

# 소형선박 프로펠러용 6000계열 알루미늄 합금의 양극산화시간에 따른 캐비테이션-침식과 부식의 복합거동

신동호<sup>1</sup> · 황현규<sup>2</sup> · 김성종<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>국립목포해양대학교, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

<sup>2</sup>한국과학기술원 원자력 및 양자공학과, 대전광역시 유성구 대학로 291

<sup>3</sup>국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

(2025년 11월 05일 접수, 2025년 12월 09일 수정, 2025년 12월 10일 채택)

## Synergistic Behavior on Cavitation–Erosion and Corrosion of Anodized 6000 Series Aluminum Alloy for Small Ship Propellers

Dong-Ho Shin<sup>1</sup>, Hyun-Kyu Hwang<sup>2</sup>, and Seong-Jong Kim<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Mokpo national maritime university, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Republic of Korea

<sup>3</sup>Division of marine system engineering, Mokpo national maritime university, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

(Received November 05, 2025; Revised December 09, 2025; Accepted December 10, 2025)

Al-Mg-Si aluminum alloys used in small ship propellers are subjected to a challenging environment where cavitation-erosion and corrosion occur simultaneously in seawater. This study explored anodized aluminum alloy as an alternative technology. We conducted indentation tests and a hybrid experiment combining electrochemical and cavitation-erosion assessments. The indentation results showed that anodized specimens treated for 10, 20 and 40 minutes had significant hardness increases of 208.282, 336.74 and 369.276 H<sub>v</sub>, respectively, compared to the base material's hardness of 94.9 H<sub>v</sub>, with a notable suppression of creep behavior. In the hybrid experiment, the anodized specimen treated for 10 minutes demonstrated a current density increase, delaying in the range of -0.8775 V to -0.7966 V, and exhibited the lowest corrosion current density of 2.55 μA/cm<sup>2</sup>. Following this experiment, the anodized specimen treated for 10 minutes also showed the lowest weight loss (40.9 mg), surface roughness (14.4 μm) and maximum damage depth (93.8 μm). Conversely, the specimen anodized for 40 minutes exhibited higher hardness than the 10-minute specimen, but showed an increased tendency for cracks and damage due to reduced toughness.

**Keywords:** Aluminum, Anodizing, Indentation, Corrosion, Cavitation-erosion

### 1. 서론

알루미늄 합금은 비중이 낮고 우수한 기계적 특성으로 선박, 항공기 및 자동차 등 다양한 산업분야의 구조재나 부품으로 사용되고 있다 [1-3]. 특히, 6000계열 알루미늄 합금(Al-Mg-Si)은 우수한 강도와 성형성을 동시에 확보할 수 있다 [4]. 또한 부식저항성이 우수하여 해양환경에 널리 활용되고 있다 [5]. 이러한 특성으로 알

루미늄 합금은 소형선박의 선체 또는 프로펠러 소재에 적용할 수 있다 [6]. 그러나 해수에 포함된 염소이온은 대기 중 알루미늄 합금 표면에 형성된 산화피막을 불안정하게 하여 공식이나 틈부식과 같은 국부부식을 유발한다 [7,8]. 이러한 손상은 반복적인 물리적 충격과 복합작용할 경우 내구성이 현저히 저하하게 된다.

특히 프로펠러의 경우, 고속회전 중 유체의 국부적인 압력강화로 인해 공동(cavitation) 현상이 빈번히 발생한다 [9]. 이때 형성된 기포가 붕괴될 경우에는 내부 진공에 의한 압력차로 형성된 마이크로 제트 및 충격파가

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

신동호: 연구원, 황현규: 연구원, 김성종: 교수

표면에 부정적인 영향을 미친다 [10]. 이러한 현상에 기 인하여 표면 손상을 촉진시키며, 사용년수 경과에 따라 성장하여 심각한 문제로 이어질 수 있다. 이와 같이 해 양환경에서 프로펠러에 작용하는 손상은 전기화학적 부 식과 캐비테이션-침식이 동시에 작용하며, 이러한 복합 거동은 재료수명을 단축시키는 주요 원인이다. 따라서 복합 거동에 대한 규명과 표면처리기술을 통해 내구수 명을 향상시키는 연구가 필요하다.

