

# 해수 환경에서 Al5083-H321 알루미늄 합금의 침식부식 손상에 미치는 유속의 영향과 손상 메커니즘

김영복<sup>1</sup> · 김성종<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>목포해양대학교 기관시스템공학과 대학원, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

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

(2020년 4월 21일 접수, 2020년 4월 28일 수정, 2020년 4월 28일 채택)

## Effect of Flow Rate on Erosion Corrosion Damage and Damage Mechanism of Al5083-H321 Aluminum Alloy in Seawater Environment

Young-Bok Kim<sup>1</sup> and Seong-Jong Kim<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Division of Marine Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, Korea

<sup>2</sup>Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, Korea

(Received April 21, 2020; Revised April 28, 2020; Accepted April 28, 2020)

In this study, erosion tests and erosion-corrosion tests of Al5083-H321 aluminum alloy were conducted at various flow rates in seawater. The erosion tests were conducted at a flow rate of 0 to 20 m/s, and erosion-corrosion tests were performed by potentiodynamic polarization method at the same flow rate. Characteristic evaluation after the erosion test was conducted by surface analysis. Characteristic evaluation after the erosion-corrosion test was performed by Tafel extrapolation and surface analysis. The results of the surface analysis after the erosion test showed that surface damage tended to increase as the flow rate increased. In particular, intermetallic particles were separated due to the breakdown of the oxide film at 10 m/s or more. In the erosion-corrosion test, the corrosion current density increased as the flow rate increased. Additionally, the surface analysis showed that surface damage occurred in a vortex shape and the width of the surface damage tended to increase as the flow rate increased. Moreover, damage at 0 m/s, proceeded in a depth direction due to the growth of pitting corrosion, and the damaged area tended to increase due to acceleration of the intermetallic particle loss by the fluid impact.

**Keywords:** Aluminum alloy, Erosion corrosion, Flow rate, Potentiodynamic polarization test, Seawater

### 1. 서론

Al-Mg 합금 기지의 5000계열 알루미늄 합금은 적당한 강도와 우수한 내식성으로 다양한 해양 환경용 재료로 사용되고 있다. 그러나 5000계열 알루미늄 합금을 선체 재료로 적용 시 강전해질의 해양 환경에 장기간 사용하면 국부적인 부식 손상으로 선체 내구성을 저하시키기 때문에 주기적인 도장작업으로 합금과 전해질을 차단하여 선체 부식을 억제

하고 있다. 이러한 부식 방지의 노력에도 불구하고 고속으로 운항하는 선박의 경우, 유체 흐름과 압력의 급격한 변화로 인한 도장 파괴의 침식손상이 발생할 수 있다 [1-4]. 이에 유속 하의 해양환경에서 알루미늄 합금의 침식부식 특성에 대한 다양한 연구가 진행 중이다. GEORGE A. 등 [5]은 해수 내 3 ~ 18 m/s의 유속에서 Al-Mg 합금 기지의 Al5456-H117 알루미늄 합금을 침식부식 특성을 연구하였다. 그 결과, 유속이 증가함에 따라 부식속도는 증가하였으며, 약 9 m/s에서 산화피막이 손상되기 시작하였다. 그리고 O. ERFAN 등 [6]은 AA6066 알루미늄 합금을 1 ~ 2 m/s의 유속에서 3.5 wt% NaCl용액과 20 wt%의 모래입

<sup>†</sup>Corresponding author: ks@mmu.ac.kr

김영복: 박사과정, 김성종: 교수

자가 포함된 3.5 wt% NaCl용액으로 침식부식 거동을 연구한 결과, 모래입자가 포함된 NaCl용액은 NaCl용액 대비 무게 손실량이 높게 나타났으며, 충격 각이 커질수록 무게 손실량은 감소하였다. 또한 Park 등 [7]은 해수에서 양극산화된 Al5083-H321 알루미늄 합금을 0.2 ~ 1 m/s의 유속에서 전기화학적 연구를 수행하여, +1.0 V<sub>SCE</sub>의 정전위 실험에서는 유속이 없는 조건에서 공식 손상이 크게 나타났으며, 유속 조건에서 유속변화로 인해 공식 손상이 감소하는 경향을 나타냈다. 그리고 타겟 분석 결과, 유속이 증가하면서 부식전류밀도도 점진적으로 증가하였다. 최근 Kim 등 [8]은 해수 내 Al-Mg 합금 기지의 5000계열 (Al5052-O) 과 Al-Mg-Si 합금 기지의 6000계열 (Al6061-T6) 알루미늄 합금에 대한 5 ~ 20 m/s의 유속에서 침식부식 특성을 연구한 결과, 두 재료 모두 정적인 조건에서 공식 손상이 발생하였으며, 유속 증가에 따라 부식전류밀도와 표면 손상 크기도 점진적으로 증가하였다. 그리고 6000계열 알루미늄 합금이 5000계열 알루미늄 합금 대비 유속 하에서 침식부식에 대한 저항성이 상대적으로 우수하게 나타났다.

