

선박용 고장력강의 부식거동에 미치는 침출수의 pH 및 염소이온 농도의 영향

황현규¹ · 김대문² · 공길영³ · 김성종^{4,†}

¹한국과학기술원, 원자력 및 양자공학과, 대전광역시 유성구 대학로 291

²국립목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과, 전라남도 목포시 해양대학로 91

³국립한국해양대학교 항해학부, 부산광역시 영도구 태종로 727

⁴국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91

(2025년 6월 26일 접수, 2025년 7월 23일 수정, 2025년 7월 23일 채택)

Effects of pH and Chloride Ion Concentration of Leachate on Corrosion Behavior of High-Strength Steel for Marine Ships

Hyun Kyu Hwang¹, Dae Mun Kim², Gil Young Kong³, and Seong Jong Kim^{4,†}

¹Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Republic of Korea

²Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

³Division of Navigation Convergence, Korea Maritime and Ocean University, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, 49112, Republic of Korea

⁴Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

(Received June 26, 2025; Revised July 23, 2025; Accepted July 23, 2025)

This paper investigated the effects of pH and chloride ion (Cl^-) concentration, both with and without flow, on the corrosion behavior of AH32 high-strength steel used in ships. Under dynamic conditions, leachate 2, which had a pH of 3.8, exhibited the highest corrosion current density, likely due to the reduction reaction of hydrogen ions (H^+). Conversely, leachate 3, with a high Cl^- concentration, demonstrated the highest current density in the high-potential region, attributed to Cl^- accelerating the destruction of the oxide film and promoting localized corrosion. Under static conditions, the diffusion of oxygen (O_2) and Cl^- was suppressed, leading to a significant decrease in the corrosion potentials of leachate 1 and leachate 3. However, since leachate 2 was dominated by the reduction reaction of H^+ , the effect of convection was minimal, resulting in the smallest decrease in potential. Consequently, it was determined that pH had a greater impact on the corrosion rate of high-strength steel than Cl^- concentration. Additionally, the effects of pH, Cl^- , and O_2 on the cathode and anode reactions of high-strength steel varied depending on the flow conditions.

Keywords: High strength steel, Corrosion, Potentiodynamic, pH, Chloride

1. 서론

고장력강은 우수한 기계적 및 전기화학적 특성으로 인해 선박 및 해양 구조물의 주요 구조재로 널리 사용되고 있다 [1]. 또한, 해수환경에서 스테인리스강과 달리 안정적인 산화피막이 형성되기 어렵다. 특히, 선박 및 해양 구조물은 해수에 함유된 염소이온(Cl^-)에 의한

부식이 주요 손상요인으로 작용한다 [2]. Cl^- 는 금속의 산화피막을 파괴시켜 부식손상을 가속화시키는 대표적인 부식성 이온이다. 따라서 많은 연구자들은 Cl^- 에 대한 선박 및 해양 구조물용 고장력강의 부식거동을 연구하였다 [3-5].

그러나 최근 육상 또는 해상으로부터 방출되는 다양한 배기가스에 의한 환경오염이 문제 시 되고 있다 [6,7]. 특히, 선박으로부터 배출되는 이산화황(SO_2)과 이산화질소(NO_2)는 대기 중에서 각각 황산(H_2SO_4)과 질산

[†]Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

황현규: 박사후 연구원, 김대문: 대학원생, 공길영: 교수, 김성종: 교수

(HNO₃)으로 변환된 후 강수와 함께 해수로 유입된다. 이는 해수의 pH를 점진적으로 저하시켜 산성화시키는 주요 요인이다 [8]. 따라서 Cl⁻뿐만 아니라 황산 및 질산에 의한 pH 저하가 고장력강의 부식거동에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다 [9].

Y. Wang *et al.*에 따르면 고장력강은 염기성 수용액에서 상대적으로 두꺼운 산화피막이 형성되어 산소확산이 지배적이며, 산성 수용액에서는 Cl⁻의 확산에 의한 부식 손상이 나타났다 [10]. 또한, J. Yuan *et al.*에 따르면, 고장력강의 부식거동에 pH와 Cl⁻의 영향이 큰 것으로 나타났다. 특히, 두 요인의 상호작용 시 국부부식에 의한 손상이 가속화되었다 [11].

따라서 침출수의 pH 및 Cl⁻는 고장력강의 부식손상에 영향을 미친다. 그러나 이러한 연구는 정적 조건에서만 수행되어 왔다. 해양 환경은 해수의 유동이 지속적으로 발생하여 대류에 의한 전기화학적 반응이 강하게 발생한다. 특히, pH와 Cl⁻와 같은 부식성 요인은 대류에 의한 이동으로 인해 고장력강의 전기화학적 반응에 미치는 영향이 다를 것으로 사료된다 [12].

따라서 본 연구에서는 선박용 고장력강의 부식거동에 미치는 침출수의 pH 및 Cl⁻ 농도의 영향과 유동 유무에 따른 전기화학적 특성을 연구하였다.

2. 실험방법

2.1. 시험편 준비

본 연구에 사용된 시험편은 선박용 AH 32 고장력강이며, 화학적 조성은 Table 1에 나타났다. 시험편은 10 mm × 10 mm의 노출면적으로 가공 후 도선과 예폭시 레진으로 마운팅하였다. 이후 SiC 연마지로 #600까지 표면 연마하였으며, 아세톤과 증류수로 각각 3분 동안 초음파 세척하였으며, 12시간 동안 진공 건조하였다.

Table 1. Chemical composition of AH32 high-strength steel

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.14	0.20	1.09	0.018	0.006	Bal.