Park 등은 회주철에 대하여 열처리에 따른 무전해 니 켈도금을 실시하여 부식과 캐비테이션-침식 저항성을 향 상시켰다. 연구결과, 가장 높은 경도의 니켈도금층은 불 균일한 표면 조성에 기인하여 가장 열악한 특성을 나타 내는 것으로 보고하였다 [11]. Lee 등은 알루미늄 합금 에 대하여 전해질 온도(5, 10, 15 그리고 20 °C)에 따른 양극산화공정의 최적화 연구를 수행하였다 [12]. 연구결 과, 5 ~ 20 °C조건인 경우, 양극산화층은 작은 직경과 불안정한 기공을 형성하였으며, 15 °C에서는 높은 경도 를 나타냈으나, 캐비테이션-침식 저항성이 가장 열악하 여 10 °C가 양극산화공정의 최적조건인 것으로 보고하 였다. 또한 Fahim 등은 알루미늄에 초소수성 코팅기술 을 적용하여 캐비테이션-침식 저항성을 높이고자 하였 다 [13]. 초소수성 코팅의 돌기 구조와 고분자의 유연성 이 캐비테이션 기포 붕괴로 발생하는 충격을 완충하는 것으로 보고하였다.

이와 같이, 프로펠러의 내구성 향상을 위한 표면처리 기술에 대하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 알 루미늄 합금에 적용되는 양극산화기술은 표면에 치밀하 고 높은 경도의 산화피막을 형성하여 내식성과 내마모 성을 동시에 향상시킬 수 있다 [14]. 그러나 양극산화시 간에 따라 산화피막의 두께와 기계적 특성은 변하며, 경 도 향상과 인성 저하 간의 상충관계가 존재한다 [15]. 따라서 지나치게 두꺼운 산화피막은 초기 충격을 억제 할 수 있으나, 반복적인 캐비테이션-침식에 따른 피로 충격에 취약하다. 이에 따라 산화피막은 피로충격에 의 해 균열 및 손상될 수 있다. 따라서 양극산화조건인 최 적화 연구는 프로펠러의 장기내구성 확보를 위해 필수 적이다. 또한 기존 연구는 부식 또는 캐비테이션-침식

과 같이 단일 실험으로 분리하여 내식성 또는 내구성을 연구하였다 [16,17]. 그러나 실제 프로펠러 환경은 두 환 경이 동시에 작용하므로 복합적인 검토는 대단히 중요하다.

본 연구에서는 Al-Mg-Si 알루미늄 합금에 대하여 양 극산화시간에 따라 산화피막을 형성시킨 후, 인덴테이 션 실험과 캐비테이션-침식환경에서 전기화학적 실험을 동시에 수행하는 하이브리드실험을 실시하였다. 이를 통 해 전기화학적 손상과 캐비테이션에 의한 물리적 손상 에 대한 복합적인 영향을 규명하고, 선행 연구결과인 전 기화학적실험 및 캐비테이션-침식실험 연구 [18]와 비교 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편과 양극산화공정

본 연구에는 Al-Mg-Si계 알루미늄 합금을 사용하였으 며, 화학적 조성과 기계적 특성은 Table 1에 나타내었 다. 이는 경질의 Si 상에 의해 내마모성이 향상된다. 이 러한 특성으로 Al-Mg-Si계 알루미늄 합금은 소형선박용 프로펠러에 요구되는 내식성 및 내마모성 확보에 적합 하다 [19]. 시험편은 열변형을 최소화하기 위해 냉각수 가 공급되는 미세절단기를 이용하여 2.5 cm × 2.5 cm 로 가공하였다. 이후 6.25 cm<sup>2</sup>의 노출면적이 되도록 에 폭시 레진으로 마운팅하였다. 마운팅한 시험편은 에머 리페이퍼 # 2000까지 단계적으로 기계연마하였다. 또한 시험편의 기계연마에 따른 이물질 제거를 위해 아세톤 과 증류수로 초음파 세척하였다.