상기와 같이 유속 하 해양 환경에서 알루미늄 합금은 물리적인 침식과 화학적인 부식의 복합적인 영향이 크게 나타났다. 특히 고속 운항이 가능한 알루미늄 합금제 선박의 경우 선체 재료에 대한 침식부식 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구는 다양한 유속에서 Al5083-H321에 대해 침식과 침식부식의 특성과 그 손상 메커니즘을 분석 및 규명하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 사용된 Al5083-H321의 화학적 조성은 Table 1에 나타났다. 시험편 가공은 2 cm × 2 cm으로 절단 후 sand paper # 2000번까지 연마하였고, 이후 아세톤과 증류수로 세척하고 24시간 건조하였다. 시험편의 반응 면적은 자체 제작한 홀더를 이용하여 1 cm<sup>2</sup>만 노출시켰다.

알루미늄 합금의 침식 특성을 평가하기 위해서 Fig. 1의 침식실험 장비를 이용하여 유속별 침식 특성을 상호 비교하였다. 침식 실험 장비의 작동원리는 공기압을 이용하여 탱크 내부 압력을 상승시켜 해수가 노즐을 통해 분사되어 시험편에 일정한 유속을 가한 후 다시 회수펌프에 의해 하부 탱크로 이송된다. 이러한 모든 동작은 유속조절기 및 타이머로 제어된다. 유속 조건은 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s이며 25분 동안 침식실험을 실시하였다. 시험편의 충격 각(impact angle)은 90°, 노즐 직경은 1.6 mm이며 노즐과 시험편 사이의 거리는 5 mm로 설정하였다. 유체는 25 °C의 천연해수(pH 7.9)를 사용하였으며, 그 성분은

Table 1 Chemical compositions of Al5083-H321 (wt%)

Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Al
4.48	0.0005	0.358	0.542	0.0652	0.0133	Bal.

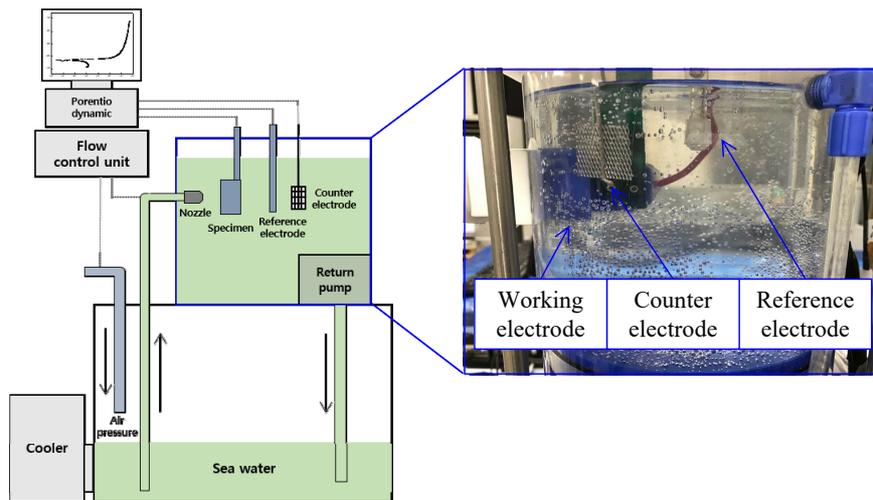


Fig. 1 Schematic diagram of erosion corrosion experiment apparatus.

Table 2 Chemical compositions and properties of seawater

Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>			
2,605	17,388	10,414	361	1,215	402	7.9	10.2	49.7

Table 2에 나타내었다. 재현성 확보를 위해, 모든 실험은 3회 이상 반복 실험을 수행하였다.

알루미늄 합금의 침식부식 특성을 평가하기 위해서 자체 제작한 침식장비와 분극실험 장치(GAMRY instrument, US/PCI4/750)로 다양한 유속에서 동전위 분극실험(potentiodynamic polarization test)을 실시하였다. 전기화학적 셀의 구성은 작동전극으로 알루미늄 합금 시험편, 기준전극으로 은/염화은(SSC, Silver/Silver Chloride) 전극, 그리고 대용전극으로 백금(Pt)을 사용하였다. 그리고 침식실험과 동일한 유속 조건에서 600초간 안정화시킨 뒤 개방회로전위(open circuit potential, OCP) 기준  $-0.25$  V에서  $+1.55$  V까지  $2$  mV/s의 주사속도로 분극시켜 전위 변화에 따른 전류밀도 값을 측정하였다. 부식전위와 부식전류밀도 값은 타펠 외삽법(Tafel extrapolation method)으로 산출하였으며, 주사전자현미경(SEM)으로 시험편 표면을 미시적으로 관찰하였으며, 3D 현미경으로 최대 손상깊이를 측정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 침식 특성

