

## 해수 유속 변화에 따른 Al5052-O와 Al6061-T6 알루미늄 합금의 침식부식 특성

김영복<sup>1</sup> · 김성종<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>목포해양대학교 실습선 세계로호, 58628, 전라남도 목포시 해양대학로 91

<sup>2</sup>목포해양대학교 기관시스템공학부, 58628, 전라남도 목포시 해양대학로 91  
(2019년 11월 12일 접수, 2019년 12월 11일 수정, 2019년 12월 12일 채택)

### Erosion Corrosion Characteristics of Al5052-O and Al6061-T6 Aluminum Alloys with Flow Rate of Seawater

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

<sup>1</sup>Training Ship Segero, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

<sup>2</sup>Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received November 12, 2019; Revised December 11, 2019; Accepted December 12, 2019)

The hull material of a high-speed ship may cause erosion damage from fluid impact. When physical erosion and electrochemical corrosion combine, erosion corrosion damage occurs. The aluminum ship is vulnerable to erosion corrosion because it can be operated at high speed. Thus, in this study, Al5052-O and Al6061-T6 aluminum alloys for the marine environment were selected as experimental materials. The erosion corrosion resistance of Al5052-O and Al6061-T6 aluminum alloys in seawater was investigated by an erosion test and potentiodynamic polarization test at the various flow rate (0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s). Erosion corrosion characteristics were evaluated by surface analysis, 3D analysis, SEM analysis, and the Tafel extrapolation method. The results of surface damage analysis after the erosion test showed that Al6061-T6 presented better erosion resistance than Al5052-O. The results of the potentiodynamic polarization test at the various flow rate, corrosion current density by Tafel extrapolation presented lower values of Al6061-T6 than Al5052-O. Al5052-O showed more surface damage than Al6061-T6 at all flow rates. Consequently, Al6061-T6 presented better erosion corrosion resistance than Al5052-O. The results of this study are valuable data for selecting hull material for an aluminum alloy vessel.

**Keywords:** Aluminum alloy, Erosion corrosion, Potentiodynamic polarization experiment, Seawater, Surface damage

#### 1. 서론

최근 조선산업의 급격한 성장으로 선박은 점차 고속, 고출력 및 경량화로 발전하고 있으며, 이에 따라 고속 운항하는 선박의 선체 재료는 수압, 조류, 파랑 등에 의한 유체충격이 증가하여 침식 손상 발생이 더욱 용이해졌다. 그리고 물리적인 침식과 더불어 강전해질인 해양환경 하에서의 전기화학적 부식이 복합적으로 작용하여 침식부식 (erosion corrosion) 손상이 발생하게 된다 [1-3].

이러한 침식부식을 방지하기 위해 해양환경용 선박 재료의 다양한 연구들이 현재까지 지속적으로 진행되고 있다. 그 일례로 Yeom 등 [1]은 인공해수에서 해양구조용 강 용접부에 대하여 유속과 pH를 변화시켜 침식부식 시험한 결과, 중성일 때 유속이 증가함에 따라 손상도가 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 Lee 등 [2]은 Cu-Ni계 분말재를 용사피복한 강에 증류수와 해수를 혼합한 강전해질, 약전해질의 수용액으로 일정한 유속에서 침식부식을 연구한 결과, Cu-Ni 용사피복재는 모재 대비 부식억제 효율이 약전해질에서 96%이고, 강전해질에서 92%로 내식성이 크게 향상된다는 사실을 규명하였다. 한편 Lim 등 [4]은 원통다관형

\*Corresponding author: ks@mmu.ac.kr

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloys (wt%)

	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Al
Al5052-O	2.31	0.0005	0.284	0.197	0.177	0.0005	Bal.
Al6061-T6	0.8252	0.3104	0.441	0.0069	0.1809	0.2086	Bal.

-O : Annealed

-T6 : Solution heat treated and stabilized

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

열교환기의 재료인 동 세관 (Cu tube, CI220T-1/2H) 과 탄소강관 (STPG 38) 에 대하여 해수, 수돗물, 유속변수, 온도변수에 따른 침식부식 거동을 연구한 결과, 동 세관이 탄소강관 보다 전위가 높게 나타났으며, 두 재료 모두 높은 온도와 높은 유속에서 무게감소율이 높은 값을 나타냈다.

상기 연구 결과와 같이 유속의 영향에 따른 해양환경용 선박 재료의 침식부식은 밀접한 관련이 있다. 따라서 이를 방지하기 위해서는 선박 선체의 경우 도장으로 내구성을 지닐 수 있지만, 고속의 유속 환경 하에서 물리적 힘 증가와 유체 압력의 급격한 변동 때문에 도장 손상이 발생할 수 있다 [5,6]. 그리고 도장 손상으로 노출된 선체는 침식부식이 발생하기 쉬운 환경에 노출된다. 특히 강선에 비해 가벼운 알루미늄 선박은 고속 운항이 가능하기 때문에 침식부식에 더 취약한 조건을 가지고 있어 이에 대한 추가 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 알루미늄 선박 선체 재료로 널리 사용되는 Al5052-O와 Al6061-T6 알루미늄 합금에 대하여 유속별 침식실험 및 동전위 분극실험을 실시하여 해수환경에서 침식부식 특성을 평가하였다. 본 연구 결과는 침식부식 특성을 고려한 알루미늄 선박의 선체 재료 선정 시 기초 자료를 제공할 것으로 기대한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료

본 연구에서는 주요 선급협회 규격으로 규정되어 있는 알루미늄 합금인 Al5052-O와 Al6061-T6을 실험재료로 선정하였으며 [7], 각 재료에 대한 화학적 조성은 Table 1에 나타냈다. 시험편은 2 cm × 2 cm으로 절단 후 sand paper # 2000 번까지 순차적으로 연마하였고, 이후 아세

톤과 증류수로 세척하고 24시간 건조하였다. 그리고 모든 실험 시 시험편의 노출 면적은 1 cm<sup>2</sup>로 하였다.

