

## 배관의 부식 상태 진단에 사용되는 ER 부식센서의 가속부식환경에서의 신뢰성 평가

황현규<sup>1</sup> · 신동호<sup>1</sup> · 김현희<sup>2</sup> · 이정형<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91

<sup>2</sup>목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91

(2021년 11월 21일 접수, 2021년 11월 26일 수정, 2021년 11월 26일 채택)

### Reliability Evaluation of ER Type Corrosion Sensor for Monitoring Corrosion of Piping System Under Accelerated Corrosion Environment

Hyun-Kyu Hwang<sup>1</sup>, Dong-Ho Shin<sup>1</sup>, Heon-Hui Kim<sup>2</sup>, and Jung-Hyung Lee<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

<sup>2</sup>Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received November 21, 2021; Revised November 26, 2021; Accepted November 26, 2021)

In this study, the reliability of a commercial ER-type corrosion sensor was evaluated under an accelerated corrosion environment to verify its suitability for application in monitoring of ship's seawater piping system. A closed-loop pump piping testbed was designed and constructed to compare the wall thickness reduction of the pipe and the response from the sensor. The sensor was attached inside the pipe near the outlet of the pump that was exposed to a 3.5% NaCl solution with or without copper accelerated acetic acid (CASS). The results demonstrated that the presence of CASS significantly increased the corrosivity of the solution as well as the thickness reduction of the pipe, as expected. On the other hand, the corrosion products formed by the solution with CASS were thicker compared with those without CASS. The sensor response to temperature variation was found to be a clear linear relationship for the solution without CASS but there was a non-linear relationship where CASS was present.

**Keywords:** CASS Solution, Corrosion Monitoring, Temperature, ER Sensor, Linear Fitting

## 1. 서론

전세계적으로 빅데이터(Big data), 인공지능(AI) 그리고 사물인터넷(IoT) 등을 핵심기술로 사용하는 4차 산업혁명에 대한 관심이 고조되고 있다. 많은 산업 군에서 이러한 기술에 대한 중요성을 인식하고 대응하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 우리나라 수출입 물량의 90% 이상을 차지하는 해운산업, 조선 및 기자재 산업에서 선박의 안정성과 경제성을 높이면서 환경오염을 최소화 할 수 있는 자율운항선박(Autonomous ship)을 목표로 많은 연구 개발이 이루어지고 있다. 국제해사기구(IMO)는 인간과 상호작용 없이 운항할 수 있는 선박을 자율운항선박이라고 규정하고 있다. 자율운항선

박은 레벨 1에서 4까지 존재하며, 레벨 3수준부터 선원이 승선하지 않는 선박을 의미한다. 선박 운항 시 인력에 대한 비용 및 거주 공간은 큰 비중을 차지한다. 레벨 3수준 이상의 자율운항선박이 개발될 경우 인건비 및 공간 활용에 있어 매우 큰 효율을 낼 수 있다. 레벨 3 수준 이상의 자율운항선박을 개발하기 위해 기존의 PMS (Planned maintenance system)기반의 정비에서 상태기반 정비(CBM, Condition based maintenance)로의 전환이 필수적이다. 특히, 선박 내 수많은 배관은 침식 및 부식에 의한 손상이 흔히 발생하기 때문에 배관의 고장 진단 및 잔존 수명(RUL, Remaining useful life)에 대한 예측이 매우 중요하다.

배관의 고장 진단 및 잔존 수명 예측을 위해서 다양한 센서가 적용되고 이에 따른 연구가 활발히 진행 중이다. J. C. Adamowski는 UT (Ultrasonic Transducer) 센

\*Corresponding author: [jhlee@mmu.ac.kr](mailto:jhlee@mmu.ac.kr)

황현규, 신동호: 석사과정, 김현희, 이정형: 교수

서를 이용하여 부식에 대한 감시 성능을 평가하였으며, UT 센서를 사용하여 두께를 측정할 경우 유체 상태 및 온도에 따라 측정값이 다르기 때문에 두께 측정 시 수치에 대한 보상이 필요하다고 보고하였다 [1]. Durrani는 LPR (Linear Polarization Resistance) 타입 부식센서로 배관시스템의 수명을 간접적으로 측정하였고, 이를 산업에서 일반적으로 적용되는 부식쿠폰과 상호 비교함으로써 LPR 센서의 잔존 수명 예측에 대한 신뢰성이 매우 우수하다고 평가하였다 [2]. Liu는 다양한 센서를 이용하여 고장 감시하는 파이프에 대하여 고찰하였으며, 센서 기술 발전이 CBM을 수행하는데 매우 중요한 역할을 하지만 상대적으로 높은 비용에 대한 문제점이 있다고 보고하였다 [3]. 부식센서를 이용하여 부식속도 산출 시 온도와 배관 내 환경(용액 및 동적/정적 환경)은 중요한 요인이다. 온도는 이온교환 시 이동성을 변화시키기 때문에 산출되는 부식속도에 영향을 미치고, 동적 환경은 부식산화물이 물리적으로 제거됨에 따라 금속표면이 지속적으로 부식용액에 노출되기 때문에 재료 수명에 영향을 미친다.

따라서 본 연구는 강재에 대하여 해수환경을 모사한 3.5% NaCl 용액과 부식을 가속할 수 있는 CASS (Copper-Accelerated acid salt spray) 용액에서 실시하였으며, 정적 환경에서 부식속도 측정은 타펠 분석으로 부식전류밀도를 산출하여 페러데이식(Faraday's law)에 의해 계산하였다. 동적 환경에서의 부식속도 측정을 ER (Electrical Resistance) 센서와 UT (Ultrasonic) 센서를 이용하였다. 본 연구는 각 센서를 이용하여 산출된 부식속도를 비교하여 실시간으로 상태감시가 가능한 ER 센서의 신뢰성을 평가함으로써 사용자를 위한 기초 자료로 활용하고자한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 정적상태

본 연구는 배관에 사용되는 강재에 대하여 3.5% NaCl 용액과 CASS(Copper-Accelerated acid salt spray) 용액을 사용하였다. Table 1은 배관에 사용된 강재의 화학적 성분을 나타낸 것이다.

