulphate-reducing and iron-oxidizing bacteria,” Elsevier Inc.(2007).
6. 김태현, 이윤진, 임승주, “금수관내 염소 주입이 미생물의 증식과 부식에 미치는 영향,” *Kor. J. Environ. Hlth.*, **32**(5), 431~439(2006).
7. 박대규, “공장 냉각수시스템에 있어서 미생물에 의한 금속부식과 살균제(NaOCl)의 효과,” *RIST 研究論文*, **18**(4), (2004).
8. 임현정, “미생물에 의해 환원된 철을 이용한 PCE 탈염소화,” 이화여자대학교 과학기술대학원, 석사학위 청구논문(2002).
9. Microbewiki Home page, <http://microbewiki.kenyon.edu> (2007).
10. Ojumu, T. V., Petersen, J., Searby, G. E., and Hansford, G. S., “A review of rate equations proposed for microbial ferrous-iron oxidation with a view to application to heap bioleaching,” *ELSEVIER, Hydrometallurgy*, **83**, 21~28(2006).
11. Emerson, D. and Moyer, C. L., “Isolation and characterization of novel iron-oxidizing bacteria that grow at circumneutral pH,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**, 4784~4792 (1997).

12. Congmin Xu, Yaoheng Zhang and Guangxu Chenh, "Localized corrosion behavior of 316L stainless steel in the presence of sulfate-reducing and iron-oxidizing bacteria," *Mater. Sci. Eng.*, **443**, 235~241(2007).
13. Beech, I. B., Sunny Cheung, C. W., Patrick Chan, C. S., Hill, M. A., Franco, R., and Lino, A. R., "Study of parameters implicated in the biodeterioration of mild steel in the presence of different species of sulfate-reducing bacteria," *Int. Biodeter. Biodegr.*, **34**, 289~303(1994).
14. Sungur, E. I., Cansever, N., and Cotuk, A., "Microbial corrosion of galvanized steel by a freshwater strain of Sulphate reducing bacteria(*Desulovibrio* sp.)," *Science Direct, Corrosion Science*, **49**, 1097~1109(2007).
15. Poulson, S. R., Colberg, P. J. S., and Drever, J. I., "Toxicity of heavy metals(Ni,Zn) to *Desulfovibrio desulfuricans*," *Geomicrobiol.*, **14**, 41~49(1997).
16. Scotto, V., Citio, R. D., and Marcenaro, G., "The Influence of Marine Aerobic on Stainless Steel Corrosion Behaviour," *Corrosion Science*, **25**(3), 185~194(1985).
17. 김태현, 이윤진, 이환, 이철효, 안교철, 이우식, "급수관에서 관재에 따른 부식특성과 미생물 재성장 고찰," *한국환경과학회지*, **16**(1), 121~128(2007).
18. Mor, E. D., Beccaria, A. M., and Poggi, G., "Behaviour zinc in seawater in the presence of sulphides," *Br. Corrosion. J.*(Quarteriv), **1**, 53~56(1974).
19. James, R. E. and Ferris, F. G., "Evidence for microbial-mediated iron oxidation at a neutrophilic groundwater spring," *Chemical Geology*, **212**, 301~311(2004).
20. Starosvetsky, J., Starosvetsky, D., and Armon, R., "Identification of microbiologically influenced corrosion(MIC) in industrial equipment failures," *Engineering Failure Analysis*, **14**, 1500~1511(2007).
21. Sogarrd, E. G., Aruna, R., Abraham-Peskir, J., and Koch, C. B., "Conditions for biological precipitation of iron by *Gallionella ferruginea* in a slightly polluted ground water," *Appl. Geochem.*, **16**, 1129~1137(2001).
22. Ferris, F. G. and Warren, L. A., "Continuum between sorption and precipitation of Fe(III) on microbial surfaces," *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 2331~2337(1998).
23. Sobolev, D. and Roden, E. E., "Suboxic deposition of ferric iron by bacteria in opposing gradients of Fe(II) and oxygen at circumneutral pH," *Appl. Environ. Microbiol.*, **67**, 1328~1334(2001).
24. Schrenk, M., Edwards, K., and Banfield, J., "Distribution of *T. ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans* : implication for generation of acid mine drainage," *Science*, **279**, 1519~1521(1998).
25. Stumm, W. and Morgan, J. J., "Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters(3rd ed.)," Wiley Interscience, New York, pp. 672~725(1996).
26. Emerson, D., "Microbial oxidation of Fe(II) and Mn(II) at circumneutral pH. In: Lovely, D.R.(Ed.), *Environmental Microbe-Metal Interactions*," ASM Press, Washington, DC, pp. 31~52(2000).