Fig. 2는 다양한 유속에서 Al5083-H321 시험편의 침식실험 후 표면을 분석한 결과이다. 육안 관찰 결과(photo),  $5$  m/s의 경우 침식손상은 관찰되지 않았다. 반면  $10 \sim 20$  m/s의 경우 표면에 하얀 반점 형태의 국부적인 침식 손상이 관찰되었으며, 유속이 상승하면서 국부적인 침식 손상이 증가하였다. 이러한 침식 손상을 세밀히 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM)으로 표면을 분석하였다.  $5$  m/s의 경우 나타나지 않았던 표면 손상이 관찰되었다. 이는 기존 연구 결과와도 유사한 결과로 5000계열 알루미늄 합금은  $2.5 \sim 3.5$  m/s 유속의 해수 환경에서 침식에 대한 저항성을 가지고 있으므로  $5$  m/s에서 표면 손상은 침식에 의한 손상으로 판단된다 [9].  $10 \sim 20$  m/s의 경우 침식부식 손상이 관찰되었으며, 유속이 상승하면서 침식 손상부가 넓어지는 경향이 나타났다. 그리고 손상부 내 알루미늄 기지는 화살표로 표시한 바와 같이 금속간 입자가 탈리된 형상이 나타났다. 이는 산화피막이 파괴되면서 알루미늄 기지가 드러나게 되며, 유체 충격으로 인한 금속간 입자가 탈락된 것으로 판단된다. 그리고 이러한 유속 환경에서 산화피막의 파괴는 일정 유속(약  $9$  m/s) 이상 해수 환경에서 5000계열 알루미늄 합금은 산화피막 파괴가 발생한다는 보고와 유사한 결과이다 [5].

결과적으로 모든 유속 조건에서 유체 충격으로 인한 미세한 침식 손상이 나타났다. 그리고 유속 증가에 따라 표면의 국부적인 침식 손상 정도가 증가하는 경향을 나타냈다.

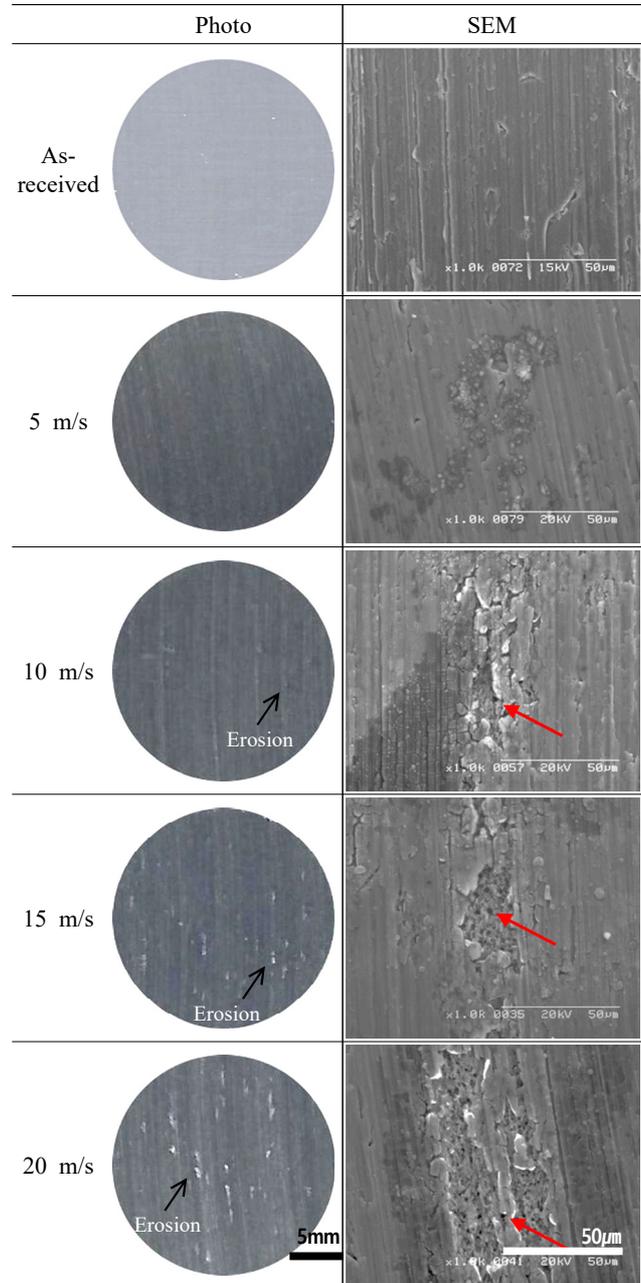


Fig. 2 Surface morphologies for Al5083-H321 after erosion test at various flow rate in seawater (distance of between a specimen and a nozzle: 5 mm, impact angle:  $90^\circ$ ).