알루미늄 양극산화공정을 위한 장비는 포텐시오/갈바 노스타트(Interface 3000, GAMRY instrument)를 사용하 였다. 양극산화공정은 3-전극 셀을 구성하여 10 °C의 10 vol.% 황산용액에서 20 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도로 10, 20 그리고 40분동안 실시하였다. 이때, 상대전극과 기준전 극은 각각 백금과 은/염화은(Ag/AgCl) 전극을 사용하였다.

### 2.2 인덴테이션 실험

시험편의 기계적 특성은 마이크로인덴테이션 장비 (Anton paar, MCT<sup>3</sup>)를 사용하여 비교 분석하였다. 인텐

**Table 1. Chemical composition and mechanical properties of Al-Mg-Si Al alloy (wt%)**

Chemical composition						
Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Al
0.8252	0.3104	0.441	0.0069	0.1809	0.2086	Balanced
Mechanical properties						
Yield strength		Tensile strength		Elongation		Absorbed energy
240 MPa		297 MPa		20 %		49 J

테이션 실험은 68°의 비커스 인텐터를 사용하였다. 인텐테이션의 최대하중과 최대하중에서의 유지시간을 각각 100 mN과 10초로 설정하였으며, 침투속도는 100 mN/min으로 선정하였다. 비커스경도는 인텐테이션 실험에서 획득한 하중-변위 곡선으로 Oilver and Pharr 방법에 따라 산출하였다 [20]. 재현성 확보를 위해 동일한 조건에서 12회 이상 진행하였다. 인텐테이션 결과는 최대 및 최소값을 제외한 중간값을 선정하였다.

### 2.3 하이브리드 실험

캐비테이션-침식환경하에서 동전위분극실험을 실시한 하이브리드 실험 조건은 다음과 같다. 먼저 캐비테이션-침식환경은 ASTM-G32 규격(Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus)에 준용하는 진동발생 장치로 압전효과(Piezoelectric effect)를 발생시켜 구현하였다. 이때, 사용된 장비는 60 Hz, 220 V 전원을 공급하여 원추형 혼을 축 방향으로 진동시켜 인위적으로 재료표면에 캐비테이션 충격을 가한다. 또한 진동은 20 kHz로 유지시켰으며, 캐비테이션 진폭은 정진폭 자동제어 방법으로 일정하게 유지하였다. 시편과 혼은 1 mm의 간극을 유지하였으며, 30 μm의 캐비테이션 진폭으로 31분 동안 실시하였다. 이는 선행 연구인 캐비테이션-침식실험 조건과 동일하게 설정하였다 [18]. 하이브리드 실험의 전기화학적 실험은 동전위분극실험을 실시하였으며, 1 시간 안정화시킨 후 개로전위기준 -0.25 V에서 1.6 V까지 1 mV/sec의 주사속도로 실시하였다. 이는 양극산화공정 시 사용한 포텐시오/갈바노스타트, 상대전극 및 기준전극을 사용하였다. 이때, 실험용액은 천연해수를 사용하였으며, 화학적 조성과 특성은 Table 2에 나타내었다.

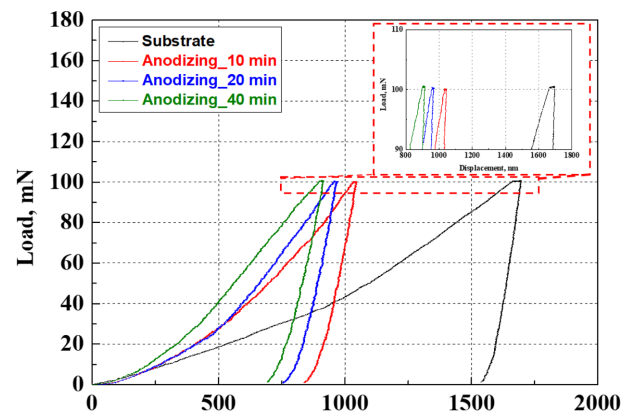
하이브리드 실험 후 획득한 분극곡선에 대하여 타펠 외삽법에 의해 부식전위와 부식전류밀도를 산출하였다. 또한 각각의 실험 후 표면은 3D 공초점 레이저 현미경(OLS5000 LEXT, OLYMPUS™)과 주사전자현미경(SNE-4500M Plus, SEC)으로 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