### 2.2 침식실험

유속별 침식실험을 실시하기 위해 Fig. 1과 같이 자체 제작한 침식실험 장비를 이용하여 각 재료에 대한 침식 특성을

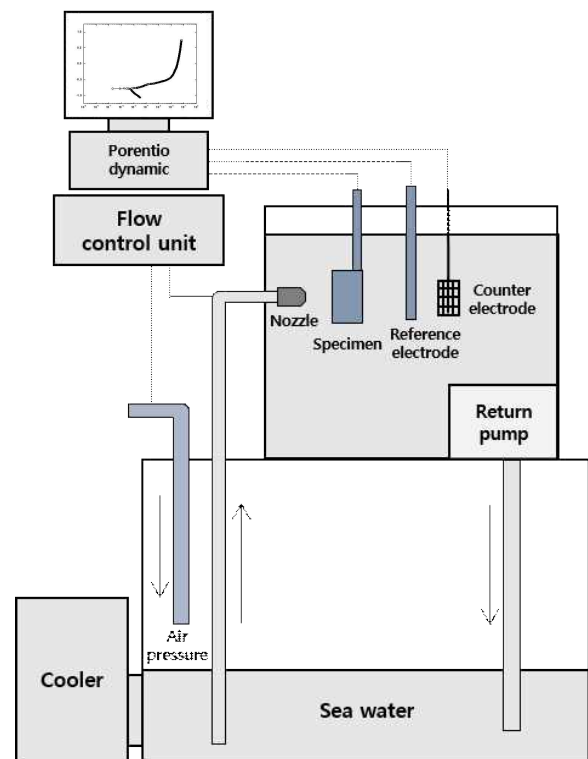


Fig. 1 Schematic diagram of erosion corrosion and potentiodynamic polarization experiment.

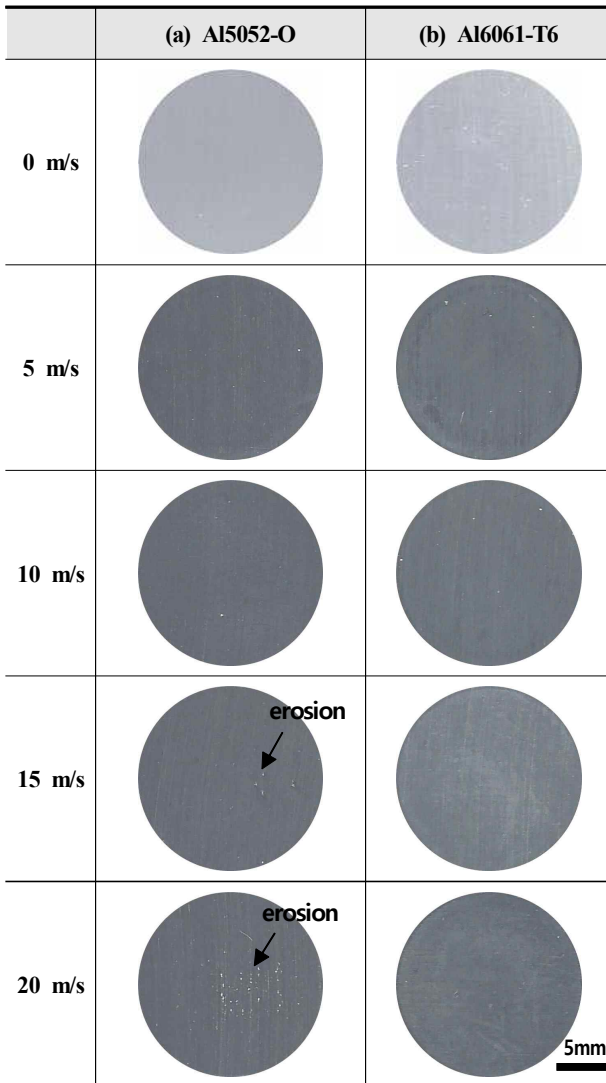


Fig. 2 Photographs with digital camera of aluminum alloys after erosion test during 25 min at various flow rate in seawater at 25 °C (distance of between a specimen and a nozzle: 5 mm, impact angle: 90°).

상호 비교하였다. 침식실험 장비의 작동원리는 공기압축기에 의해 주입된 공기가 해수탱크의 내부 압력을 상승시켜 해수가 일정한 유속으로 노즐을 통해 분사됨으로써 시험편에 충격을 가하는 것이다. 충격 후 해수는 다시 회수펌프에 의해 해수탱크로 이송된다. 이러한 모든 동작은 유속조절기와 타이머로 제어된다.

유속 조건은 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s로 선정하여 25분 동안 침식실험을 실시하였다. 실험 시 노즐 직경은 1.6 mm, 노즐과 시험편 사이의 거리는 5 mm, 시험편의 충격 각도 (impact angle)는 90°로 설정하였다. 유체는 25 °C의 대기중 미탈기 천연해수를 사용하였으며, 그 성분은 Table 2에 나타내었다. 모든 실험은 동일 조건에서 3회 이상 실시하

여 재현성을 확보하였다.