#### 3.2 침식환경에서의 전기화학적 특성

Fig. 3은 다양한 유속에서 Al5083-H321 시험편의 동전위 분극실험 결과를 나타낸 그래프이다.  $0 \sim 10$  m/s의 유속에서 양극분극 곡선은 전류밀도가 점진적으로 증가하면서 부동태 구간을 지나 공식전위( $E_{pit}$ )가 나타났으며, 공식전위 이후 급격한 전류밀도 상승이 관찰되었다. 이는 일반적으로 알루미늄 합금은 산화피막의 형성으로 인한 공식

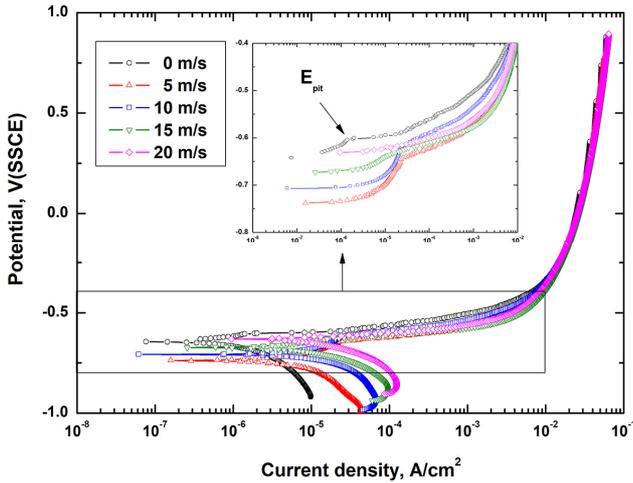


Fig. 3 Potentiodynamic polarization curves of Al5083-H321 at various flow rate in seawater.

저항성을 가지고 있으며 산화피막 파괴로 공식이 개시되면서 전류밀도가 급격히 상승하는 기존 타 연구자의 연구결과와 유사한 결과이다 [10]. 15 ~ 20 m/s의 유속에서 양극 분극 곡선은 공식전위 없이 지속적으로 전류밀도가 상승하는 경향이 나타났다. 이는 유체 충격으로 산화피막이 조기 파괴되어 전류밀도가 상승한 것으로 판단된다. 결과적으로 0 ~ 10 m/s까지는 공식전위 ( $E_{pit}$ )가 관찰되었으며, 이후 15 m/s에서는 산화피막의 조기 파괴로 인한 전류밀도 상승으로 이전 유속 조건 대비 내식성이 상대적으로 열악할 것으로 예상된다.

Fig. 4는 다양한 유속 조건에서 분극 실험 후 Al5083-H321 시험편 표면을 분석한 결과이다. 육안 관찰한 결과(photo), 0 m/s에서 표면 형상은 표면 전반에 걸친 부식 손상이 관찰되었다. 이는 동전위분극 실험 시 개방회로전위 기준 +1.55 V 전후에서 부식전류밀도보다 현저히 높은 약 0.06 A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 나타냈기 때문에 표면 전반에 걸친 부식 손상이 발생한 것으로 판단된다. 반면 유속 환경 하에서 표면 형상은 와류 형태의 부분 손상이 관찰되었다. 이는 일정 유속 이상의 유동으로 인한 난류(turbulence)가 발생하여 시험편을 가격함으로써 와류 형태로 손상 형상이 나타난 것으로 판단된다. 이러한 시험편 표면을 주사전자현미경으로 분석한 결과, 0 m/s에서 표면은 전반에 걸친 공식 손상이 관찰되었다. 이는 0 m/s의 공식전위 -0.60 V보다 매우 높은 +1.55 V까지 전위를 인가했기 때문에 공식이 발생한 것으로 판단된다. 한편 유속 조건에서 표면 형상은 유속이 증가하면서 표면의 침식 손상 경계면은 점차 뚜렷해지며, 침식 손상부가 넓어지는 경향이 관찰되었다. 특히 5 m/s 유속 조건 대비 10 m/s 이상 유속 조건에서 침식 손상부가 현저하게 크게 나타났다.