Table 2는 CASS 용액의 화학적 성분을 나타낸 것이며, ASTM-B368-97에 의거하여 제조하였다 [4]. 정적 환경하에서 부식용액에 따른 부식전류밀도와 부식전위를 측정하기 위해 BioLogic Science instrument사의 FR/VCP를 이용하여 동전위 분극실험을 실시하였다. 동전위 분극에 사용된 작동전극은 1 cm × 1 cm 크기로 가공하였으며, 구리 리드선을 연결한 후 에폭시 레진으로 마운팅하였다. 마운팅 후 SiC 페이퍼 #2000번까지 단계적으로 연마하였다. 연마된 시편에 이물질 제거하기 위해

**Table 1. Chemical composition of test pipe(cast-iron ss275), wt%**

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.25	0.45	1.40	0.05	0.05	Ba.

**Table 2. Chemical composition of CASS solution, wt%**

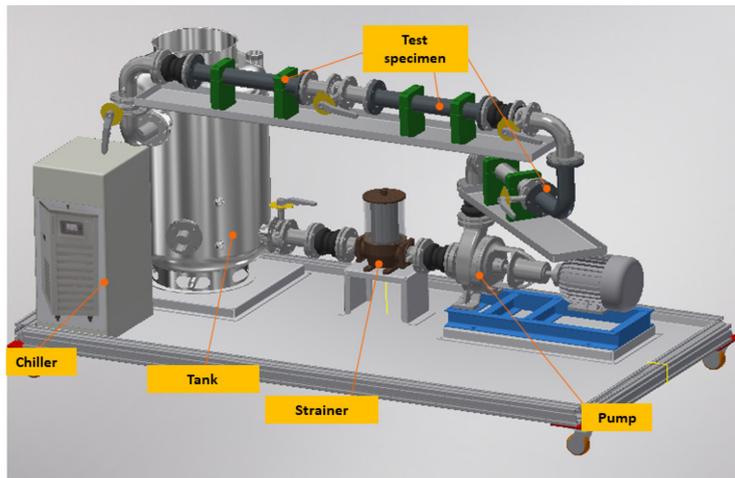
NaCl	3.5 vol. %
Copper chloride	0.025 vol. %
Acetic acid	Adjusting pH 3.1 – 3.3

증류수에서 3분간 초음파 세척을 실시하고 아세톤과 증류수로 세척 후 진공건조 챔버에서 24시간 건조하였다. 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl) 전극을, 대응전극은 백금(Pt) 전극을 사용하였다. 동전위 분극실험은 실험 전 30 °C의 용액에서 1,800초간 침지하여 안정화시킨 후 개로전위(Open circuit potential : OCP)를 기준으로 -0.25 V 부터 0.70 V까지 1.0 mV/s의 주사속도로 실시하였다. 동전위 분극실험 후 용액에 따른 부식경향을 파악하기 위해 시험편을 3D 레이저 현미경을 이용하여 분석하였다.

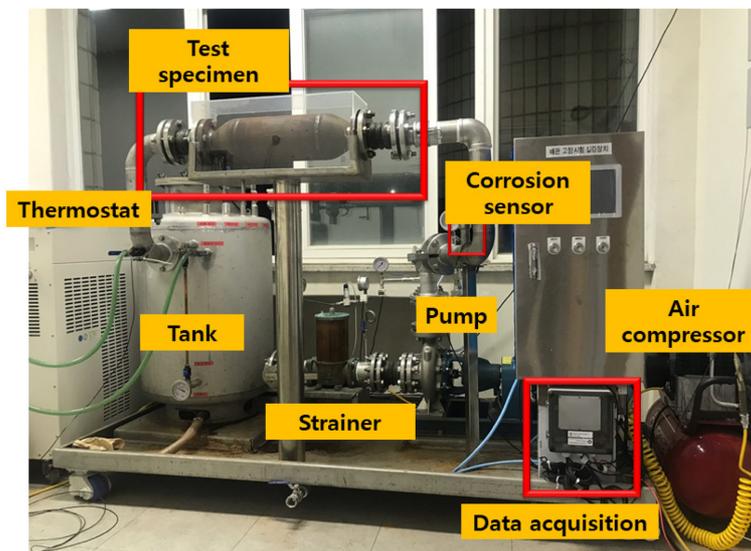
### 2.2 동적 상태

Fig. 1은 선박용 냉각시스템의 해수배관 구축과정의 3D 레이아웃(a)과 실제 구축된 테스트 베드(b)를 나타낸 것이다. Fig. 1a는 곡관 및 직관 배관 시스템을 구축함으로써 실제 선박과 유사하게 설계하였다. 선박 운항 시 선박의 위치 및 기상에 따라 변하는 수온은 칠러를 이용하여 조절하였다. 또한 칠러는 원심펌프 회전시 발생하는 액체의 마찰열과 모터에서 발생하는 마찰열이 펌프 내 해수로 전달되어 수온의 상승을 방지한다. 실제 선박의 펌프는 해수면 하에 있어, 펌프 입구 측에 수두압이 형성되어 양압이 발생되므로 전체적으로 배관 내 압력은 상승하게 된다. 이를 모사하기 위해 공기압축기 탱크에 연결하였으며, 연결부 중간 레귤레이터(Regulator)를 설치하여 일정하게 탱크 내 양압을 유지하였다.