Table 2. Chemical composition of leachate solution

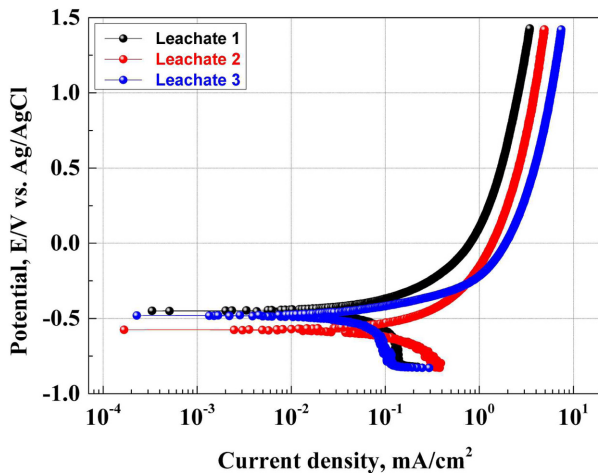
No.	Solution	Chemical composition (mg/kg)				pH
		F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	
1	Leachate 1	0.3	1	55	106	7.4
2	Leachate 2	0.6	8	39	264	3.8
3	Leachate 3	0.5	38	131	693	5.0

2.2. 전기화학적 실험

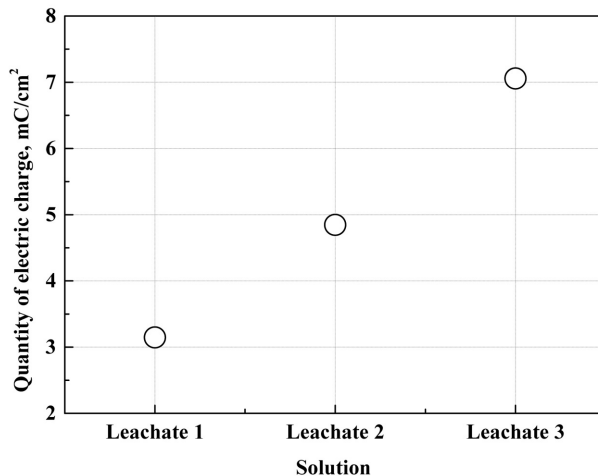
전기화학적 실험은 3전극 셀로 구성하였으며, 기준전극과 대극은 각각 은/염화은 전극(sat. by 3 M KCl)과 20 mm × 20 mm 크기의 백금망을 사용하였다. 사용된 수용액은 침출수이며 Ion chromatography (Thermo scientific, Integrion)를 이용하여 이온농도 측정 후 Table 2에 나타났다. 동적 조건의 동전위분극실험은 용량 500 mL, 온도 30 °C 및 교반속도 80 rpm의 수용액에서 30분 안정화 후 개로전위 기준 -0.25 V에서 2.0 V까지 1.0 mV/s의 주사속도로 수행하였다. 한편, 정적 조건에서는 수용액 온도 25 °C에서 30분 안정화 후 개로전위 기준 -0.25 V에서 0.25 V까지 1.0 mV/s의 주사속도로 수행하였다. 이후 동전위분극곡선을 이용하여 타펠외삽법으로 부식전위와 부식전류밀도를 산출하였다. 실험 후 3D 공초점 레이저 현미경과 주사전자현미경으로 손상된 시험편을 관찰 및 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 AH32 고장력강의 동적 조건에서 동전위분극곡선 및 누적전하량 산출 결과이다. Fig. 1a에서 보는 바와 같이, 모든 동전위분극곡선에서 개로전위를 기준으로 양분극 시 전류밀도는 증가하였으며, 부동태 특성은 관찰되지 않았다. -0.4 V의 전위에서 전류밀도 크기는 침출수 2에서 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 침출수 3과 침출수 1 순서로 측정되었다. 그러나 전위 증가에 따라 전류밀도의 크기는 침출수 3에서 가장 크게 측정되었으며, 그 다음으로 침출수 2와 침출수 1 순서로 나타났다. 이는 침출수에 함유된 부식성 이온의 농도 차이에 기인한다 [13]. 침출수 1은 pH 7.4로 중성을 나타냈으며, 염소이온(Cl⁻)농도는 가장 낮았다. 반면, 침출수 2와 침출수 3은 각각 pH 3.8 및 5.0으로 산성을 나타냈으며, 침출수 3의 Cl⁻ 농도는 가장 높았다. 즉, pH가 낮을수록 저전위에서 높은 전류밀도를 나타냈으며, 전위 증가에 따라 Cl⁻에 의한 전기화학적 반응이 더욱 활발해졌다. 일반적으로, pH가 낮을수록 수소이온(H⁺)의 환원반응이 우세하여 산화반응도 활발해진다 [14]. pH에 따른 H⁺의 환원반응 전위는 네른스트 방정식으로



(a) Potentiodynamic polarization curve



(b) Quantity of electric charge

Fig. 1. Potentiodynamic polarization curve in various leachate solution at 30 °C and 80 rpm

산출할 수 있으며, 그 equation (1)은 다음과 같다.

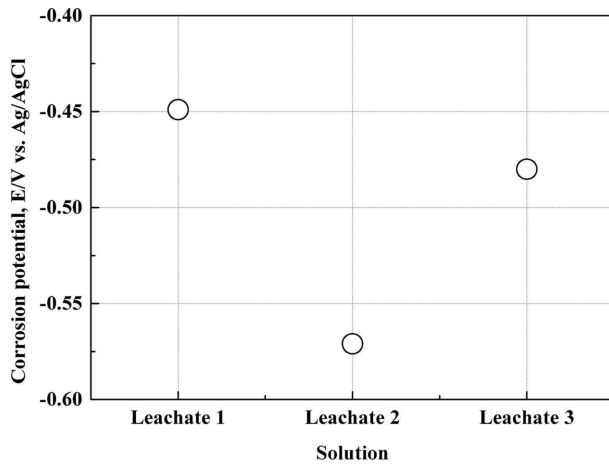
$$\begin{aligned} E &= E^o - \frac{RT}{nF} \ln[H^+]^2 \\ &= -\frac{2.303RT}{nF} \log[H^+]^2 \\ &= -\frac{2.303RT}{F} \cdot pH \end{aligned} \quad (1)$$

E = Hydrogen reduction potential (vs. SHE, V)
 E^o = Standard hydrogen electrode potential (0 V)
 R = Gas constant = 8.314 J/mol
 T = Absolute temperature = 273.15 K
 F = Faraday constant = 96485 C/mol
 n = Number of electrons (Hydrogen gas = 2)