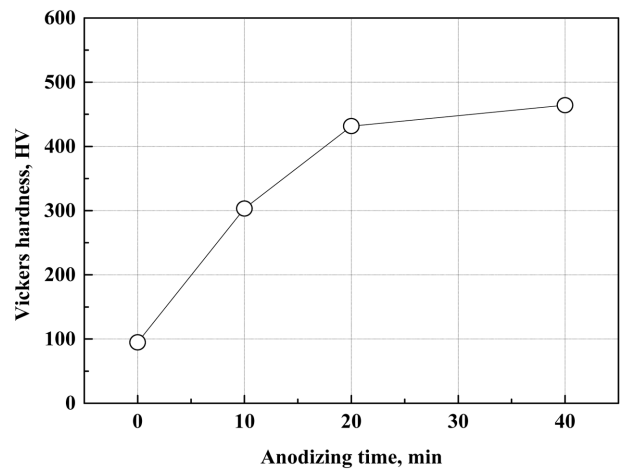
### 3.1 인텐테이션 특성 연구

Fig. 1은 양극산화시간에 따른 시편의 인텐테이션실험

후 변위-하중 곡선과 비커스 경도를 나타낸 것이다. 모재는 최대하중 100 mN에서 최대변위 1696 nm를 나타냈다. 또한 10분, 20분 및 40분 동안 양극산화한 시편은 1044 nm, 969 nm 및 916 nm로 측정되었다. 특히, 최대하중 10 초동안 유지 시 측정된 변형량은 모재, 양극산화 10분, 20분 및 40분 조건에서 각각 약 52, 16, 13 및 11 nm로 나타났다. 이때, 모재는 52 nm만큼 변형되는 크리프 거동을 나타냈다. 크리프 거동은 항복강도 이하의 응력이나 일정한 하중부하 시, 시간경과에 따라 재료가 천천히 변형되는 현상이다. 일반적으로 알루미늄



(a) Displacement-load curve



(b) Vickers hardness

Fig. 1. Indentation experiment results of Al alloy with anodizing time

Table 2. Chemical composition and properties of sea water

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>			
1746	15721	8401	344	1121	357	7.9	16.1	45.3

미늄 합금의 크리프 거동은 결정격자 내 전위 이동으로 발생한다 [21]. 이러한 거동은 장기간에 걸쳐 제품의 변형이나 손상을 초래할 수 있다. 반면, 양극산화 시간 증가에 따라 이 변형량은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 양극산화의 영향으로 산화피막의 물리적 지지효과와 변형 저항성이 향상되었음을 의미한다. 비커스 경도의 경우, 모재는 94.856 H<sub>v</sub>로 측정되었으며, 양극산화 10분, 20분 및 40분 조건에서는 각각 303.138, 431.596 및 464.132 H<sub>v</sub>로 나타났다. 양극산화시간 증가에 따른 경도는 현저히 큰 값으로 증가하였다. 이는 최대하중 유지 시 측정된 변형량의 경향과 일치한다. 또한 Naief 등은 페러데이 법칙에 기인하여 산화피막의 두께가 전하량에 비례하기 때문에 양극산화공정 시간에 따라 산화피막의 두께가 증가한다고 보고하였다 [22]. 본 연구에서도 양극산화시간에 따른 산화피막두께 증가로 물리적 지지효과가 증가한 것으로 여겨진다.