Fig. 2는 부식센서 외관 및 설치 방법(a)과 데이터 수집 장치(b)를 나타낸 것이다. 부식센서는 ER (Electrical Resistance) 타입의 센서로 Probe는 파이프와 동일한 소재로 제작되었으며, 파이프와 수직하게 설치되었다. 또한 센서는 유체의 흐름(동적 환경)에 직접적인 영향을 받을 수 있는 펌프출구 측에 설치하였다. 데이터 수집 장치는 ROS (Robot Operating System)기반의 임베디드 시스템으로 최대 8개의 신호를 30Ks의 속도로 동시에 수집가능하며, 아날로그 센서로 부터의 신호를 디지털 신호로 변환하기 위해 ADC (Analogue Digital Convertor)를 탑재하고 있다. 뿐만 아니라 배관 상태감시 할 수 있



(a) 3D layout



(b) Test bed

**Fig. 1. Major components of test bed** ① The water chiller unit ② Data acquisition system ③ Air compressor ④ Strainer ⑤ Corrosion sensor ⑥ Pump

도록 압력센서, 온도센서, 스트레이너 사이 차압센서 그리고 펌프의 모터 부하 감시 센서를 설치하였다. 본 실험은 폐회로로 구성되어 원심펌프 측에서 온도가 상승된 유체가 되돌아오기 때문에 칠러가 있음에도 불구하고 온도가 변할 수 있다. 따라서 온도센서를 이용해 온도를 실시간으로 기록하였고, 이는 온도가 변하면 활성 용해반응 속도가 달라져 부식속도에 영향을 미치기 때문이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 정적환경에서의 부식거동 평가

Fig. 3은 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액의 30 °C 온도

조건에서 실시한 동전위 분극실험 결과를 나타낸 것이다. 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액에서 부식전위는 각각 -0.695 V와 -0.616 V를 나타냈으며, 부식전류밀도는 각각 0.0253 mA/cm<sup>2</sup>과 1.002 mA/cm<sup>2</sup>를 나타냈다. 동전위 분극 실험결과 Cl<sup>-</sup>의 활성용해반응( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$ )이 활발해지면서 부식전위에서 양분극으로 진행됨에 따라 전류밀도가 지속적으로 상승하는 것이 관찰되었다 [5]. 이는 염소이온에 의해 전도도가 상승되었을 뿐만 아니라 전기화학반응을 촉진시킨 것으로 사료된다. 타겟 분석결과 CASS 용액에서의 부식전류밀도는 3.5% NaCl 용액에 비해 약 40배 높은 값을 나타냈다. 이는 산도가 증가할수록(pH가 낮아질수록) 탄소강의 부식속도가 증가하는 연구결과와 일치한다 [6].

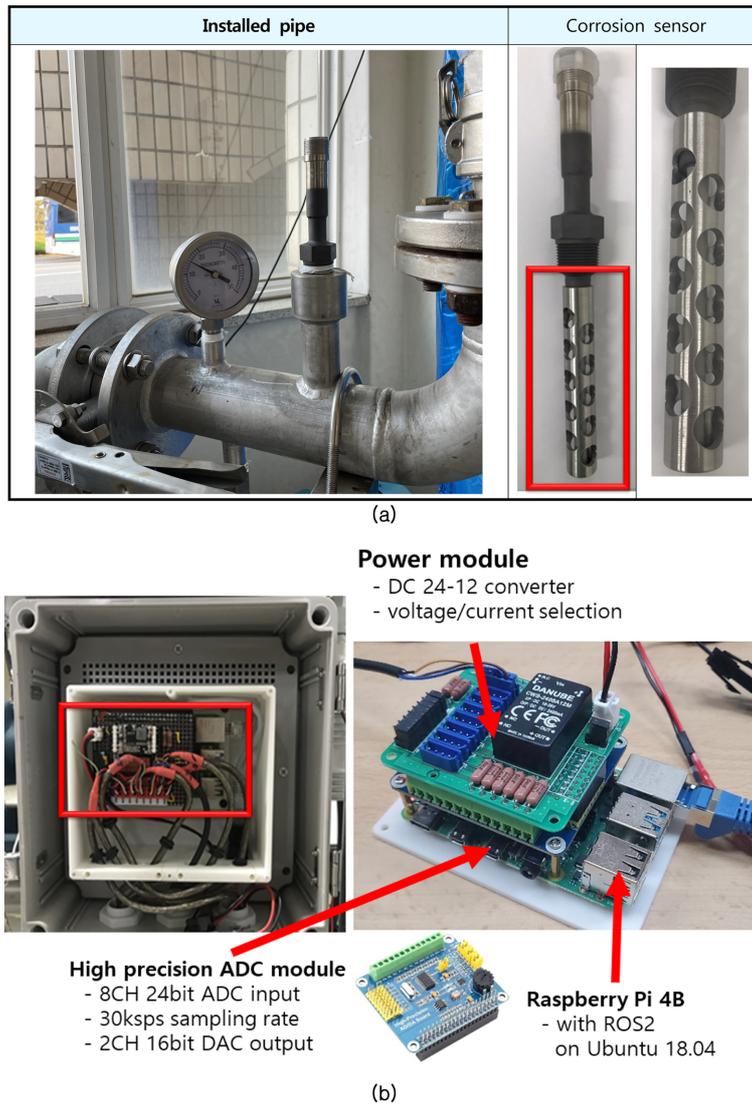


Fig. 2. ER sensor (a) installed on a pipe and data acquisition unit (b)