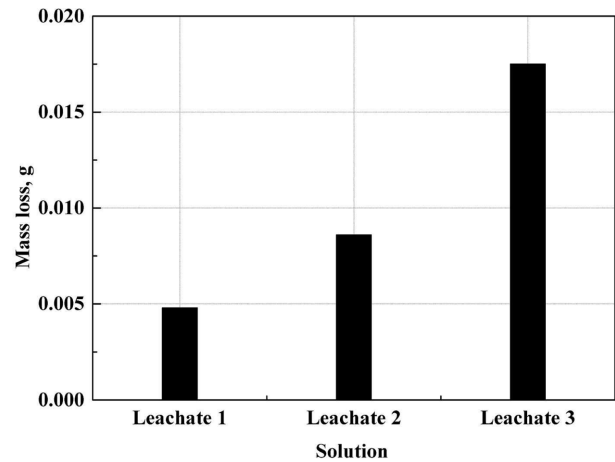
본 연구에서 사용된 기준전극은 은/염화은 전극(sat. by 3 M KCl)이며, 표준수소전극보다 약 0.210 V 높다. 결과적으로, pH 7.4, 5.0, 3.8에 상응하는 H^+ 의 환원반응 전위는 각각 은/염화은 전극 기준 -0.645 V, -0.504 V, -0.433 V이다. 침출수 1과 침출수 3은 음분극 영역만이 H^+ 의 환원반응 전위 이하에 있다. 그러나 침출수 2에서 H^+ 의 환원반응 전위인 -0.434 V 아래에서 양분극 영역이 나타났다. 이는 침출수 1과 침출수 3의 양분극 시 H^+ 의 환원반응이 일어나지 않아 전류밀도가 상대적으로 낮게 측정되었으며, 침출수 2에서 양분극 시 H^+ 의 환원반응이 함께 발생하여 금속의 산화반응이 활발하여 전류밀도가 증가한 것으로 사료된다. 그러나 -0.3 V 이상의 전위에서 침출수 3의 전류밀도가 가장 높게 측정되었으며, 이는 침출수의 Cl^- 농도차에 기인한 것으로 사료된다. 일반적으로 고장력강은 표면에 Fe_2O_3 산화피막을 형성시켜 부식성 이온과의 전기화학적 반응을 지연 및 억제한다 [15,16]. 그러나 Cl^- 는 표면에 존재하는 산화피막의 구조적 결함에 우선적으로 흡착하여 산화피막 파괴 및 공식 손상을 야기시킨다 [17,18]. 이는 고장력강의 전기화학적 반응을 증가시키는 요인이다.

Fig. 1b에서 보는 바와 같이, 침출수 변수에 따른 동전위분극곡선 중 양극분극곡선에 해당하는 누적전하량 산출 결과, 침출수 3이 가장 높은 값을 나타냈으며, 침출수 1이 가장 낮은 값으로 산출되었다. 동전위분극실험 중 양극분극영역에 해당하는 누적전하량은 누적된 부식량을 대표하며, 이를 통해 침출수 3의 부식손상이 가장 클 것으로 사료된다.

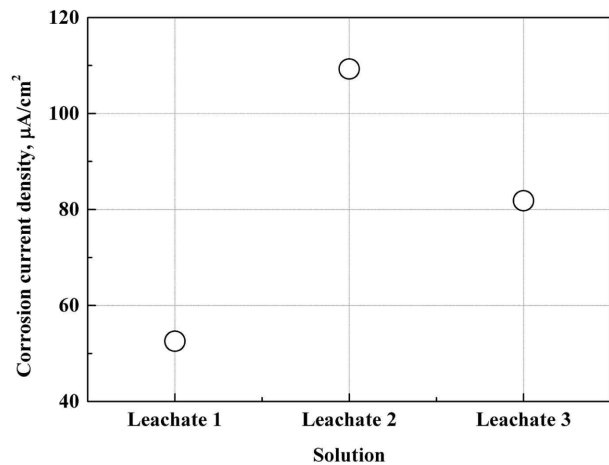
Fig. 2는 동전위분극곡선을 이용하여 타펠외삽법으로 부식전위 및 부식전류밀도 산출 결과이다. 부식전위의 경우, 침출수 1에서 가장 높게 산출되었으며, 그 다음으로 침출수 3과 침출수 2 순서로 나타났다. 부식전위 그라프에 표시한 바와 같이, 침출수 1과 침출수 3의 부식전위는 H^+ 의 환원반응 전위보다 높게 나타났다. 그러나 침출수 2는 보다 낮게 나타나 양분극 시 H^+ 의 환원반응에 의한 전기화학적 반응이 높은 것으로 사료된다. 부식전류밀도의 경우, 침출수 2에서 가장 높게 산출되었으며, 그 다음으로 침출수 3과 침출수 1 순서로 나타났다. 침출수 2에서 부식전류밀도가 가장 높게 나타난 것은 pH에 의한 영향으로 사료된다 [19,20]. 즉, 침출수 2의 pH에서 부식전위는 H^+ 의 환원반응 전위 이하이며, 수소이온의 환원이 매우 활발하다. 그래서 고장력강의 산화반응이 함께 활발해져 부식전류밀도가 높은 것으로 사료된다. 또한, pH 4.5 이하에서는 Fe가 산화물 또는 수산화물로 존재하지 못하고 Fe^{2+} 의 이온상태로 용해된다 [21,22]. 이는 산화피막을 형성하지 못해 고장력강의 용해속도를 증가시키는 요인이다. 반면, 침출수 1과 침



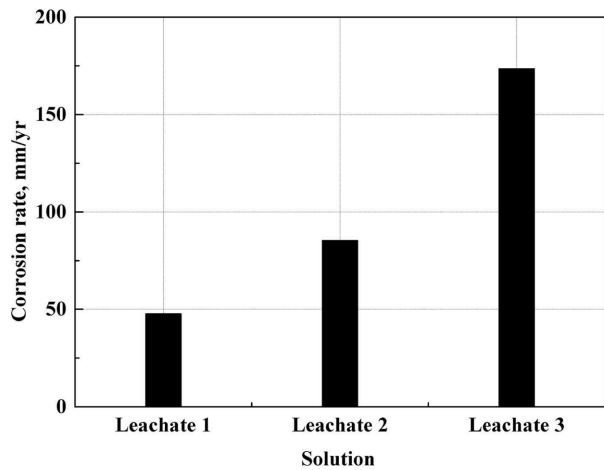
(a) Corrosion potential



(a) Mass loss



(b) Corrosion current density



(b) Corrosion rate

Fig. 2. Corrosion potential and corrosion current density in various leachate solution at 30 °C and 80 rpm

Fig. 3. Mass loss and corrosion rate in various leachate solution at 30 °C and 80 rpm

출수 3은 상대적으로 낮은 부식전류밀도가 산출되었다. 특히, 침출수 1은 pH가 가장 높고 Cl⁻의 함량이 가장 낮아 안정적인 산화피막 형성이 가능하다. 이는 표면의 반응면적을 감소시켜 전류밀도가 낮게 나타났다.