Fig. 5는 다양한 유속 조건에서 분극 실험 후 Al5083-H321

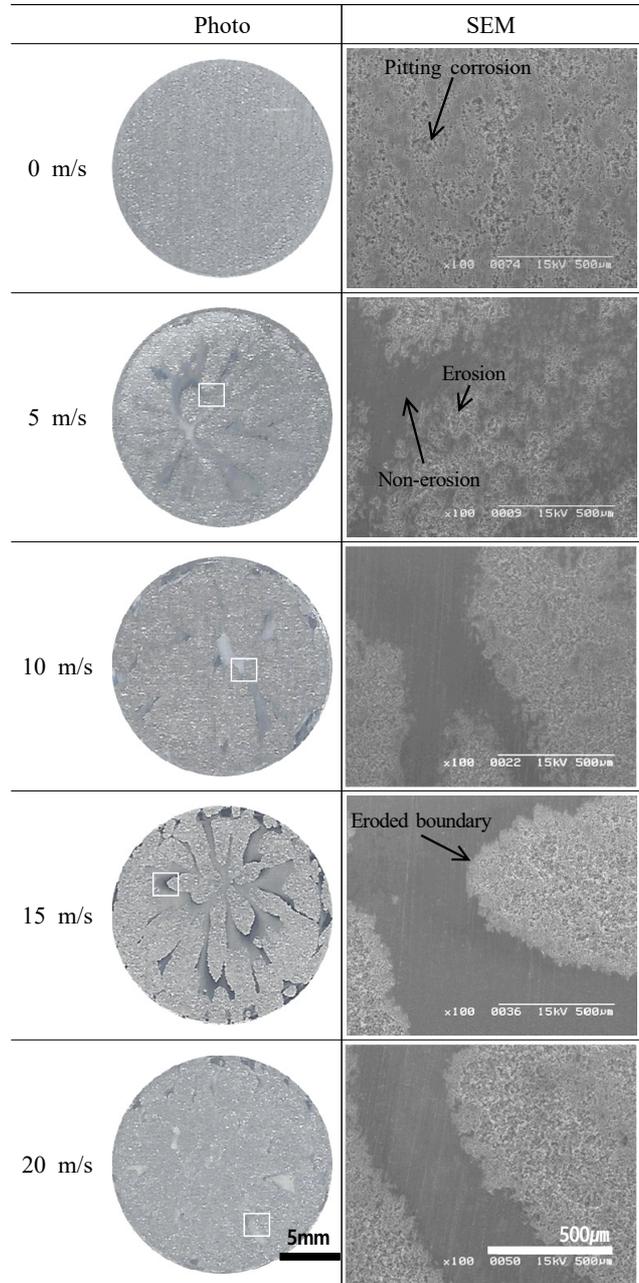
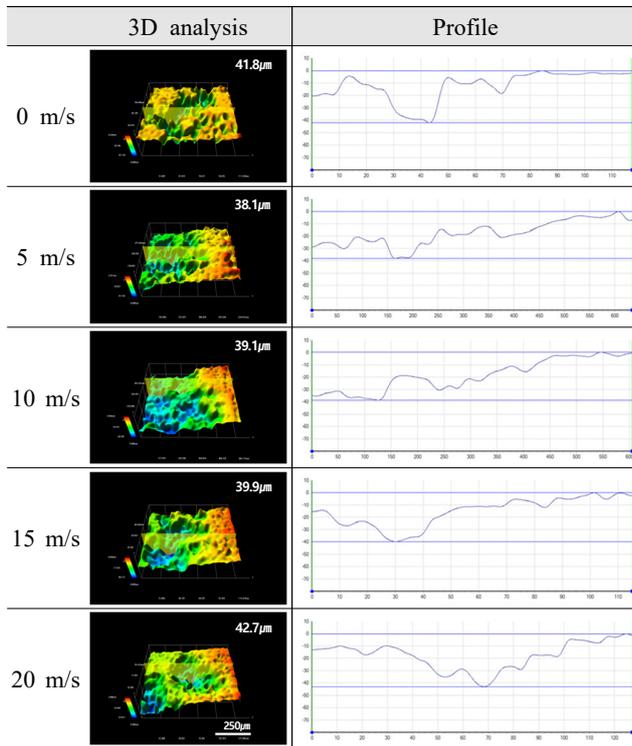
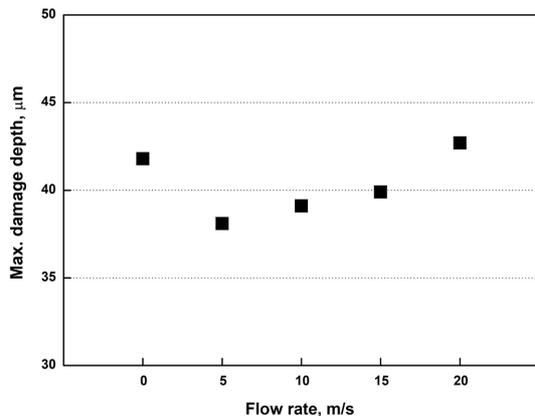


Fig. 4 Surface morphologies for Al5083-H321 after potentiodynamic polarization test at various flow rate in seawater.