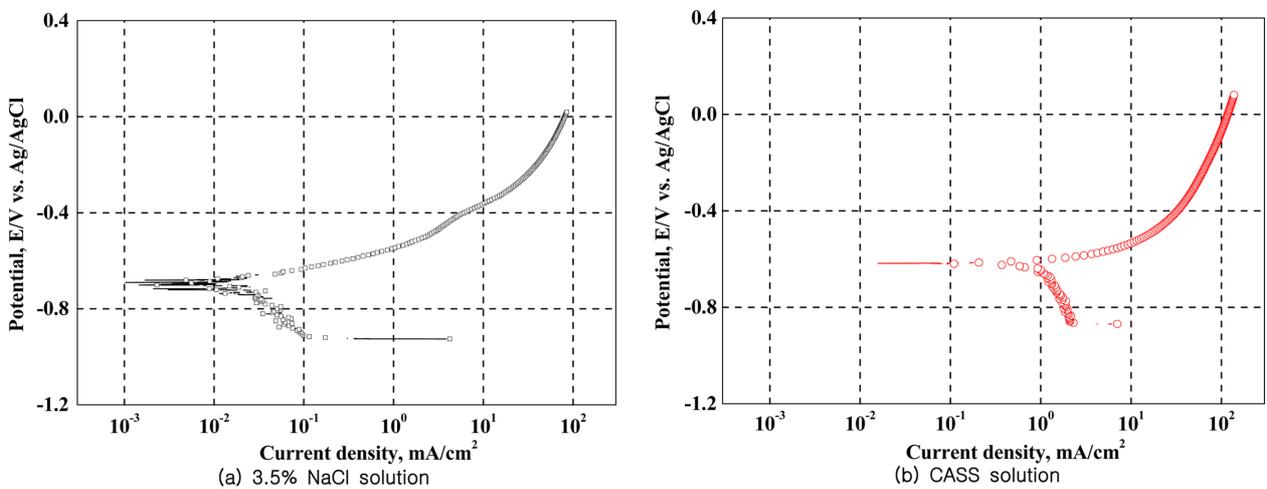


Fig. 3. Potentiodynamic polarization curves for carbon steel at 30 °C in 3.5% NaCl solution and CASS solution

부식전류밀도를 패러데이식(Faraday's law)에 대입하면 전면부식속도를 산출할 수 있다 [7]. 패러데이식에 의거하여 부식속도는 부식전류밀도와 비례관계이기 때문에 두 용액에서 산출된 부식전류밀도를 대입하면 CASS 용액에서 두께 감소량이 3.5% NaCl용액보다 증가할 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 4는 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액에서 동전위 분극 실시 후, 3D 현미경으로 최대손상깊이와 표면의 거칠기를 촬영한 결과이다. 3.5% NaCl 용액과 CASS용액에서의 최대 공식깊이는 각각 12.41  $\mu\text{m}$ , 40.27  $\mu\text{m}$ 로 CASS용액에서 약 3.24배 크게 측정되었다. 염소 이온은 내부 전자 이동을 가속화시켜 국부부식 성장을 촉진하고, 더욱이 CASS 용액의 경우 부식을 가속하는 염화구리와 산성 분위기에서 양극용해반응이 더 활발하게 진행하여 표면 손상깊이가 크게 관찰되었다 [8]. 일반적

으로 철은 구리보다 이온화 경향이 크기 때문에 산화반응이 우세하다. 이에 따라 용액 내 구리이온은 구리 금속(Cu metal) 특성을 갖기 때문에 철과 구리에서 갈바닉 셀(Galvanic cell)이 형성되어 탄소강의 부식반응이 가속화된 것으로 사료된다 [9].

Fig. 5는 활성용해반응에 따라 손상된 표면 거칠기와 깊이 히스토그램을 나타낸 것이다. 표면 거칠기는 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액에서 각각 0.75  $\mu\text{m}$ 와 0.68  $\mu\text{m}$ 으로 유사한 값이 측정되었다. 표면 거칠기는 금속 이온화에 따라 금속 표면에 산과 골이 형성되어 전면적으로 부식된 정도를 나타낸다 [10]. 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액의 전면 부식정도는 비슷한 것으로 사료된다. 깊이 히스토그램은 금속표면에 형성된 깊이(X축)에 대하여 분포(Y축)를 그래프로 나타낸 것이며 [10], 표준편차는 평균 깊이로부터 퍼진 정도를 나타내어 부식 경

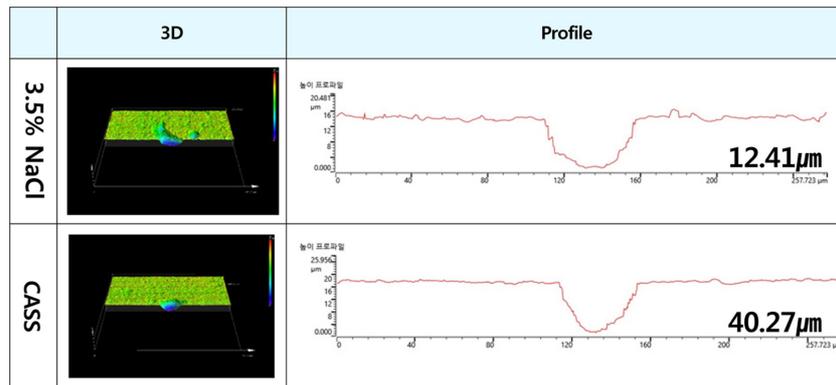


Fig. 4. 3D analysis and maximum damage depth after potentiodynamic polarization experiment for carbon steel in 3.5% NaCl solution and CASS solution