Fig. 3은 동적 조건에서 동전위분극실험 후 손상된 시험편의 무게감소량 측정 및 부식속도산출 결과이다. 본 연구의 동전위분극실험은 전위를 -0.25 V에서 2.0 V까지 주사하여 시험편 표면의 전기화학적 반응을 누적시켰다. 따라서 무게감소량은 전위 인가 전 과정의 누적 손상을 나타낸다. 무게감소량의 경우, 침출수 1에서 가장 낮게 측정되었으며, 그 다음으로 침출수 2와 침출수 3 순서로 나타났다. 부식속도는 무게감소량을 이용하였으며, 그 equation (2)은 다음과 같다 [23].

$$\text{Corrosion rate} = \frac{KW}{ADT} \quad (2)$$

K = A constant - K(mm/yr) = 8.76×10^4

T = Time of exposure, to the nearest 0.01 h

A = Area, cm², to the nearest 0.01 cm²

W = Mass loss, g, to the nearest 0.001 g

D = Density, g/cm³

무게감소량과 산출된 부식속도는 부식전류밀도와 상이한 경향을 나타냈으며, 동전위분극곡선 중 양극분극선에 해당하는 누적전하량 크기와 동일한 순서를 나타냈다. 이는 동전위분극실험 중 고장력강의 부식손상이 고전위에서 지배적으로 발생했음을 의미한다. 특히, 고장력강은 스테인리스강과 비교하여 우수한 산화피막

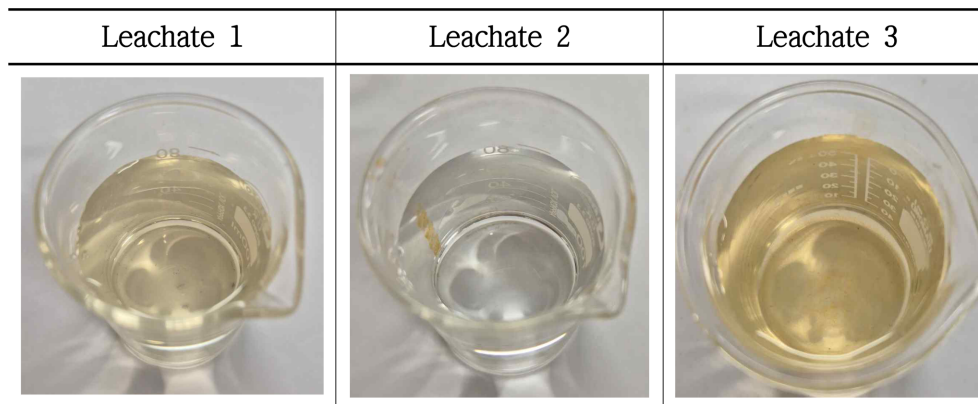


Fig. 4. Observation of experimental solution after potentiodynamic polarization experiments in various leachate solution at 30 °C and 80 rpm

을 형성하지 못해 고전위에서 부동태 특성을 나타내지 못하고 용해반응에 의한 부식손상이 지배적이다.

Fig. 4는 동적 조건에서 동전위분극실험 후 침출수 관찰 결과이다. 침출수 2를 제외한 나머지 침출수는 실험 후 적갈색으로 변하였다. 일반적으로 고장력강은 산화 시 Fe가 이온화되어 Fe^{2+} 와 전자를 형성시킨다. Fe^{2+} 는 수용액의 pH에 따라 다른 형태로 존재한다 [24,25]. pH가 낮은 산성환경에서 높은 H^+ 농도로 인해 산화물(Fe_2O_3 , Fe_3O_4) 또는 수산화물($Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$)과 같은 고체 생성물 형태로 존재하지 못하고 쉽게 용해된다 [26]. 그러나 pH가 중성에 가깝거나 약알칼리성인 경우, Fe^{2+} 는 산소와 결합하여 표면에 산화물(Fe_2O_3 또는 Fe_3O_4)을 형성한다 [27,28]. Fe_2O_3 는 헤마타이트(Hematite)로 적갈색을 띠는 것으로 알려져 있으며, Fe_3O_4 는 마그네타이트(Magnetite)로 검정색 또는 짙은 회색을 띠나 수화될 경우 적갈색을 나타내기도 한다. 또한, 수용액에 다량 존재하는 OH와 결합하여 $Fe(OH)_2$ (수산화물)을 형성하여 침전된다. 특히, 산소가 충분히 공급된 경우 산소의 환원반응으로 Fe^{2+} 는 Fe^{3+} 로 한번 더 산화된다. 이후 Fe^{3+} 는 OH와 결합하여 $Fe(OH)_3$ 를 지배적으로 형성시킨다. $Fe(OH)_2$ 는 청록색을 띠나, $Fe(OH)_3$ 는 적갈색을 띠며 침전되지 않고 콜로이드(Colloid) 형태로 수용액에 부유 상태로 남아 수용액을 적갈색으로 보이게 하는 것으로 알려져 있다 [29,30]. 본 연구에서는 침출수를 대기 중에 노출시켜 동전위분극실험을 수행하였으며, 산소가 충분히 공급 및 포화되는 환경이다. 결과적으로 중성에 가까운 수용액인 침출수 1과 침출수 3에서 적갈색으로 나타난 침전물은 자성을 나타내는 Fe_3O_4 가 아니며, Fe_2O_3 인 것으로 여겨진다. 또한, 침전물 이외 수용액 자체가 적갈색으로 관찰되는 것은 Fe^{3+} 및 $Fe(OH)_3$ 인 것으로 사료된다 [31,32]. 반면, 침출수 2와 같이 낮은 pH에서는 고체 산화물 또는 수산화물을 형성 및 유지하지 못하고

Fe^{2+} 로 용해되어 존재하기 때문에 침출수의 색 변화가 나타나지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 5는 동적 조건에서 동전위분극실험 후 3D 공초점 레이저 현미경으로 손상된 시험편을 관찰 및 분석한 결과이다. 프로파일 분석을 통한 부식깊이 및 표면거칠기 측정 결과, 침출수 1에서 부식깊이와 표면거칠기는 각각 5.442 μm 및 0.538 μm 로 가장 작은 값을 나타냈다. 그러나 침출수 2와 침출수 3에서는 각각 7.641 μm , 1.192 μm 및 10.592 μm , 1.518 μm 로 부식깊이와 표면거칠기는 증가하였다. 이러한 경향은 동전위분극곡선 중앙극분극곡선에 해당하는 누적전하량 크기와 무게감소량은 동일한 순서를 나타냈다. 특히, 침출수 3에서 관찰된 부식손상은 너비가 좁고 깊이가 깊은 공식손상이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 침출수 3에 다량 함유된 Cl^- 에 기인한 국부부식으로 사료된다.