시험편에 대하여 3D 현미경으로 표면 손상깊이를 측정한 결과이다. 최대 손상깊이는 0 m/s에서 41.8 µm이며, 5 m/s의 유속에서 38.1 µm로 나타났다. 앞선 타펠 분석 결과는 부식전류밀도가 정적인 조건보다 유속 조건에서 급격하게 높게 나타나 최대 손상깊이도 동일한 경향이 나타날 것으로 예상되었으나 상반된 결과가 나타났다. 정적인 해수 환경에서는 산화피막 파괴 후 염소이온에 의한 집중적인 양극 용해 반응으로 공식 손상이 크게 성장한 반면 유속 하에서는 금속



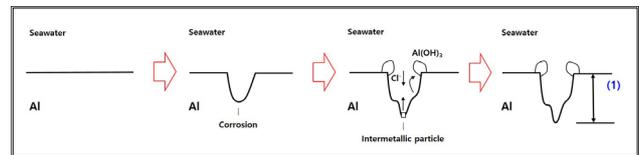
(a)



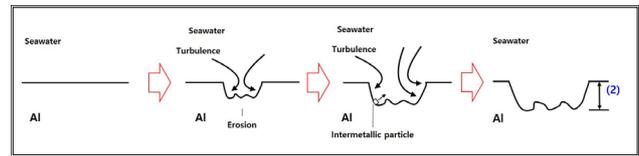
(b)

Fig. 5 3D microscopic image analysis of Al5083-H321 after potentiodynamic polarization test at various flow rate in seawater;(a) 3D microscopic image analysis, (b) Max damage depth.

표면 주변의 각종 부식산화물이 유동에 의해 제거되어 공식 손상으로 성장하는 것을 방해하는 것으로 알려져 있다 [9,11]. Fig. 5a의 프로파일을 보면 정적인 조건에서는 손상 형상이 표면의 깊이 방향으로 깊게 형성되어 있는 반면 유속 조건에서는 표면의 너비 방향으로 넓게 형성되어 있다. 이와 같은 해수 내 다양한 환경에서 부식 손상 모식도를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6a는 해수환경의 정적인 조건에서 부식이 진행되는 과정을 나타낸 것이다. 알루미늄 합금



(a)



(b)

Fig. 6 Mechanism of various corrosion progress in seawater environment;(a) Pitting corrosion, (b) Erosion corrosion.

은  $Cl^-$ 이온에 의한 국부적인 산화피막의 파괴로 공식이 생성된다. 그리고 부식생성물로 인한 공식 내 양극화로 부식이 가속화되며 시간 경과에 따라 표면의 깊이 방향으로 손상이 진행된다. 반면 Fig. 6b는 해수환경의 유속 조건에서 침식부식이 진행되는 과정을 나타낸 것이다. 알루미늄 합금은 유체 유동으로 인한 산화피막 파괴로 침식 손상이 발생하며, 알루미늄 합금 기지 내 금속간 입자가 유체 충격으로 탈리된다. 그리고 금속간 입자가 탈리된 자리에 유체의 재 충격으로 입자 이탈이 가속화되며, 이러한 침식 손상 형상은 표면에서 너비 방향으로 진행된다. 따라서 두 조건의 표면 손상 깊이를 비교하면, 정적인 조건(1)에서 최대 손상깊이가 유속 조건(2) 대비 크게 나타난다.

결과적으로 정적인 조건의 표면 손상은 깊이 방향으로 진행되었으며, 유속조건에서는 유속 증가에 따라 표면 손상 면적과 최대 손상깊이가 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 7과 Fig. 8은 다양한 유속에서 Al5083-H321 시험편의 동전위 분극실험 후 타겟 외삽법으로 산출한 부식전위 및 부식전류밀도 값을 나타낸 것이며, Table 3에 그 값을 나타냈다. 부식 전위는 0 m/s에서  $-0.64$  V로 나타났으며, 이후 5 m/s의 유속 하에서 부식전위는  $-0.73$  V로 정적인 조건에 비해 비(active)한 전위를 나타냈다. 일반적으로 유속이 증가함에 따라 해수 내 용존산소의 환원반응( $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ )이 증가하여 부식전위는 귀(noble)한 방향으로 상승한다 [12]. 반면 실제 침식부식 실험에서는 비한 전위를 나타냈는데, 이는 Fig. 4와 같이 난류로 인한 기포 발생이 해수와 알루미늄 합금 표면의 접촉 면적을 감소시켜, 환원반응이 감소된 것으로 판단된다. 이후 유속 증가에 따라 부식전위는 각각  $-0.70$  V,  $-0.67$  V,  $-0.63$  V이며, 귀한 방향으로 점진적인 상승하는 경향이 나타났다. 이는 유속이 증가하면서 침식으로 인한 해수와 알루미늄 합금 표면의 접촉 면적 증가로 환원반응이 증가된 것으로 판단되