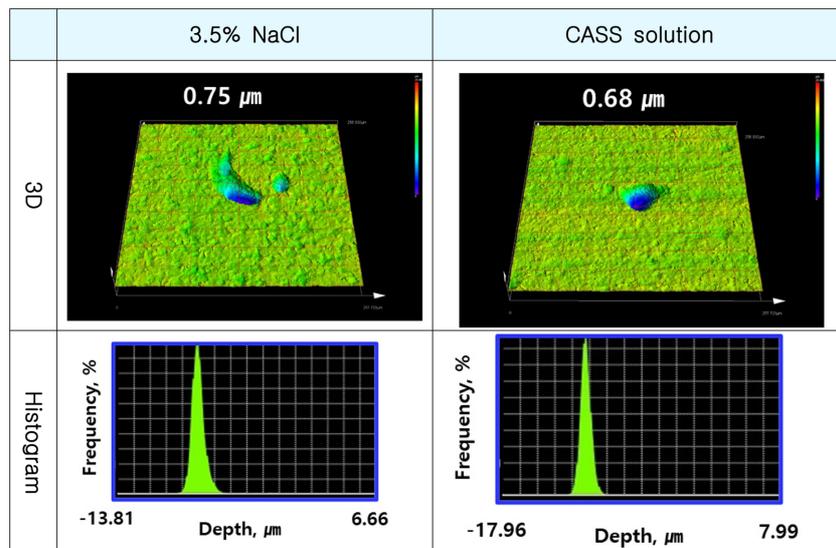


Fig. 5. 3D and depth histogram after potentiodynamic polarization experiment for carbon steel in 3.5% NaCl solution and CASS solution

향을 나타낸다. 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액의 분포도를 비교하여 히스토그램 그래프의 형태가 유사함을 알 수 있다. 따라서 두 용액에 따른 재료의 손상 형태가 유사하기 때문에 두 용액에서 부식속도에 따른 두께 감소 비교의 타당성은 높다고 판단된다.

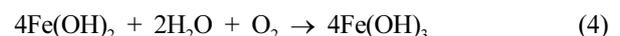
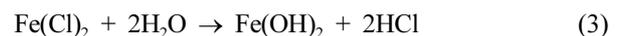
### 3.2 동적환경에서의 부식거동 및 부식속도

Fig. 6은 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액에서 시간(X축)에 따라 ER 센서에서 측정된 두께 감속 값(Y축, Metal loss in mils)을 나타낸 것이다. 3.5% NaCl은 시간 경과에 따라 Metal loss 증가량(기울기)이 초기에 비해 감소하였다. 탄소강의 산화반응으로 부식생성물(4Fe(OH)<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O + O<sub>2</sub> → 4Fe(OH)<sub>3</sub>)이 생성되고 이러한 산화물이 배관 내 표면에 축적된다. 부식생성물은 화학적으로 안정한 상태이며 더 이상 산화반응이 진행하지 않기 때문에 Metal loss는 시간에 따라 속도가 점진적으로 감소하는 현상이 일반적이다. 그러나 13,000 min 후 시간에 따

른 Metal loss의 기울기가 양의 방향으로 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 선박 항로에 따라 적도지방으로 이동(수온 상승)할 때 부식센서의 거동을 파악하기 위한 시나리오로써 칠러를 정지시켜 온도를 인위적으로 상승시킨 것이다. 그래프 내 온도 변화 그래프는 실시간 온도센서를 통해 기록한 것으로 해수배관시스템 내 해수온도의 점진적 상승을 잘 나타낸다.

CASS 용액은 실험 도입부에 선박 운항 시 항로 및 기상에 따라 수온이 변하는 시나리오를 나타낸 후 30 °C로 일정하게 유지시켰다. CASS 용액에서 시간에 따른 Metal loss는 3.5% NaCl보다 매우 빠르게 상승하여 정적환경과 같이 동적환경에서도 부식속도는 확연한 차이가 관찰되었다. 이는 Fe가 Pourbaix diagram에서 pH 3.1 ~ 3.2의 산성분위기에 노출이 되어 이온화된 것으로 판단된다. 또한 구리이온과 염소이온에 의한 부식의 가속화는 구리이온이 철과 갈바니 셀을 형성하여 부식을 촉진시켰으며, 염소이온은 전기음성도가 크기 때문에 금속표면에 강한 전기장을 발생시켜 철의 이온화를 촉진시켰기 때문으로 사료된다 [11]. 이에 따라 CASS용액은 실험시작 후 1000 min에 도달하기 전 Probe 두께인 10 mils (한계치)에 도달하였다.

Fig. 7은 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액에서 동적환경 실험종료 후 시험체를 절단하여 배관 내면 및 부식센서를 사진촬영한 것이다. 두 용액환경에서 배관 내부의 산화물은 모두 관찰되었으며, 3.5% NaCl 용액에서의 산화물이 CASS 용액보다 뚜렷하게 관찰되었다. 3.5% NaCl에서는 부식산화물이 모재와 용액간 장벽(Barrier) 역할을 하여 Fig. 6a에서 시간에 따라 Metal loss의 변화율이 감소된 이유를 뒷받침한다. 3.5% NaCl의 산화물이 CASS 용액의 산화물보다 현저히 큰 값이 측정되었다. 이는 용액 pH에 따른 탄소강의 부식 메커니즘에 의해 설명할 수 있다. 일반적으로 중성의 3.5% NaCl 용액에서의 부식 기구는 4단계로 이루어지며 다음과 같다 [11].



중성 3.5% NaCl 용액에서 부식메커니즘의 결과로 Fe(OH)<sub>3</sub>를 형성하여 헤마타이트(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)나 마그네타이트(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)와 같은 부식생성물로 생성되기 때문에 배관 표면에 누적되었다.