3.2 하이브리드 실험 특성

Fig. 2는 캐비테이션-침식환경하에서 동전위분극실험을 실시하는 하이브리드실험 시 획득한 분극곡선을 나타낸 것이다. 모든 동전위분극곡선은 일부 전위구간에서 전류밀도가 급격히 증가하는 불연속적인 구간이 관찰되었다. 이는 캐비테이션에 의한 기포 형성과 붕괴에 따른 표면적 변화로 인해 발생한 것으로 판단된다. 형성된 기포가 시험편 표면에 부착된 경우, 해당 부분은 전해질과 직접적인 접촉을 하지 않아 전기화학적 유효면적이 감소한다. 이때, 순간적으로 전류밀도가 낮아진

다. 이후 금속표면에 부착된 기포가 붕괴되면서 금속표면이 다시 전해질과 시험편이 접촉하여 전기화학적 유효면적이 원래 면적으로 복귀하게 된다. 이와 더불어, 알루미늄 표면에 형성된 산화피막이 마이크로제트 및 충격파로 인해 국부적인 손상이 발생하여 전하전달이 용이해지기 때문에 전류밀도가 순간적으로 증가한 것으로 사료된다. 이러한 현상으로 인해 분극곡선의 형상이 다소 불연속적인 형태를 나타냈다. Sepahi 등은 시플레이션을 통해 전극 간 물질전달과 기포 거동의 상관관계를 연구하였다 [23]. 연구결과, 전극 표면에서의 기포 성장 및 부착은 물질전달을 억제하여 전류밀도를 감소시키는 반면, 기포가 탈착될 경우 미소대류현상이 유발되어 물질전달이 급격히 향상된다고 보고하였다. 본 연구에서 전류밀도가 불균일하게 변화하는 형상은 타연구자의 연구결과와 유사하다. 이는 캐비테이션으로 발생한 다량의 기포가 일시적으로 물질전달을 감소시킨 후, 일정 시점에서 기포가 탈리되면서 미소대류현상이 발생하여 물질전달이 급격히 증가한 것으로 판단된다. 전체적으로 모든 시험편은 개로전위를 기준으로 전위가 귀방향으로 이행하면서 전류밀도가 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 해수 내 대단히 가혹한 캐비테이션 환경에서 관찰되는 금속용해반응에 기인한 것으로 사료된다. 반면, 10분 양극산화한 시험편의 경우, -0.8775 V ~ -0.7966 V 범위에서 전류밀도의 증가량이 지연되었다. 따라서 10분 양극산화한 시험편의 내식성이 가장 우수할 것으로 여겨진다.