Fig. 6은 동적 조건에서 동전위분극실험 후 주사전자 현미경으로 손상된 시험편 관찰 결과이다. 모든 침출수 조건에서 고장력강 시험편 표면의 부식손상이 관찰되었다. 침출수 1과 침출수 2의 손상된 시험편 표면에서 부식손상과 함께 연마흔적도 뚜렷하게 관찰되었다. 반면, 침출수 3에서 표면 전반적으로 부식손상이 나타났으며, 연마흔적은 미세하게 관찰되었다. 표면에서 관찰된 연마흔적은 부식손상이 상대적으로 작게 나타났기 때문이다.

Fig. 7은 정적 조건에서 고장력강 시험편의 동전위분극실험 결과이다. 실험 결과, 모든 침출수에서 개로전위를 기준으로 전위 증가 시 전류밀도는 증가하였으며, 부동태 특성은 관찰되지 않았다. 전위 -0.4 V에 해당하는 전류밀도의 크기는 침출수 2에서 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 침출수 1과 침출수 3 순서로 측정되었다. 이는 동적 조건과는 상이한 결과를 나타냈다. 즉, pH가 가장 낮은 침출수 2는 여전히 높은 전류밀도를 나타냈으나, Cl^- 함량이 가장 높은 침출수 3의 전류밀도는 가장 낮

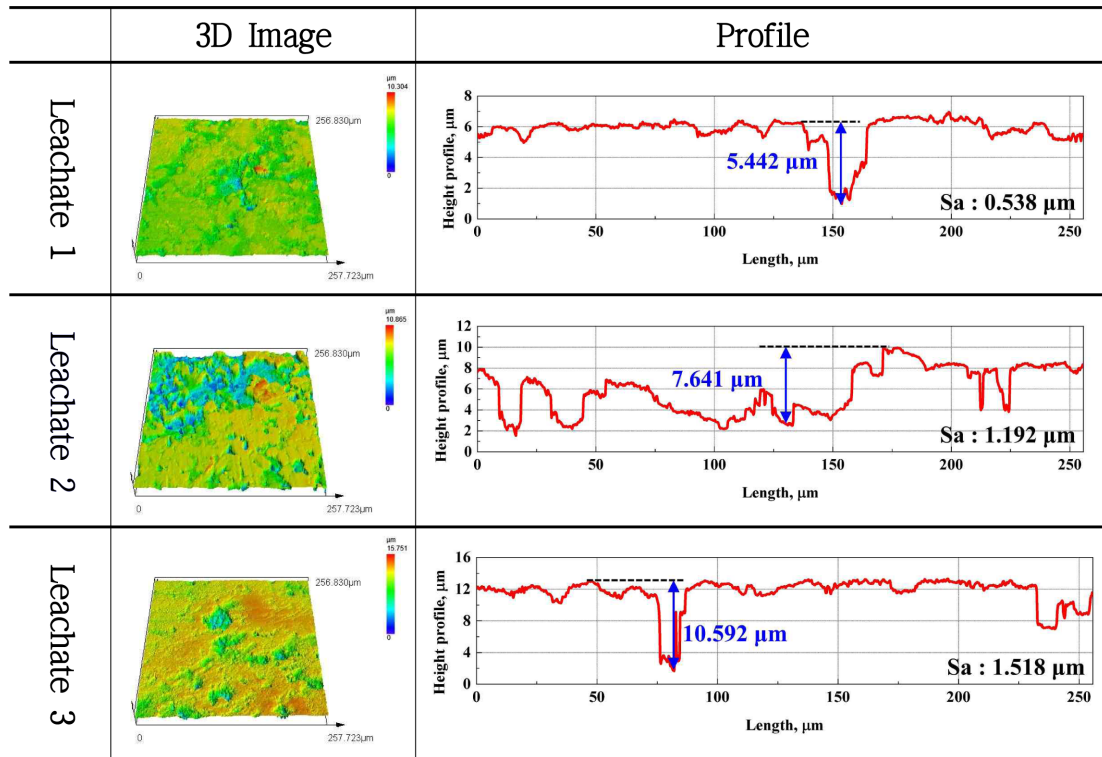


Fig. 5. 3D surface images and corresponding profile analyses of the samples exposed to various leachate solutions at 30 °C and 80 rpm

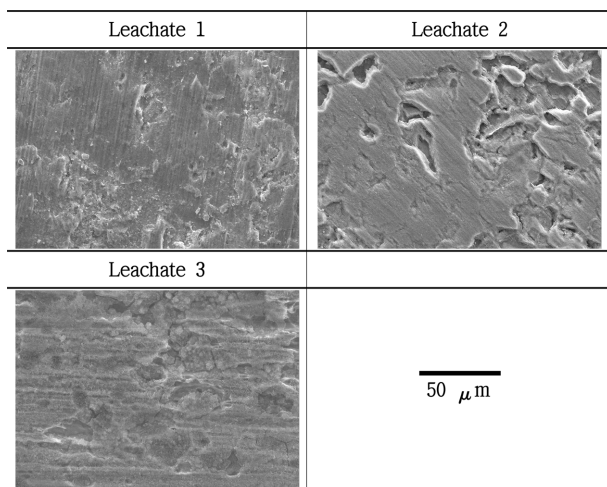


Fig. 6. SEM images using secondary electron (SE) mode of damaged specimen in various leachate solution at 30 °C and 80 rpm