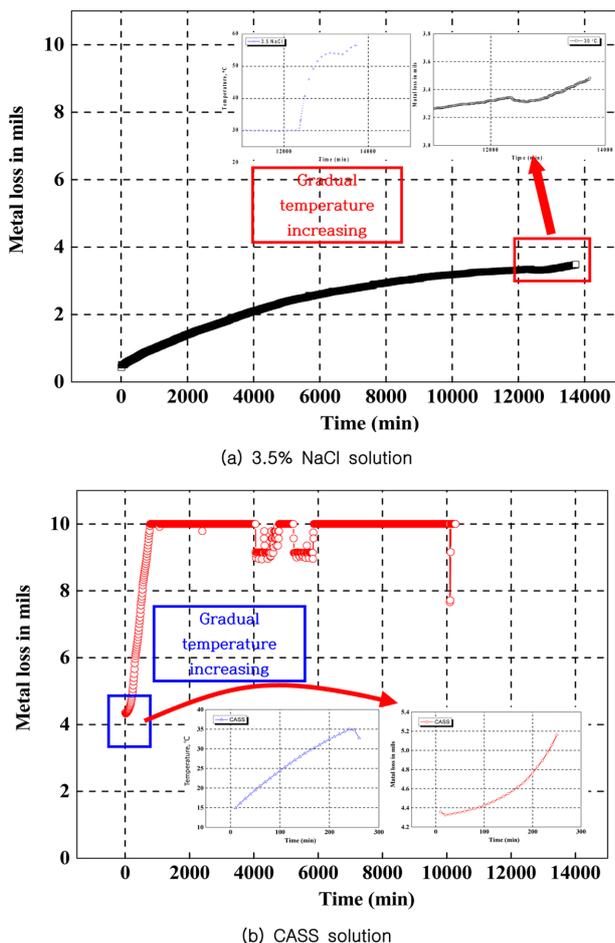
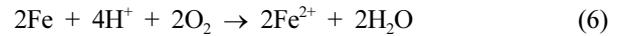


Fig. 6. Metal loss in mils measured by ER sensor for carbon steel in 3.5% NaCl solution and CASS solution

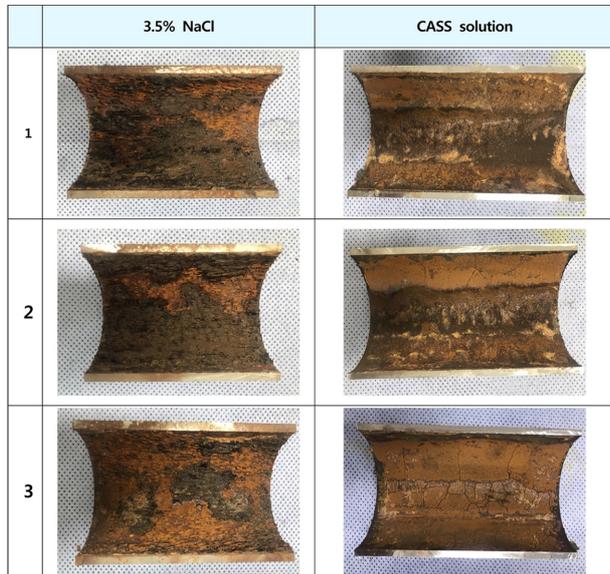
그러나 용존산소가 풍부한 pH 3.1의 산성인 CASS 용액에서의 부식메커니즘은 산소 소비형 부식으로써 2단계로 이루어지며, 다음과 같다 [12].



이와 같이 철의 대부분은 이온화되어 부식생성물을 적게 만든다. 이와 같은 부식 기구로 인해 3.5% NaCl 용액의 부식생성물이 더 두껍게 형성된 것으로 사료된다.

Table 3은 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액에서 동적 실험 후 시험체를 취외하여 부식생성물을 제거한 뒤 UT 센서로 배관 두께를 측정하여 배관 두께 감육량(초기값-측정값)을 나타낸 것이다. 시험체는 총 3개의 영역으로 구분하였으며, 1개의 영역 당 4개의 측정 점을 지정하여 두께를 측정하였다. 전반적으로 감육량은 CASS 용액에서 수행된 시험체에서 더 크게 나타났다. 3.5% NaCl 용액과 CASS용액에서 실험된 파이프 12개의 측정점에 대한 감육량의 평균은 각각 0.068 mm와 1.02 mm로서, CASS 용액에서 실험된 파이프의 평균적인 감육량이 약 15배 높게 계측되었다.

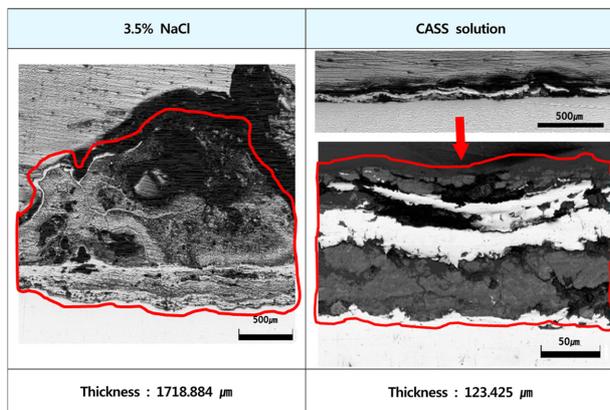
Fig. 8은 Fig. 6에서 온도상승구간에서 시간에 따른 두께 감육 값(Metal loss in mils)을 추출하여, 선형회귀분석을 통해 각각 그래프의 추세선을 그리고 회귀식과 결정계수를 그래프에 표기한 것이다. 3.5% NaCl 용액에서는 시간에 따라 온도를 증가시킨 결과 Metal loss는 선형적으로 증가하였으나, CASS 용액에서의 Metal loss는 비선형적으로 증가하였다. 이러한 결과는 CASS 용액의 경우 온도증가에 따라 Metal loss가 가속화되었기 때문으로 사료된다. 3.5% NaCl에 비해 CASS 용액의 추세선의 기울기는 약 21배 높은 값을 나타냈기 때문에 온도 상승에 따라 영향이 큰 것으로 사료된다 [13]. 3.5% NaCl에서 추세선의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.99081로 1에 가까운 값을 나타내어 온도상승과 Metal loss사이에 상당히 높은 상관도를 갖고 있다 [13]. CASS 용액에서 Metal loss가 온도상승에 따라 비선형적으로 증가된 것은 구리 이온과 염소이온이 온도 상승에 따라 부식이 촉진된 것과 관련이 있는 것으로 판단된다. 염화 이온은 다른 할로젠 이온에 비해 높은 깃스에너지에 갖고 있어 이온화를 촉진시킴과 더불어 높은 방출에너지에 따른 연쇄적인 화학반응이 일어났을 것으로 사료된다 [10]. 이를 바