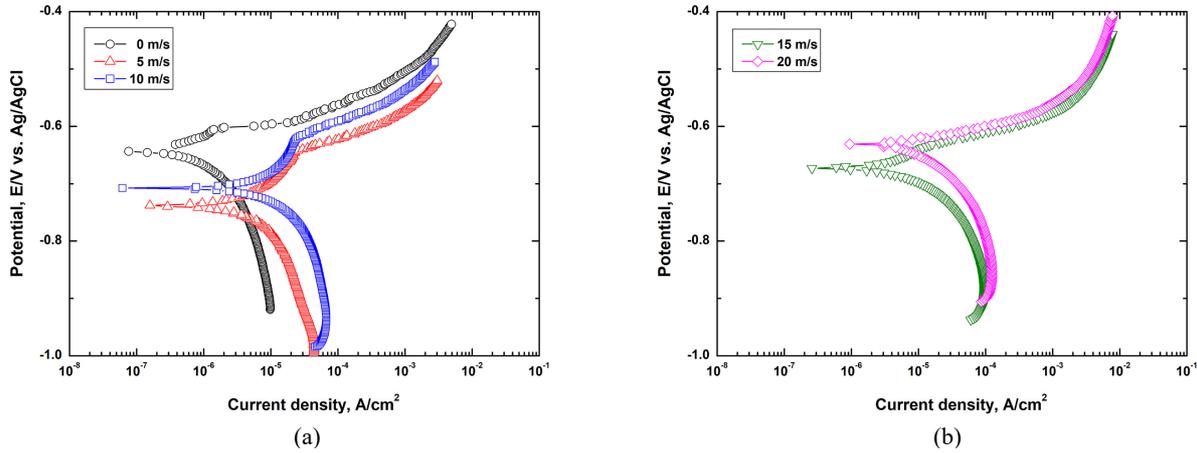


Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves for Tafel analysis of Al5083-H321 at various flow rate in seawater;(a) 0 m/s, 5 m/s, and 10 m/s, (b) 15 m/s and 20 m/s.

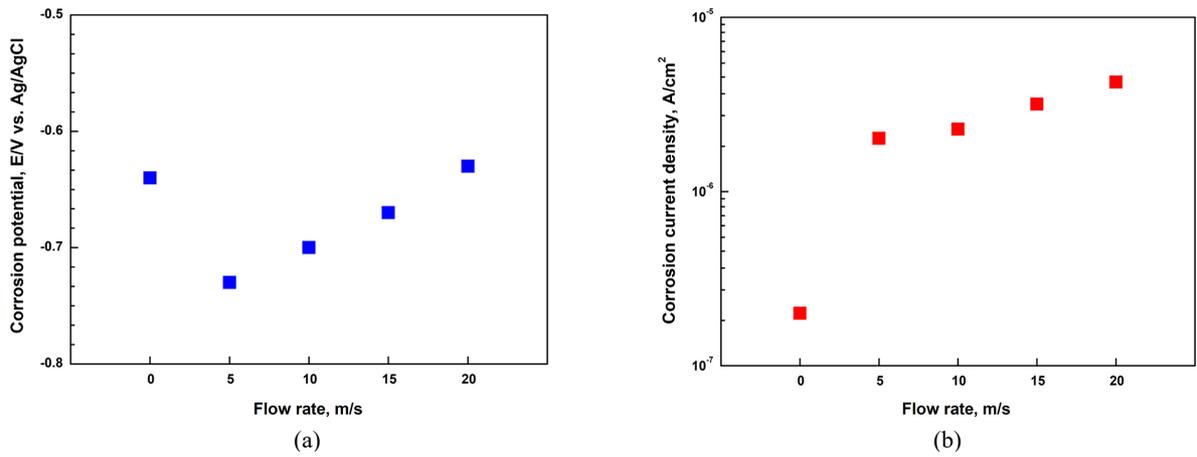


Fig. 8 Tafel analysis results of Al5083-H321 at various flow rate in seawater;(a) Corrosion potential, (b) Corrosion current density.

Table 3 Results of Tafel analysis for Al5083-H321

	Corrosion potential, [V]	Corrosion current density, [A/cm <sup>2</sup> ]
0 m/s	-0.64	2.00 x 10 <sup>-7</sup>
5 m/s	-0.73	2.02 x 10 <sup>-6</sup>
10 m/s	-0.70	2.28 x 10 <sup>-6</sup>
15 m/s	-0.67	3.17 x 10 <sup>-6</sup>
20 m/s	-0.63	4.24 x 10 <sup>-6</sup>

며, 표면 분석 결과(Fig. 4)의 표면 손상 경향과도 일치되는 결과이다. 한편 부식전류밀도는 0 m/s에서  $2.00 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> 값이 나타났으며, 이후 5 m/s에서  $2.02 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>로 약 10 배 정도 급격히 상승하여 정적 환경보다 유속 환경에서 침식 저항성이 상대적으로 열악할 것으로 판단된다. 이후 유속 조건에서는 유속이 증가하면서 각각

$2.28 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>,  $3.17 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>,  $4.24 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>로 꾸준히 상승하는 경향을 나타냈다. 이는 유체 유동이 금속 표면의 물질전달(mass transfer) 경계층 두께를 감소시켜 부식 반응속도를 증가시킨 것으로 판단된다 [13].