### 2.3 전기화학적 실험

전기화학적 실험은 자체 제작한 침식실험 장비로 다양한 유속 조건 (0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s) 하에서 전기화학적 셀을 구성하여 동전위 분극실험 (potentiodynamic polarization test)을 실시하였다. 분극실험 장치는 GAMRY instrument사의 US/PCI4/750를 사용하였다. 전기화학적 셀은 작동전극으로 알루미늄 합금 시험편, 기준전극으로 은/염화은 (SSC, Silver/Silver Chloride) 전극 그리고 상대 전극으로 백금 (Pt) 전극을 사용하여 구성하였다. 동전위 분극실험은 다양한 유속 하에서 600초간 안정화시킨 뒤 개방회로전위 (open circuit potential, OCP) 기준 - 0.25 V에서 + 1.55 V까지 2 mV/s의 주사속도로 분극시켜 전류밀도 값과 전위 값을 측정하였다. 실험 후 시험편 표면의 손상 정도는 주사전자현미경 (HITACHI, S-2150)으로 관찰하였으며, 3D 광학 현미경 (Motic, PSM-100, I-solution)으로 최대 손상깊이를 측정하였다. 그리고 부식전위와 부식 전류밀도 값은 타펠 외삽법 (Tafel extrapolation method)으로 산출하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 침식 특성

Fig. 2는 Al5052-O와 Al6061-T6 시험편에 대하여 유속별 침식실험 후 표면을 촬영한 것이다. 모재 (As-received)의 경우 두 재료 모두 전처리 연마로 인한 미세한 스크래치가 관찰되었으며, 5 m/s와 10 m/s의 경우 표면에서 침식 손상이 관찰되지 않았다. 반면 15 m/s와 20 m/s의 경우 Al5052-O는 표면에 국부적인 침식 손상이 하얀 반점 형상으로 관찰되었으나 Al6061-T6은 표면 손상이 거의 관찰되지 않았다. 이는 Al5456-H117 (5000계열)의 경우 유체 충격으로 산화피막 파괴가 발생하는 유속조건이 약 9 m/s라는 기존 연구와 어느 정도 상관관계가 있음을 알 수가 있다 [8]. 따라서 본 연구에서 Al5052-O의 경우 10 m/s까지 표면 손상이 발견되지 않는 것은 기존 연구 결과와 유사한 경향으로 판단된다.

Fig. 3은 Al5052-O와 Al6061-T6 시험편에 대하여 유속별 침식실험 후 주사전자현미경 (SEM)을 통해 표면 형상을 관찰한 것이다. 두 재료 모두 Fig. 2에서 나타나지 않았던 표면 손상이 관찰되었다. 알루미늄 합금 중 5000계열 및 6000계열은 해수환경 하에서 2.5 ~ 3.5 m/s 이내의 유속에서는 침식 저항성을 지닌다는 보고가 있다 [9]. 따라서 본 실험 조건에서의 표면 손상은 침식에 의한 손상으로 판단할 수 있다. 표면 손상 정도는 두 재료 모두 유속 증가에

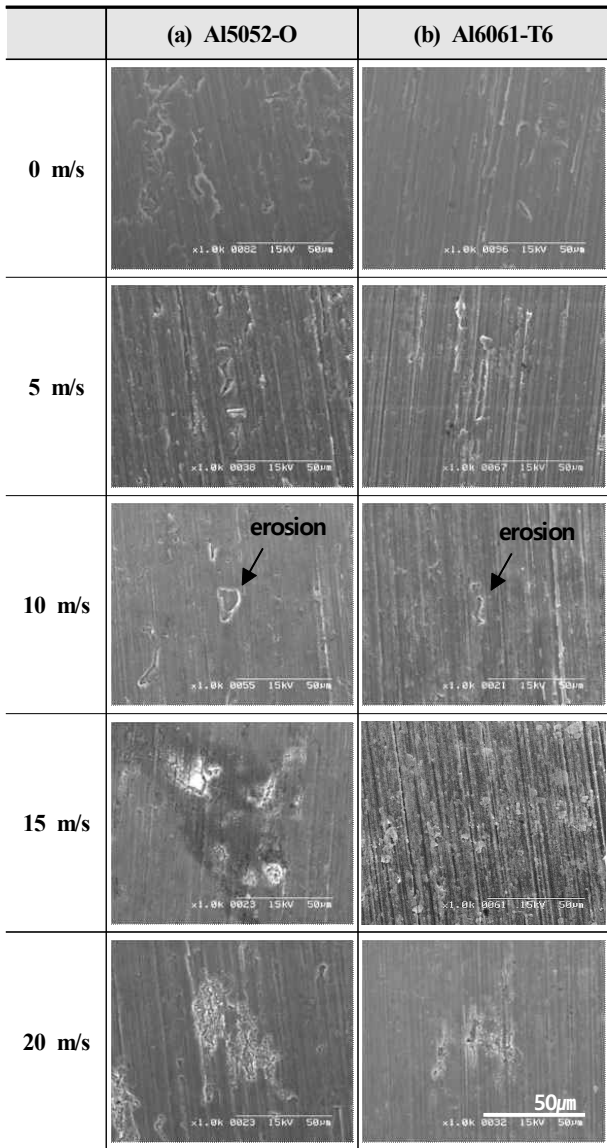


Fig. 3 Surface morphologies for aluminum alloys after erosion test during 25 min at various flow rate in seawater at 25 °C (distance of between a specimen and a nozzle: 5 mm, impact angle: 90°).