(a) Inside of pipe



(b) Inside of sensor



(c) Corrosive oxide

Fig. 7. Appearance of corrosion sensor, pipe and corrosion products after experiment for carbon steel in 3.5% NaCl solution and CASS solution

Table 3. Wall thickness measurement by UT sensor for carbon steel in 3.5% NaCl solution and CASS solution (Unit: mm)

	3.5% NaCl				CASS solution			
1	0.04	0.12	0.07	0.21	0.97	1.01	0.95	0.93
2	0.11	0.24	0.15	0.06	1.04	1.09	1.00	1.07
3	0.79	0.17	0.22	0.10	1.03	1.05	0.96	1.10

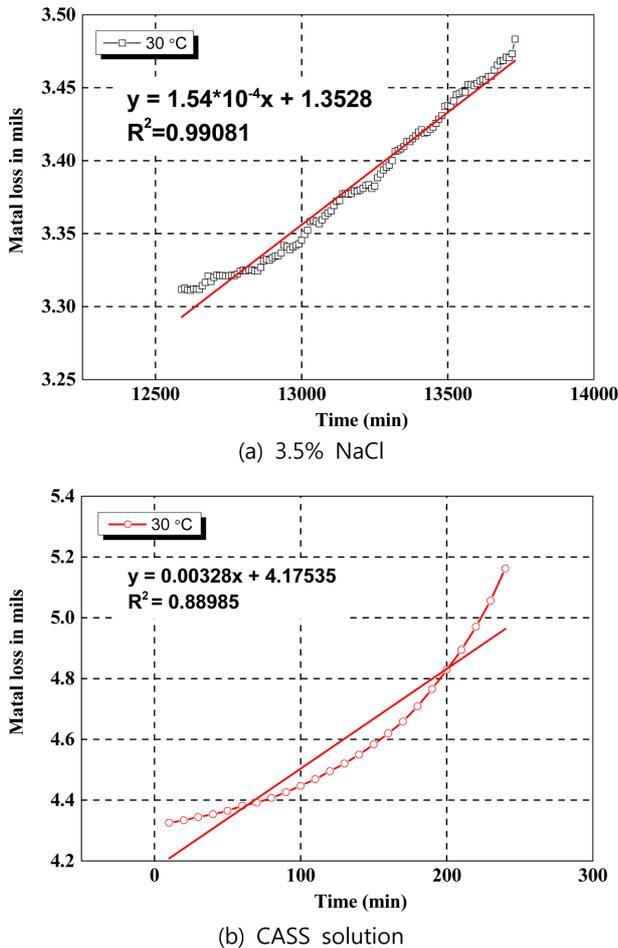


Fig. 8. Linear fitting with increasing temperature for carbon steel in 3.5% NaCl solution and CASS solution

탕으로 부식가속 환경과 온도 변화에 따른 센서의 응답성은 양호함을 알 수 있다.

3.3 정적환경의 부식속도와 동적환경에서의 센서에 따른 부식속도(단위:MPY)

Table 4는 각 측정 방법에 따라 부식속도를 산출한 것이다. 정적환경에서 부식속도는 동전위 분극실험 후 ASTM-G102를 참조하여 부식속도를 산출하였다 [7]. 이는 패러데이법칙을 이용한 것으로 다음과 같다.

$$Corrosion\ rate = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad (7)$$

(EW: Equivalent weight,  $K_1$ : Proportionality constant,  $\rho$ : Density in  $g/cm^3$ )

식 7에 의해 3.5% NaCl과 CASS 용액에서 산출된 부식속도는 각각 12 MPY와 462 MPY이다. CASS 용액의 부식속도가 3.5% NaCl보다 약 39배 높은 값을 나타내었다.

Table 4. Comparison of corrosion rate of carbon steel in 3.5% NaCl solution and CASS solution (Unit: MPY)

	Corrosion sensor	UT	Tafel analysis
3.5% NaCl solution	117	211	12
CASS solution	3806	2055	462

동적 환경에서 UT 센서로 부식속도를 산출하는 과정은 다음과 같다. 실험 전 UT 센서에 의해 측정된 배관 두께와 실험 후 측정된 배관두께를 뺀 뒤 전체 실험시간으로 나누었다. 계산된 부식속도의 단위는 mm/min으로 이를 MPY 단위로 환산하면 3.5% NaCl 용액과 CASS 용액의 부식속도는 각각 211 MPY와 2055 MPY이다. CASS 용액의 부식속도가 3.5% NaCl보다 약 10배 높은 값을 나타내었다.