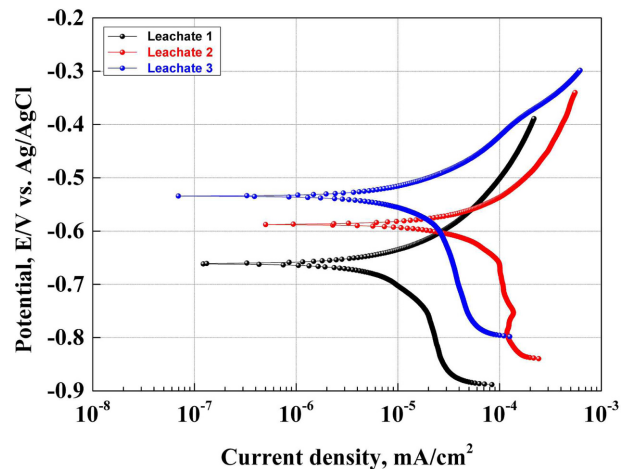


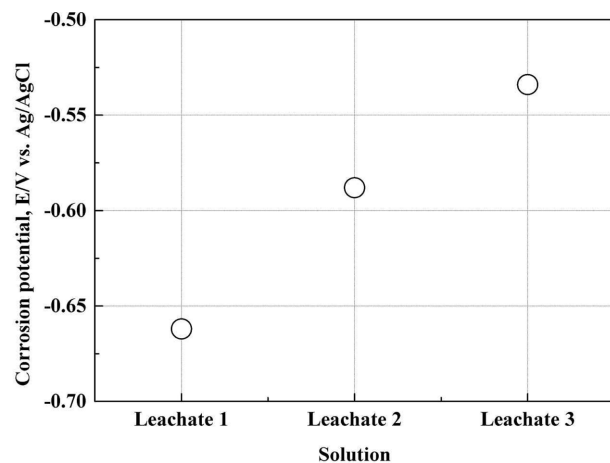
Fig. 7. Potentiodynamic polarization curves of the specimen in various leachate solutions at 25 °C under static conditions (0 rpm)

게 측정되었다. 이는 동적 및 정적 조건에서 H^+ 와 Cl^- 의 물질전달 차이에 기인하는 것으로 사료된다 [33-35]. 동적 조건에서는 대류와 확산이 동시에 발생하지만, 정적 조건에서는 확산만 가능하다 [36,37]. H^+ 는 정적 조건에서 농도차에 따른 확산이 빠르고 쉽게 반응한다. 특히,

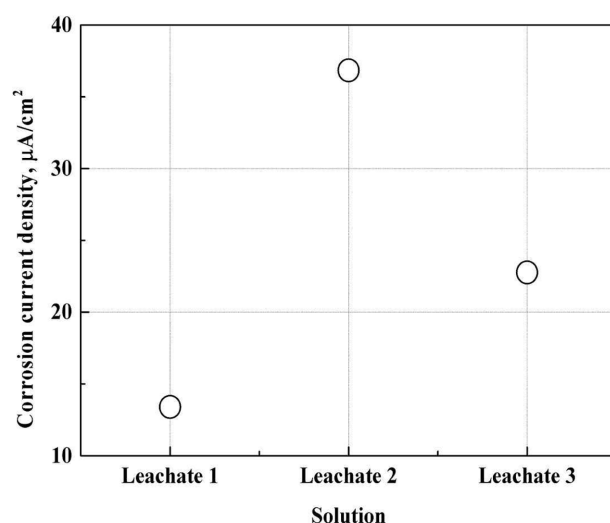
H^+ 의 환원반응은 대류의 영향이 작다. 그래서 정적 조건에서도 동적 조건과 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 Cl^- 는 대류에 의한 공급이 중요하고 정적 조건에서 확산이 느리기 때문에 국부 농도(금속 표면 또는 전기화학적 반응 영역에서의 농도)를 유지하기 어렵다 [38]. 이

러한 현상은 고장력강의 산화반응을 억제하기 때문에 -0.4 V의 전위에서 침출수 3의 전류밀도가 가장 낮게 측정된 것으로 사료된다.

Fig. 8은 정적 조건의 동전위분극곡선을 이용하여 타펠외삽법으로 부식전위 및 부식전류밀도 산출 결과이다. Fig. 8a에서 보는 바와 같이, 침출수 1에서 가장 낮은 부식전위가 산출되었으며, 그 다음으로 침출수 2와 침출수 3 순서로 나타났다. 침출수 2의 경우, 동적 및 정적 조건에서 부식전위는 각각 -571 mV 및 -588 mV로 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 침출수 2의 높은 H^+ 함량에 기인한다. 즉, 동적 및 정적 조건에 상관없이 H^+ 의 환원반응이 지배적이기 때문에 부식전위는 유사한 것으로 사료된다. 그러나 침출수 1(-449 mV → -662 mV)



(a) Corrosion potential



(b) Corrosion current density

Fig. 8. Comparison of corrosion potential (a) and corrosion current density (b) of the specimen in various leachate solutions at 25 °C under static conditions (0 rpm)

과 침출수 3(-480 mV → -534 mV)은 차이를 나타냈다. 특히, 침출수 1의 부식전위는 현저히 감소하였다. 이는 중성의 pH에서 H^+ 의 환원반응보다 산소(O_2)의 환원에 민감하여 O_2 의 환원반응이 지배적이다. 특히, N. Sato에 따르면 정적 조건에서 O_2 환원의 제한은 부식전위를 현저히 저하시키는 것으로 나타났다 [39]. 일반적으로, 금속의 산화피막이 처음 형성 시 수산화물(Hydroxide) 형태로 물 분자를 포함한 다공성 구조를 가진다. 그러나 이러한 수산화물은 산소와의 반응에 의해 탈수(Dehydration)과정을 거쳐 결정구조에서 물이 사라지고 부피가 감소하면서 구조는 더욱 조밀해진다. 이렇게 형성된 산화피막은 전기화학적으로 더욱 안정한 결정구조이다 [40,41]. 또한, Fig 8b에서 보는 바와 같이, 부식전류밀도는 침출수 1이 가장 낮았으며, 그 다음으로 침출수 3과 침출수 2 순서로 산출되어 동적 조건과 동일한 경향을 나타냈다. 동적 조건과 비교하여 정적 조건에서 침출수 1, 침출수 2 및 침출수 3의 부식전류밀도는 각각 74.49 %, 66.29 % 및 72.17 %의 감소율을 나타냈다. 침출수 2의 감소율이 가장 작은 것은 동적 및 정적 조건에서 전기화학적 반응 차이가 크지 않다는 것을 의미한다. 반면, 침출수 1과 침출수 2는 상대적으로 높은 감소율을 나타냈으며, 이는 동적 조건에서 대류에 의한 O_2 및 Cl^- 의 확산이 전기화학적 반응에 큰 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 침출수의 pH 및 Cl^- 농도가 AH32 고장력강의 부식거동에 미치는 영향을 연구하였다.