따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 20 m/s에서는 산 화피막 파괴로 현저하게 큰 침식부식 손상이 관찰되었다. 침식실험 분석 결과, 두 재료 모두 짧은 노출시간 (25분)에 전 유속 구간에서 침식 손상이 발견되었으며, 유속이 증가할수록 표면 손상 정도가 증가하는 경향을 나타냈다. 그리고 Al6061-T6가 Al5052-O 대비 침식 손상 정도가 적어 침식에 대한 저항성이 상대적으로 우수한 것으로 판단된다.

3.2 전기화학적 특성

Fig. 4는 Al5052-O와 Al6061-T6 시험편에 대하여 타펠 분석을 위한 분극곡선을 나타낸 그래프이고, Fig. 5는

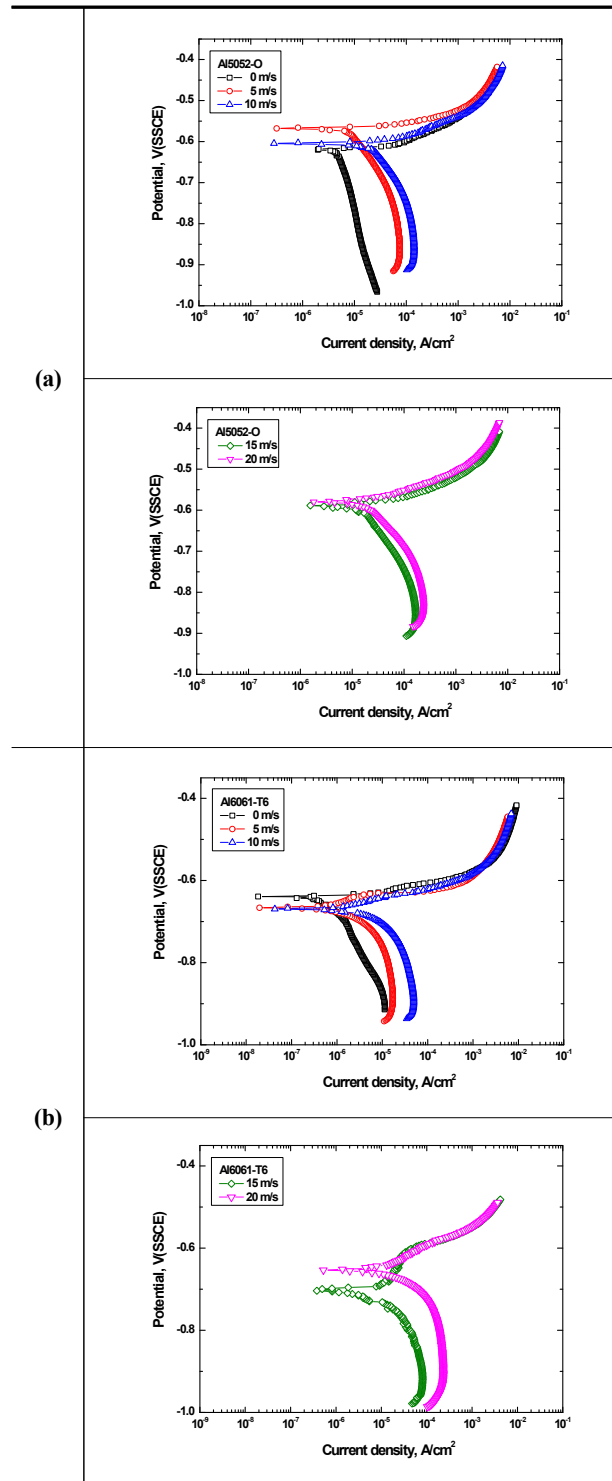


Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves for Tafel analysis of aluminum alloys at various flow rate in seawater; (a) Al5052-O, (b) Al6061-T6.

타펠 분석으로 구한 부식전위 및 부식전류밀도 값을 각각 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5a의 부식전위의 경우 0 m/s

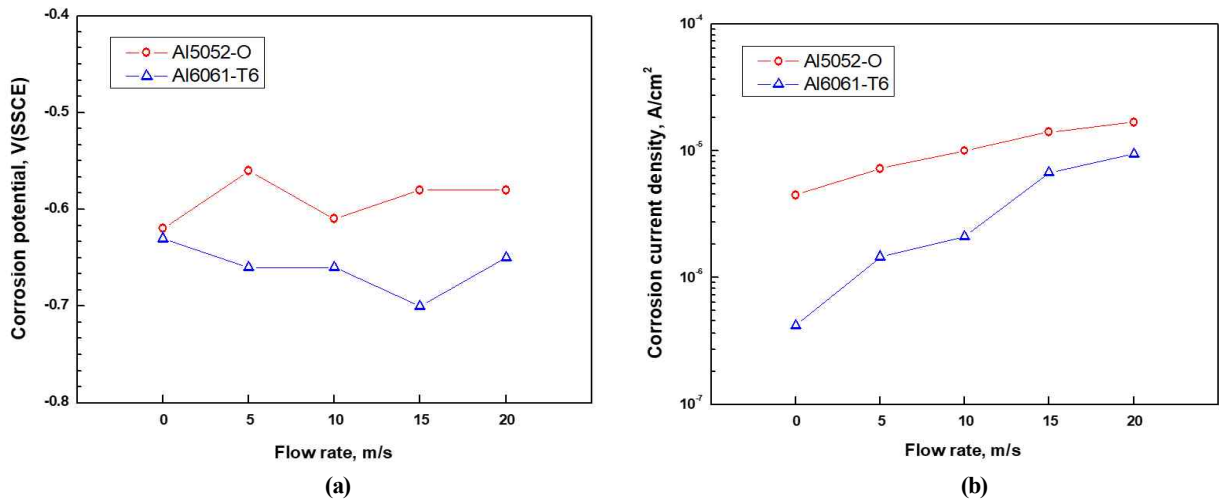


Fig. 5 The results of Tafel analysis for aluminum alloys after potentiodynamic polarization test under erosion corrosion in seawater; (a) Corrosion potential, (b) Corrosion current density.