#### 4. 결론

Al5083-H321의 시험편에 대하여 해수 내 다양한 유속에서 침식실험과 침식부식 환경에서 동전위 분극실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 침식 실험 후 표면 분석 결과, 모든 유속 조건에서 국부적인 침식 손상이 나타났다. 그리고 유속 증가에 따라 표면의 침식 손상 개수가 많아지며, 침식 손상 부가 넓어지는 경향을 나타냈다.
- (2) 침식부식 실험 후 분극 곡선 분석 결과, 0 ~ 10 m/s

에서는 공식전위( $E_{pit}$ )가 나타났으며, 이후 15 ~ 20 m/s에서는 공식전위 없이 전류밀도가 지속적으로 상승하는 경향을 나타냈다.

- (3) 침식부식 실험 후 표면 분석 결과, 정적인 조건에서는 공식 손상이 나타났으며, 공식의 발달로 표면 손상이 깊이 방향으로 진행되었다. 반면, 유속 조건에서는 와류 형태의 손상이 나타났다. 그리고 유속 증가에 따라 표면의 침식 손상 경계면은 점차 뚜렷해졌으며, 표면 손상 면적과 최대 손상깊이가 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다.
- (4) 침식부식 실험 후 타펠 분석 결과, 유속 조건에서는 정적인 조건 대비 약 10 배의 부식전류밀도를 높게 나타내어, 침식부식에 대한 저항성이 상대적으로 열악하게 나타났다. 그리고 유속 증가에 따라 부식전류 밀도는 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다.
- (5) 결과적으로 침식 손상의 경우, 유속이 증가하면서 표면의 손상 면적부가 넓어지는 경향을 나타냈다. 그리고 침식과 부식이 동반된 손상의 경우, 물리적인 손상과 전기화학적 손상이 결합된 상승효과로 유속이 증가하면서 표면 손상 면적부가 넓어지는 동시에 깊이 방향으로 증가하는 경향을 나타냈다.

### 감사의 글

본 연구는 중소조선연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

### References

1. S. J. Kim, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **30**, 540 (2006). <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/article/articleSearchResultDetail.do?cn=JAKO200633242469734&SITE=CLICK>
2. I. C. Park, M. S. Han, and S. J. Kim, *J. Weld. Join.*, **37**, 254 (2019). <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.3.9>
3. S. J. Kim, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **44**, 105 (2011). <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01648782>
4. S. R. Dehghani, Y. S. Muzychka, and G. F. Naterer, *Cold Reg. Sci. Technol.*, **127**, 1 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.03.010>
5. A. George, Jr. Gehring and M. H. Peterson, *Corrosion*, **37**, 232 (1981). <https://doi.org/10.5006/1.3577276>
6. O. Erfan, Al-Badrawy A. El-Nasr, and F. Al-Mufadi, *Int. J. Mech. Eng.*, **3**, 15 (2014). [https://scholar.google.com/citations?user=0o7IK2QAAA&hl=en#d=gs\\_md\\_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview\\_op%3Dview\\_citation%26hl%3Den%26user%3D0o7IK2QAAAAAJ%26citation\\_for\\_view%3D0o7IK2QAAAAAJ%3AIjCSPb-OGe4C%26tzm%3D-540](https://scholar.google.com/citations?user=0o7IK2QAAA&hl=en#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Den%26user%3D0o7IK2QAAAAAJ%26citation_for_view%3D0o7IK2QAAAAAJ%3AIjCSPb-OGe4C%26tzm%3D-540)
7. I. C. Park and S. J. Kim, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, **49**, 349 (2016). [https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE07002207&language=ko\\_KR](https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE07002207&language=ko_KR)
8. Y. B. Kim and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **18**, 292 (2019). <https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.6.292>
9. C. Vargel, *Corrosion of Aluminium, 1st ed.*, pp. 113–117, 141, 320, Elsevier Ltd., Oxford (2004). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044495-6.X5000-9>
10. Hosni Ezuber, A. El-Houd, and F. El-Shawesh, *Mater. Des.*, **29**, 801 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.021>
11. F. D. Bogar and R. T. Foley, *J. Electrochem. Soc.*, **119**, 462 (1972). <https://doi.org/10.1149/1.2404232>
12. Y.-S. Kim, K.-M. Kim, S. K. Lee, and J.-G. Kim, *Korean J. Met. Mater.*, **55**, 348 (2017). <https://doi.org/10.3365/KJMM.2017.55.5.348>
13. S. J. Lee, M. S. Han, S. K. Jang, and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **14**, 226 (2015). <https://doi.org/10.14773/cst.2015.14.5.226>