동적 조건에서 동전위분극실험 결과, 저전위에서는 pH가 가장 낮은 침출수 2가 가장 높은 전류밀도를 나타냈으며, 고전위에서는 Cl^- 농도가 높은 침출수 3의 전류밀도가 가장 높게 측정되었다. 이는 H^+ 의 환원반응과 Cl^- 에 의한 산화피막 파괴 및 부식손상 가속화에 기인한다.

부식전위는 침출수 1 > 침출수 3 > 침출수 2 순서로 나타났으며, 부식전류밀도는 침출수 2 > 침출수 3 > 침출수 1 순서로 산출되었다. 특히, 침출수 2는 H^+ 의 환원반응 전위보다 낮은 부식전위를 나타내어 전기화학적 반응이 가장 활발한 것으로 나타났다. 또한, 무게감소량은 침출수 3 > 침출수 2 > 침출수 1 순서로 측정되었으며, 이는 고전위에서 Cl^- 에 의한 활발한 용해반응에 의한 부식손상에 기인한다.

실험 후 침출수 관찰 결과, 침출수 1과 침출수 3에서는 황갈색이 관찰되었으며, 이는 Fe가 산화물 또는 수산화물이 안정적으로 침전되어 나타난 것으로 사료된다. 반면, 침출수 2는 Fe^{2+} 상태로 용해되어 침전물은 관찰

되지 않았다.

정적 조건에서는 대류가 억제되어 Cl⁻의 확산이 제한되었으며, 이에 따라 -0.4 V의 전위에서 침출수 3은 가장 낮은 전류밀도를 나타냈다. 그러나 H⁺는 정적 조건에서 확산만으로도 전기화학적 반응이 활발하게 진행되어 침출수 2는 동적 조건과 유사한 반응성을 유지하였다. 또한, 중성의 pH를 나타내는 침출수 1은 O₂ 환원반응에 의존하기 때문에 O₂ 확산이 제한된 정적 조건에서 부식전위는 현저히 감소하였다.

References

1. H. E. D. H. Seleem, A. M. Rashad, and B. A. El-Sabbagh, Durability and strength evaluation of high-performance concrete in marine structures, *Construction and Building Materials*, **24**, 878 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.013>
2. H. Cho, Y. R. Yoo, and Y. S. Kim, Improvement of Chloride Induced Stress Corrosion Cracking Resistance of Welded 304L Stainless Steel by Ultrasonic Shot Peening, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 266 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2024.23.4.266>
3. J. Alcántara, B. Chico, I. Díaz, D. de la Fuente, and M. Morcillo, Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel, *Corrosion Science*, **97**, 74 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.015>
4. R. Qian, Q. Li, C. Fu, Y. Zhang, Y. Wang, and X. Jin, Atmospheric chloride-induced corrosion of steel-reinforced concrete beam exposed to real marine-environment for 7 years, *Ocean Engineering*, **286**, 115675 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115675>
5. P. Li and M. Du, Effect of chloride ion content on pitting corrosion of dispersion-strengthened-high-strength steel, *Corrosion Communications*, **7**, 23 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.005>
6. S. C. Doney, N. Mahowald, I. Lima, R. A. Feely, F. T. Mackenzie, J.-F. Lamarque, and P. J. Rasch Impact of anthropogenic atmospheric nitrogen and sulfur deposition on ocean acidification and the inorganic carbon system, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 14580 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0702218104>
7. E. Ytreberg, S. Åström, and E. Fridell, Valuating environmental impacts from ship emissions – The marine perspective, *Journal of Environmental Management*, **282**, 111958, (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111958>
8. D. Guo, Y. Wang, Y. Zhang, J. Duan, F. Guan, and B. Hou, Effects of marine eutrophication environment on microbial corrosion: A review, *Marine Pollution Bulletin*, **205**, 116637 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116637>
9. Y. Wang, G. Cheng, W. Wu, Q. Qiao, Y. Li, and X. Li, Effect of pH and chloride on the micro-mechanism of pitting corrosion for high strength pipeline steel in aerated NaCl solutions, *Applied Surface Science*, **349**, 746 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.053>
10. Richard, Glory, Wisdom Ebiye Sawyer, and Avez Shari-pov, Environmental Impacts of Air Pollution, *Sustainable Strategies for Air Pollution Mitigation: The Handbook of Environmental Chemistry*, **133**, 47 (2024). Doi: https://doi.org/10.1007/698_2024_1114
11. J. Yuan, P. Li, H. Zhang, S. Yin, and M. Xu, Electrochemical Characteristics and Corrosion Mechanisms of High-Strength Corrosion-Resistant Steel Reinforcement under Simulated Service Conditions, *Metals (Basel)*, **14**, 876, (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/met14080876>
12. H. Krawiec, V. Vignal, and R. Akid, Numerical modelling of the electrochemical behaviour of 316L stainless steel based upon static and dynamic experimental microcapillary-based techniques, *Electrochimica Acta*, **53**, 5252 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.02.063>
13. L. Freire, M. J. Carnezim, M. G. S. Ferreira, and M. F. Montemor, The electrochemical behaviour of stainless steel AISI 304 in alkaline solutions with different pH in the presence of chlorides, *Electrochimica Acta*, **56**, 5280 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.02.094>
14. A. Govind Rajan and E. A. Carter, Microkinetic model for pH- And potential-dependent oxygen evolution during water splitting on Fe-doped β -NiOOH, *Energy Environmental Science*, **13**, 4962 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1039/d0ee02292f>
15. W. Xu, K. Daub, X. Zhang, J. J. Noel, D. W. Shoesmith, and J. C. Wren, Oxide formation and conversion on carbon steel in mildly basic solutions, *Electrochimica Acta*, **54**, 5727 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.05.020>
16. H. Didouh, M. Sadou, R. K. Suleiman, and M. H. Meliani, Effect of Combining Moringa oleifera and Datura stramonium Extracts as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel, *Corrosion Science and Technology*, **24**, 63, (2025). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2025.24.2.63>
17. W. Xu, K. Daub, X. Zhang, J. J. Noel, D. W. Shoesmith, and J. C. Wren, Oxide formation and conversion on carbon steel in mildly basic solutions, *Electrochimica Acta*,