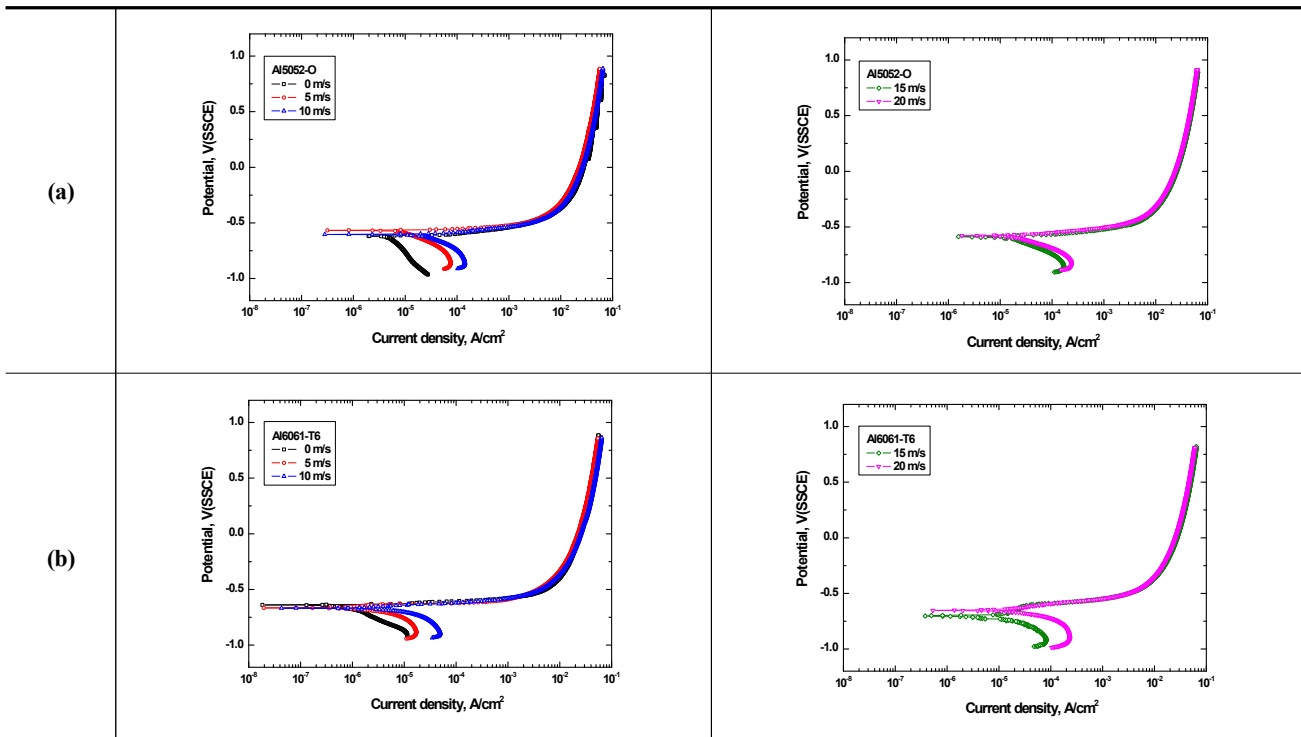


Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves of aluminum alloys at various flow rate in seawater; (a) Al5052-O, (b) Al6061-T6.

에서 두 재료는 각각 -0.62 V와 -0.63 V로 유사한 값을 나타냈다. 유속 하에서 부식전위는 두 재료 모두 일정한 경향성을 나타내지 않았으나 전체적으로 Al5052-O가 Al6061-T6 대비 귀한 값을 나타냈다. Fig. 5b에서 두 재료의 부식전류 밀도는 유속 증가에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 빠른 유체 흐름이 금속 표면의 확산층을 감소시켜 부식생성물의 반응속도를 증가시키기 때문으로 판단된다 [10]. 결

과적으로 두 재료 모두 유속이 증가함에 따라 부식전류밀도가 증가하는 경향이 나타났으나 Al6061-T6가 Al5052-O 대비 낮게 나타났으므로 침식부식 저항성이 상대적으로 우수한 것으로 판단된다. 이러한 침식부식의 저항성 차이는 두 재료의 합금 내 금속간화합물의 차이로 인한 것으로 Table 1에서 Mg 함유량이 Al6061-T6 대비 Al5052-O가 약 2.8배 많기 때문에 Al-Mg 금속간화합물이 다량 존재