동적 환경에서 ER 센서로 부식속도를 산출하는 방법은 다음과 같다. 실험 전 Metal loss와 실험 후 Metal loss 값을 뺀 뒤 전체 실험시간으로 나누었다. 계측된 단위는 mils/min이며, 이를 MPY로 환산하였다. 3.5% NaCl과 CASS 용액에 대하여 산출 식은 같으나 적용된 시간은 다르게 하였다. 이는 CASS 용액의 부식성이 강력하여 ER 센서의 계측 한계인 10 mils을 초과하였기 때문에 10 mils에 상응하는 시간을 적용하여 산출하였다. ER 센서 측정방법으로 계산된 3.5% NaCl과 CASS 용액의 부식속도는 각각 117 MPY와 3806 MPY로 산출되었다. CASS 용액의 부식속도가 3.5% NaCl보다 약 32배 높은 값을 나타내었다.

전반적으로 동적환경의 부식속도는 정적환경보다 높은 값을 나타내어 유속은 부식속도에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 직접적으로 부식속도를 측정할 UT 센서와 간접적으로 측정할 ER 센서값에 차이가 발생하였으며, 이는 크게 2가지 이유로 판단된다. 첫째 UT 센서의 측정 단위는 mm고 부식센서의 단위는 mil(0.025 mm)로 매우 작은 단위로 계측한다. 따라서 mm 단위로 측정되는 UT 센서 값은 배관이 곡면이기 때문에 UT 센서 탐촉자 크기, 계측자 숙련도 등에 따라 달라질 가능성이 높다. 둘째 배관시스템 내부용액은 시험체(배관)에 층류와 난류를 형성하며, 부식센서는 설치 방법에 따라 침식 부식의 정도가 다르게 발생한다. 이에 따라 센서 주위에 와류의 정도가 다르게 발생되며 배관내부는 유체역학적으로 속도구배가 발생되어 배관 내벽과 센서 프로브에 대한 유속이 달라진다. 이와 같은 원인에 의해 ER 센서와 UT 센서의 부식속도의 차가 발생한 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

부식가속 환경과 온도 변화에 따라 센서의 응답성은 양호하게 관찰되었다. 또한 두 용액조건 모두 동적환경에서 측정된 부식속도는 정적환경보다 높은 값을 나타내었다. 이를 통해 유속의 영향이 부식속도에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그리고 해수환경을 모사한 3.5% NaCl은 온도 상승에 따라 Metal loss 값이 선형적으로 증가하므로 선박용 해수배관시스템에 적용 가능성은 높다고 판단된다. 마지막으로 각 부식속도측정 방법에 따라 산출된 값은 상이하게 나타났기 때문에 부식 환경, 감시 대상 재료 및 감시방법에 대한 고려가 필요하다.

#### 감사의 글

This work was supported by the ‘Autonomous Ship Technology Development Program (2001-1164, Development of Performance Monitoring and Failure Prediction and Diagnosis Technology for Engine System of Autonomous Ships)’ funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

#### References

- Julio C. Adamowski, Flavio Buiochi, Marcos Tsuzuki, Nicolás Pérez, Claudio S. Camerini and Carlos Patusco, Ultrasonic measurement of micrometric wall-thickness loss due to corrosion inside pipes, *IEEE*, p. 1181 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2013.0479>
- Faisal Durrani, Ryan Wesley, Vijay Srikandarajah, Mahroo Eftekhari and Steve Munn, Predicting Corrosion rate in Chilled HVAC Pipe Network: Coupon vs Linear Polarisation Resistance method, *Engineering Failure Analysis*, **109**, 1 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104261>
- Zheng Liu and Yehuda Kleiner, State-of-the-Art Review of Technologies for Pipe Structural Health Monitoring, *IEEE*, **12**, 1987 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2181161>
- ASTM B368-97, Standard Test Method for Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing (CASS Test), p. 1 (2003).
- J. H. Lee, K. H. Jung, J. C. Park and S. J. Kim, Determination of optimum protection potential for cathodic protection of offshore wind-turbine-tower steel substructure by using potentiostatic method, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, **41**, 230 (2017). Doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.3.230>
- Y. Bai and Q. Bai, *Subsea Engineering Handbook*, 2nd Edition, p. 464, Gulf Professional Publishing (2019). <https://www.elsevier.com/books/subsea-engineering-handbook/bai/978-0-12-812622-6>
- ASTM G102-89, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, p. 1 (2004).
- Yu Zuo, Haitao Wang, Jingmao Zhao and Jinping Xiong, The effects of some anions on metastable pitting of 316L stainless steel, *Corrosion Science*, **44**, 13 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00031-2)
- N. Voevodin, C. Jeffcoate, L. Simon, M. Khobaib and M. Donley, Characterization of pitting corrosion in bare and sol-gel coated aluminum 2024-T3 alloy, *Surface and Coatings Technology*, **140**, 29 (2001). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01000-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01000-3)
- H. K. Hwang and S. J. Kim, Effect of Temperature on Electrochemical Characteristics of Stainless Steel in Green Death Solution Using Cyclic Potentiodynamic Polarization Test, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 266 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.5.266>
- Dooho Choi and Sung-il Seo, Evaluation of Corrosion Behavior of Railway Axle Material (RSA1) in Seawater, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **16**, 5039 (2015). Doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.8.5039>
- M. J. Kim, D. J. Kim and H. P. Kim, Manufacture of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) electrode and its electrochemical properties, *Corrosion Science and Technology*, **14**, 19 (2015). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2015.14.1.19>
- J. H. Lee, J. C. Park, M. S. Han, S. K. Jang and S. J. Kim, Influence of Current Density Application Time on the Corrosion Damage of Offshore Wind Steel Substructure in Galvanostatic Corrosion Experiment, *Journal of The Korean Institute of Surface Engineering*, **49**, 431 (2016). Doi: <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07047285>