- 54, 5727 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.05.020>
18. Y. Song, G. Jiang, Y. Chen, P. Zhao, and Y. Tian, Effects of chloride ions on corrosion of ductile iron and carbon steel in soil environments, *Scientific Reports*, **7**, 6865 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07245-1>
19. M. Curioni and F. Scenini, The Mechanism of Hydrogen Evolution during Anodic Polarization of Aluminium, *Electrochimica Acta*, **180**, 712 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.08.076>
20. X. L. Xiong, Q. J. Zhou, J. X. Li, A. A. Volinsky, and Y. J. Su, Cathodic over-potential and hydrogen partial pressure coupling in hydrogen evolution reaction of marine steel under hydrostatic pressure, *Electrochimica Acta*, **247**, 1019 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.06.063>
21. Y. B. Hu, C. F. Dong, M. Sun, K. Xiao, P. Zhong, and X. G. Li, Effects of solution pH and Cl⁻ on electrochemical behaviour of an Aermet100 ultra-high strength steel in acidic environments, *Corrosion Science*, **53**, 4159 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.024>
22. I. Betova, M. Bojinov, T. Laitinen, K. Mäkelä, P. Pohjanne, and T. Saario, The transpassive dissolution mechanism of highly alloyed stainless steels II. Effect of pH and solution anion on the kinetics, *Corrosion Science*, **44**, 2699 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00074-4)
23. ASTM G102-23(2023), Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA (2023). <https://www.astm.org>
24. A. Šutka, S. Lagzdina, T. Käämbre, R. Pärna, V. Kisand, J. Kleperis, M. Maiorov, A. Kidas, I. Kuusik, D. Jakovlevs, Study of the structural phase transformation of iron oxide nanoparticles from an Fe²⁺ ion source by precipitation under various synthesis parameters and temperatures, *Materials Chemistry and Physics*, **149**, 473 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.10.048>
25. B. Morgan and O. Lahav, The effect of pH on the kinetics of spontaneous Fe(II) oxidation by O₂ in aqueous solution - basic principles and a simple heuristic description, *Chemosphere*, **68**, 2080 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.02.015>
26. M. Hove, R. P. van Hille, and A. E. Lewis, Mechanisms of formation of iron precipitates from ferrous solutions at high and low pH, *Chemical Engineering Science*, **63**, 1626 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.11.016>
27. K. Xiao, Z. Li, J. Song, Z. Bai, W. Xue, J. Wu, C. Dong, Effect of Concentrations of Fe²⁺ and Fe³⁺ on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in Cl⁻ and SO₄²⁻ Aqueous Environments, *Metals and Materials International*, **27**, 2623 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00590-y>
28. S. Krehula and S. Musić, Influence of ruthenium ions on the precipitation of α-FeOOH, α-Fe₂O₃ and Fe₃O₄ in highly alkaline media, *Journal of Alloys and Compounds*, **416**, 284 (2006). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.09.016>
29. J. Sun, S. Chen, J. Wang, and Y. Nie, Simultaneous Fe(OH)₃ formation and silicon adsorption removal from reverse osmosis brine wastewater, *Chemical Engineering Research and Design*, **188**, 964 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.042>
30. V. M. Petruševski, M. Monković, and V. Ivanovski, Laser Pointers – A Tool For Better Lecture Experiments, *Journal of Turkish Science Education*, **3**, 97 (2006). <https://www.tused.org/index.php/tused/article/view/461>
31. C. Sato, N. Esumi, T. Ban, and A. Shioi, Moving blue band caused by cooperation of diffusion and phase separation, *Journal of Colloid Interface Science*, **314**, 329 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.05.038>
32. Y. Deng, Formation of iron(III) hydroxides from homogeneous solutions, *Water Research*, **31**, 1347 (1997). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00388-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00388-0)
33. L. Zeng, G. A. Zhang, and X. P. Guo, Hydrodynamic Effect on the Inhibition for the Flow Accelerated Corrosion of an Elbow, *Corrosion Science and Technology*, **16**, 23 (2017). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2017.16.1.23>
34. J. A. Yáñez-Varela, A. Alonzo-García, I. González-Neria, V. Mendoza-Escamilla, G. Rivadeneira-Romero, and S. A. Martínez-Delgadillo, Experimental and numerical evaluation of the performance of the electrochemical reactor operated with static and dynamic electrodes in the reduction of hexavalent chromium, *Chemical Engineering Journal*, **390**, 124575 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124575>
35. L. Liu, Y. Xu, Y. Zhu, X. Wang and Y. Huang, The roles of fluid hydrodynamics, mass transfer, rust layer and macro-cell current on flow accelerated corrosion of carbon steel in oxygen containing electrolyte, *Journal of the Electrochemical Society*, **167**, 141510 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abc6c8>
36. V. Esquivel-peña, F. A. Godínez, and R. Montoya, Corrosion Modeling of Aluminum Alloys : A Brief Review,

- ChemElectroChem*, **11**, e202300712 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1002/celec.202300712>
37. Z. Zhou, B. Liao, and X. Guo, Numerical simulation of the thermal diffusion behaviours of corrosive media in static and laminar heat transfer environments, *International Journal of Heat Mass Transfer*, **204**, 123861 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123861>
38. Q. L. Zhao and Y. Z. Zhang, Concentration Distribution of Chloride Ion under the Influence of the Convection-Diffusion Coupling, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2017**, 2076986 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1155/2017/2076986>
39. N. Sato, An overview on the passivity of metals, *Corrosion Science*, **31**, 1 (1990). Doi: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(90\)90086-K](https://doi.org/10.1016/0010-938X(90)90086-K)
40. L. Freire, X. R. Nóvoa, M. F. Montemor, and M. J. Carmezim, Study of passive films formed on mild steel in alkaline media by the application of anodic potentials, *Materials Chemistry and Physics*, **114**, 962 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.11.012>
41. R. Natarajan, N. Palaniswamy, M. Natesan, and V. S. Muralidharan, XPS Analysis of Passive Film on Stainless Steel, *The Open Corrosion Journal*, **2**, 114 (2009). Doi: <https://doi.org/10.2174/1876503300902010114>