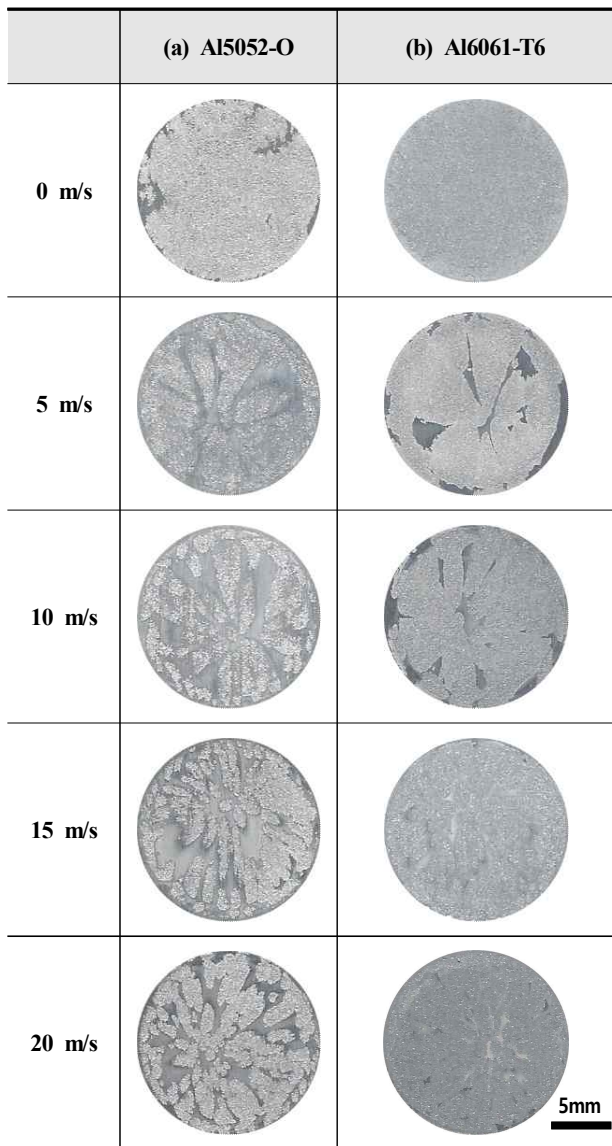


Fig. 7 Photographs with digital camera of aluminum alloys after potentiodynamic polarization test at various flow rate in seawater.

한다. 이 이들 조직의 전위는 기지조직 대비 비한 전위를 가지므로 Al-Mg 금속간화합물이 먼저 부식이 진행된 후 기지조직의 부식이 진행된 것으로 판단된다 [11].

Fig. 6은 Al5052-O와 Al6061-T6 시험편에 대하여 다양한 유속 환경 하에서 동전위 분극실험 결과를 나타낸 그래프이다. 두 재료 모두 양극분극 곡선의 경우 개방회로전위 (OCP)에서 귀방향으로 이행함에 따라 부동태 경향은 관찰되지 않았으며 전류밀도가 꾸준히 상승하는 경향을 나타냈다.

이러한 Al5052-O와 Al6061-T6 시험편에 대하여 다양한 유속 환경 하에서 동전위 분극실험 후 표면을 촬영한 사진을 Fig. 7에 나타냈다. 먼저 0 m/s인 경우 표면 관찰 결과, 두 재료 모두 표면 전반에 걸친 부식 손상이 관찰되었

다. 그러나 유속 환경 하에서 두 재료의 표면 형상은 와류 형태의 손상으로 관찰되었다. 이는 금속 표면이 유체의 흐름에 의한 와류와 기포 형성으로 인해 부분적으로 해수와 금속 표면 사이의 접촉을 방해하였기 때문으로 판단된다. 또한 유속 증가에 따라 손상은 증가하였으며, Al5052-O가 더 큰 손상이 관찰되었다.

Fig. 8은 Al5052-O와 Al6061-T6 시험편에 대하여 표면을 주사전자현미경 (SEM)으로 관찰한 결과이다. 먼저 손상된 표면의 경우, 두 재료 모두 유속별 부식 손상의 형상은 유사하게 나타났다. 그리고 결정학적 공식 (crystallographic pit) 손상 형상이 관찰되었는데, 이는 기존 문헌과 같이 해수 환경 하에서 공식전위 이상으로 분극시킬 경우 특정 결정면 {100}이 나타나는 연구결과와 동일한 경향임을 알 수 있다 [12]. 반면에 손상이 없는 표면의 경우, 일반적으로 알루미늄 합금의 해수 부식은 국부적인 공식손상이 발생하나 본 연구에서는 공식 손상이 발견되지 않았다. 따라서 Cl<sup>-</sup> 이온에 의한 산화피막의 파괴보다 유속에 의한 와류와 기포의 영향을 더 크게 받은 것으로 판단된다.

Fig. 9는 Al5052-O와 Al6061-T6 시험편에 대하여 다양한 유속 환경 하에서 동전위 분극실험 후 표면 손상을 3D 현미경으로 최대 손상깊이를 측정한 결과이다. Al5052-O의 최대 손상깊이는 0 m/s에서 44.2 μm이며, 5 m/s의 유속에서 38.5 μm로 낮아졌다. 이후 유속이 증가하면서 최대 손상깊이는 각각 39.3 μm, 39.3 μm, 42.5 μm로 점진적으로 증가하는 경향이 나타났다. 한편 Al6061-T6의 최대 손상깊이는 0 m/s에서 38.2 μm이며, 5 m/s의 유속에서 35.4 μm로 낮아졌다. 이후 유속이 증가하면서 최대 손상깊이는 각각 35.4 μm, 39.8 μm, 42.5 μm로 15 m/s와 20 m/s의 유속에서 급격하게 증가하는 경향이 나타났다. 두 재료 모두 0 m/s 값 대비 5 m/s의 낮은 유속에서 최대 손상깊이는 0 m/s 값보다 낮게 나타났다. 이는 앞선 타펠 분석 결과 (Fig. 4와 5)와 상반된 결과로, 정적인 해수환경에서 알루미늄 합금 부식은 Cl<sup>-</sup> 이온에 의해 국부적으로 산화피막이 파괴되어 소면적의 양극이 대면적의 음극으로 둘러싸여 갈바닉 부식에 의한 집중적인 양극용해 반응으로 공식 손상이 성장한다. 그리고 공식이 성장하면서 pit 내에 부식산화물인 Al<sup>3+</sup> 이온이 과다 축적되면 양이온화되어 Cl<sup>-</sup> 이온이 pit 내로 유입됨으로써 산성화되고 공식은 더욱 가속화된다 [9,13]. 그러나 유속 하에서 알루미늄 부식은 산화피막 파괴 후 표면 주변의 각종 부식산화물이 해수의 유동에 의해 제거되기 때문에 공식 손상이 성장하는 것을 방해하여 표면 손상깊이를 감소시키는 것으로 알려져 있다 [9]. 따라서 0 m/s에서는 공식 손상으로 인해 표면 손상이 깊이방향으로 진행되었으며, 유속 하에서는 표면 손상이 넓이방향으로 형성된 것으로 판단된다. Fig. 9b는 두 재료의 최대 손상깊이를 비교한 그래프이다. 최대 손상깊이는 0 m/s에서 10 m/s까지 Al6061-