Table 3은 하이브리드실험 시 획득한 분극곡선에 대

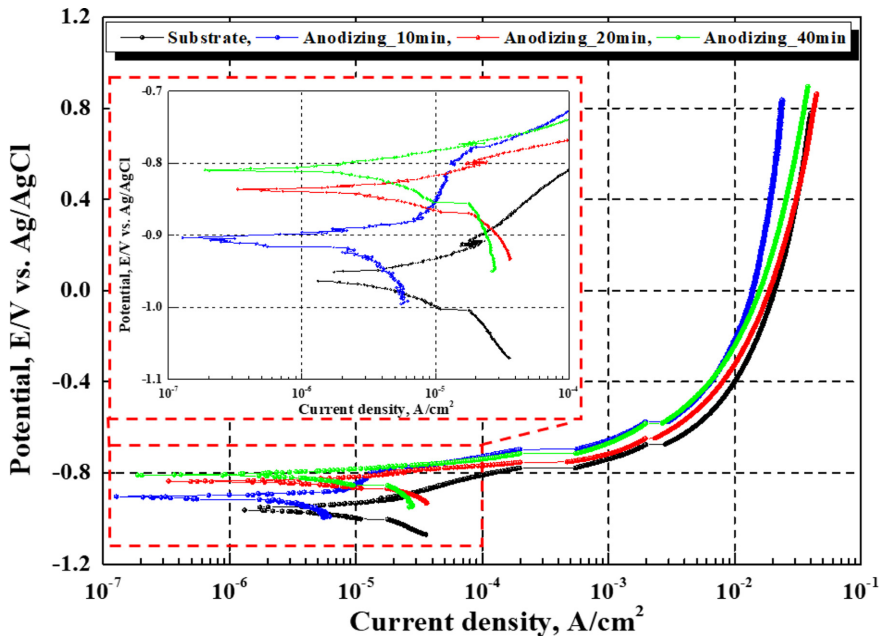


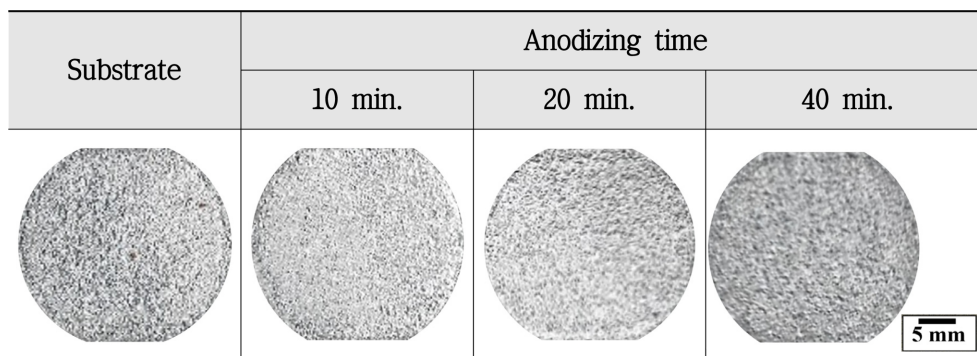
Fig. 2. Polarization curves obtained after hybrid experiment of Al alloy with anodizing time

**Table 3. Results obtained by Tafel extrapolation method for polarization curve after hybrid experiment**

	Substrate	Anodizing time		
		10 min.	20 min.	40 min.
$E_{corr}$ (mV)	-963.703	-903.570	-836.174	-809.085
$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	5.11	2.55	4.88	3.72

하여 타펠외삽법을 통해 산출한 주요 전기화학적 파라미터를 나타낸 것이다. 모재, 양극산화 10분, 20분 및 40분 실시한 시험편의 부식전위는 각각 -963.703, -903.570, -836.174 및 -809.085 mV로 산출되었다. 부식전위는 40분동안 양극산화한 시험편이 가장 높게 관찰되었으며, 모재가 가장 낮게 관찰되었다. 이는 양극산화 시간에 따른 산화피막의 안정화로 활성반응이 다소 억제된 것으로 판단된다 [24]. 그러나 부식전위는 이중 금속 간의 갈바닉 셀에서 부식속도에 영향을 미치는 인자로 단일 금속 실험에서 이를 연구하는 것은 큰 의미를 갖지 않는다. 그리고 모재, 양극산화 10분, 20분 및 40분 실시한 시험편의 부식전류밀도는 각각 5.11, 2.55, 4.88, 3.72  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 나타났다. 부식전류밀도는 10분 양극산화한 시험편이 가장 낮았고, 모재가 가장 높게 산출되었다. 대기 중 형성되는 자연산화피막은 매우 얇고 불안정하여, 캐비테이션 기포 붕괴 시, 발생하는 마이크로제트와 충격파에 의해 쉽게 파괴된다. 그 결과, 금속 표면이 활성상태로 지속적으로 노출되고 염소이온의 침투가 용이하여 부식전류밀도가 가장 높은 것으로 사료된다. 반면, 10분 양극산화한 시험편은 40분 실시한 조건에 비해 산화피막의 경도는 낮으나 인성이 높아 캐비테이션 기포 붕괴 시 충격에 의한 균열 개시와 박리를 상대적으로 억제하여 염소이온에 의한 부식을 감소시킨 것으로 사료된다 [25].

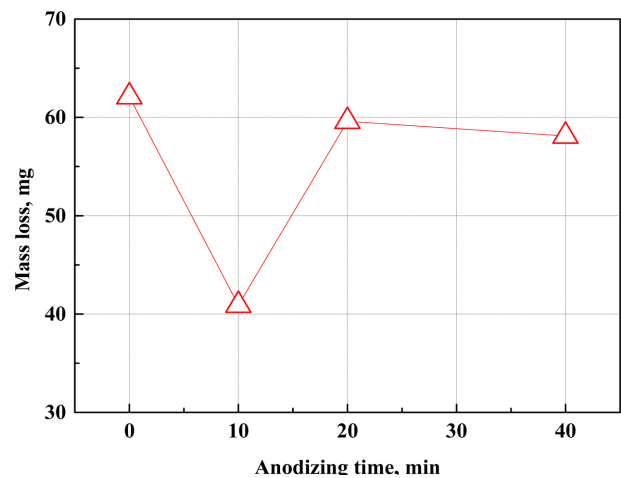
Fig. 3은 양극산화시간에 따른 하이브리드실험 후 손상부의 표면관찰 결과이다. 모재의 표면은 전체적으로



**Fig. 3. Surface observation results after hybrid experiment of Al alloy with anodizing time**

거칠고 불균일한 손상이 관찰되었다. 반면 10분 양극산화한 시험편은 비교적 균일한 형상을 나타냈다. 이는 산화피막이 캐비테이션-침식에 대한 저항성이 우수하여 충격압이 분산된 것으로 여겨진다. 20분 양극산화한 시험편의 표면은 10분에 비해 캐비테이션 기포 붕괴로 인한 손상으로 거칠게 관찰되었다. 또한 40분의 경우, 표면은 캐비테이션-침식환경 하에서의 전기화학적 실험에 따른 복합적인 손상으로 거칠게 관찰되었다. 그러나 시험편 모두 캐비테이션-침식에 의한 손상 흔적이 뚜렷하게 관찰되어 정성적인 내구성 비교가 어려워 정량적인 분석을 실시하였다.

Fig. 4는 하이브리드실험 후 무게감소량 측정 결과이다. 모재의 무게 감소량은 62.1 mg으로 측정되었으며, 10분 양극산화한 시험편에서는 40.9 mg으로 크게 감소하였다. 이는 양극산화 공정에서 형성된 산화피막이 부식과 캐비테이션-침식의 복합환경에 대하여 베리어 효과(barrier effect)를 나타낸 것으로 해석된다. 베리어 효과란 산화피막이 전해질과 금속사이의 물리적 장벽 역



**Fig. 4. Weight loss measurement results after hybrid experiment of Al alloy with anodizing time**

할을 수행한 것이다 [26,27]. 이러한 물리적 장벽은 금속의 용해반응을 지연시키고 캐비테이션 기포 붕괴에 따라 형성되는 국부적 손상을 효과적으로 억제한 것으로 판단된다. 그러나 20분 조건에서의 무게 감소량은 59.6 mg으로 다시 증가하였다. 이는 산화피막의 구조적 변화에 의해 복합환경에서의 내식성 및 내구성이 저하된 것으로 여겨진다. 한편, 40분 양극산화한 시험편의 경우, 무게감소량이 20분 대비 소폭 감소하였으나, 10분 조건에 비해 높은 값을 나타냈다. 이러한 경향은 양극산화시간 경과에 따른 산화피막의 경도는 증가하나, 인성 저하로 인해 손상이 가속화된 것으로 판단된다. 이는 일반적으로 높은 경도의 재료는 미세균열 형성 시, 균열에 대한 에너지 흡수력이 낮아 인성은 감소하기 때문이다 [28]. 반면, 양극산화 40분 수행한 경우, 가장 높은 경도 값을 나타내었으나, 20분 조건의 무게감소량보다 낮게 관찰되었다. 본 연구의 하이브리드 실험은 캐

비테이션-침식실험과 전기화학적 실험을 동시에 진행시키는 복합실험이므로 표면 손상은 기계적 특성과 내식성이 복합적으로 영향을 미친다. 양극산화시간 20분은 인성이 40분보다 상대적으로 높으나 산화피막의 안정성이 낮아 손상이 크게 나타났다. 그러나 40분은 높은 경도임에도 안정된 산화피막 형성으로 내식성이 향상되어 손상이 억제된 것으로 판단된다.