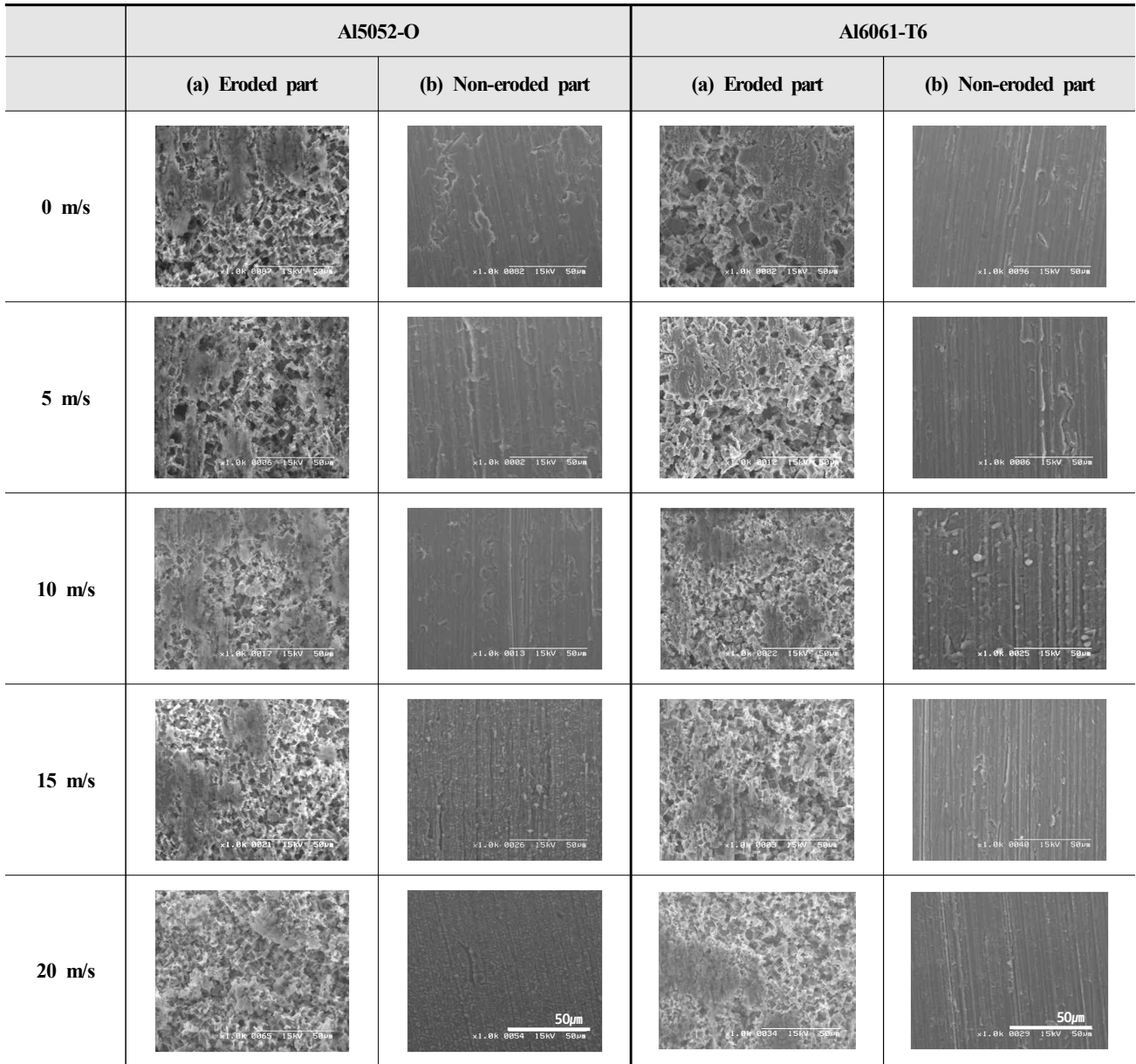


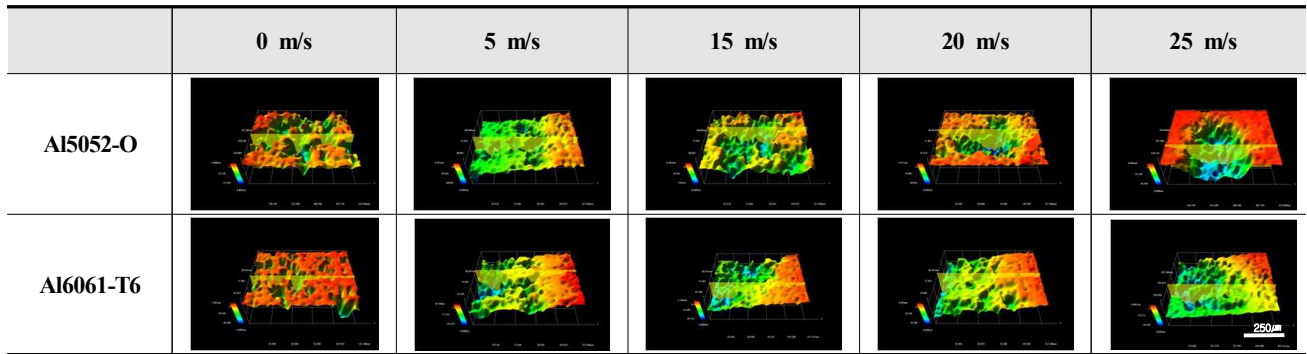
Fig. 8 Surface morphologies for aluminum alloys after potentiodynamic polarization test at various flow rate in seawater.

T6가 Al5052-O 대비 낮은 값을 나타냈으며, 이후 15 m/s에서 20 m/s까지 최대 손상깊이는 유사한 경향이 나타났다. 두 재료 모두 유속 하에서 최대 손상깊이는 앞선 Fig. 5b의 부식전류밀도와 유사한 경향이 나타났다.

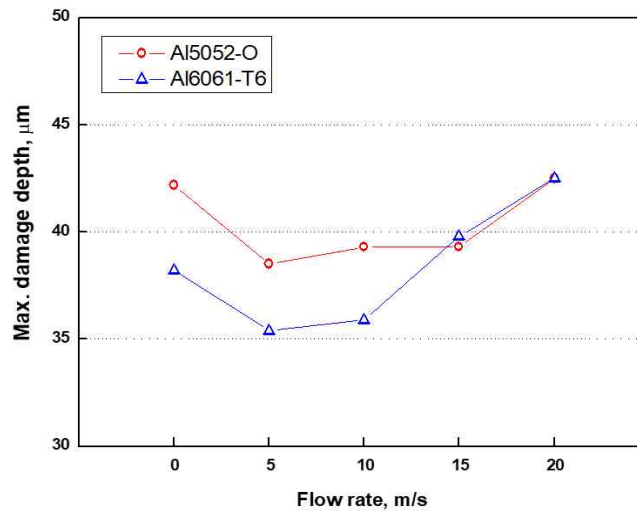
#### 4. 결론

Al5052-O와 Al6061-T6의 시험편에 대하여 해수 내 다양한 유속 환경 하에서 침식실험과 동전위 분극실험을 실시하여 두 재료의 침식부식 특성을 평가하였다. 침식실험 결과, 유속이 증가할수록 표면에 침식 손상의 크기가 커지

는 경향이 나타났다. 그리고 Al6061-T6가 Al5052-O 대비 침식 손상 크기가 작게 나타났으므로 침식에 대한 저항성이 상대적으로 우수한 것으로 판단된다. 유속환경에서 동전위 분극실험 결과, 두 재료 모두 유속 증가에 따라 전류밀도가 상승하는 경향을 나타냈으며, 최대 손상깊이도 증가하는 경향이 나타났다. 그리고 Al5052-O는 Al6061-T6에 비해 모든 유속 조건에서 부식전류밀도와 최대 손상깊이가 상대적으로 높은 값을 나타내어 침식부식에 대한 저항성이 상대적으로 열악한 것으로 나타났다. 본 연구결과를 종합해보면 Al6061-T6가 Al5052-O 대비 침식부식에 대한 저항성이 우수하게 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 9 3D microscopic image analysis of aluminum alloys after potentiodynamic polarization test at various flow rate in seawater; (a) 3D microscopic image analysis, (b) Max damage depth.

본 논문은 김영복의 2019년도 석사 학위논문을 바탕으로 작성되었음.

### References

1. K. S. Yeom, J. K. Lim, and I. J. Bae, *Proc. Conf.*, 1, pp. 227 - 230, The Korean Welding and Joining Society, Korea (1995).
2. S. Y. Lee, U. J. Lim, and B. D. Yun, *J. Kor. Soc. Fish. Mar. Sci. Educ.*, **10**, 69 (1998).
3. S. R. Dehghani, Y. S. Muzychka, and G. F. Naterer, *Cold Reg. Sci. Technol.*, **126**, 1 (2016).
4. U. J. Lim and H. K. Jung, *J. Kor. Soc. Fish. Ocean Technol.*, **32**, 196 (1999).
5. I. C. Park, M. S. Han, and S. J. Kim, *J. Weld. Join.*, **37**, 254 (2019).
6. S. J. Kim, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **44**, 105 (2011).
7. S. J. Kim, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **30**, 540 (2006).
8. A. George, Jr. Gehring, and M. H. Peterson, *Corrosion*, **37**, 232 (1981).
9. C. Vargel, *Corrosion of Aluminium, 1st ed.*, pp. 113 - 117, p. 141, p. 320, Elsevier Ltd., Oxford (2004).
10. S. J. Lee, M. S. Han, S. K. Jang, and S. J. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **14**, 226 (2015).
11. Buchheit, R. G., *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 3994 (1995).
12. S. Ono, T. Makino, and R. S. Alwitt, *J. Electrochem. Soc.*, **152**, 39 (2005).
13. F. D. Bogar and R. T. Foley, *J. Electrochem. Soc.*, **119**, 462 (1973).