Fig. 5는 하이브리드실험 후 표면거칠기와 최대손상깊이 측정 결과이다. 모재의 표면거칠기와 최대손상깊이는 각각 28.244  $\mu\text{m}$ 와 197.091  $\mu\text{m}$ 로 가장 크게 관찰되었다. 10분 양극산화한 시험편의 표면거칠기와 최대손상깊이는 모재에 비해 각각 13.825  $\mu\text{m}$ 와 103.295  $\mu\text{m}$ 만큼 가장 크게 감소하였다. 반면, 20분 양극산화한 시험편의 경우, 표면거칠기와 최대손상깊이는 10분에 비해 10.968  $\mu\text{m}$ 와 90.975  $\mu\text{m}$ 정도 증가하였다. 또한 40분 양극산화한 시험편의 경우, 20분에 비해 표면거칠기와 최

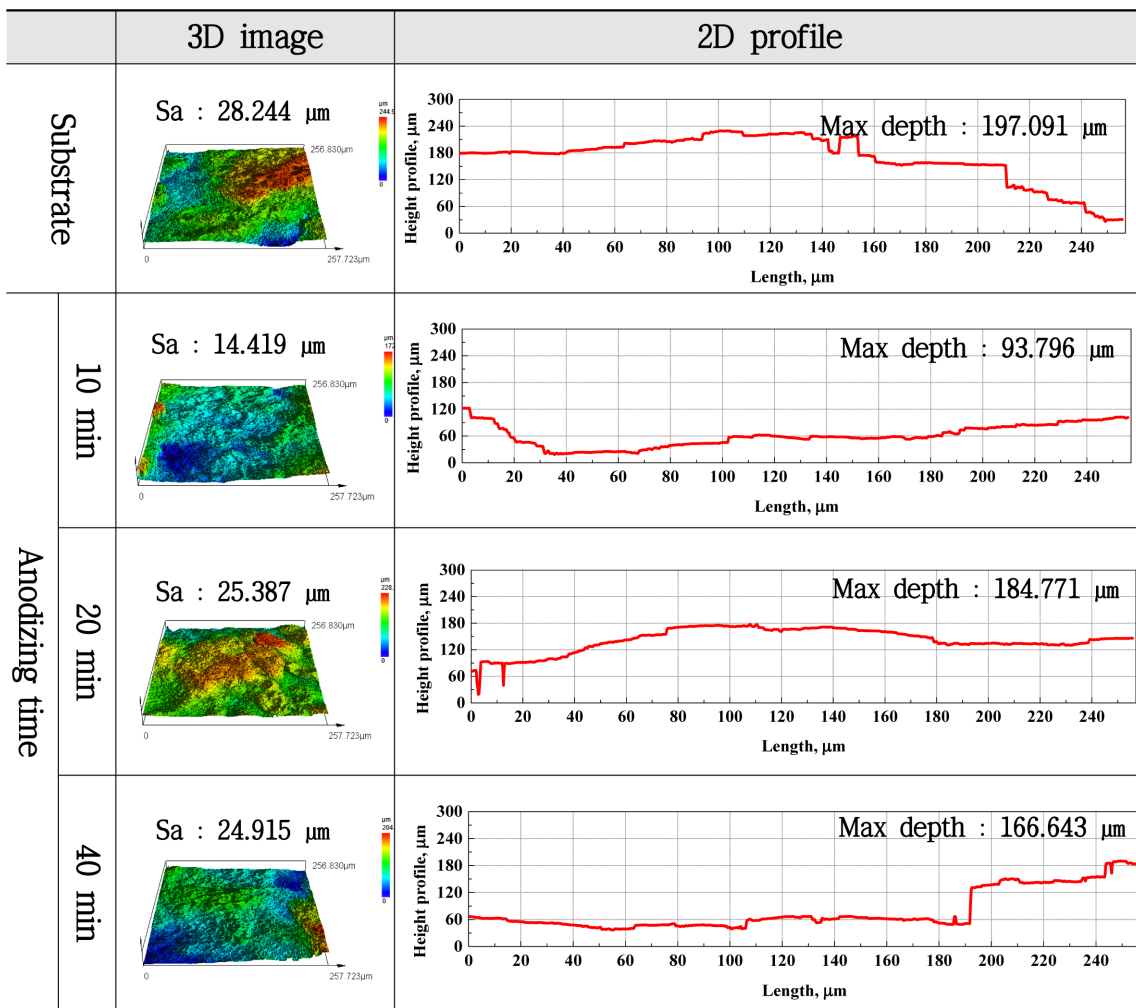


Fig. 5. Surface roughness and maximum damage depth after hybrid experiment of Al alloy with anodizing time

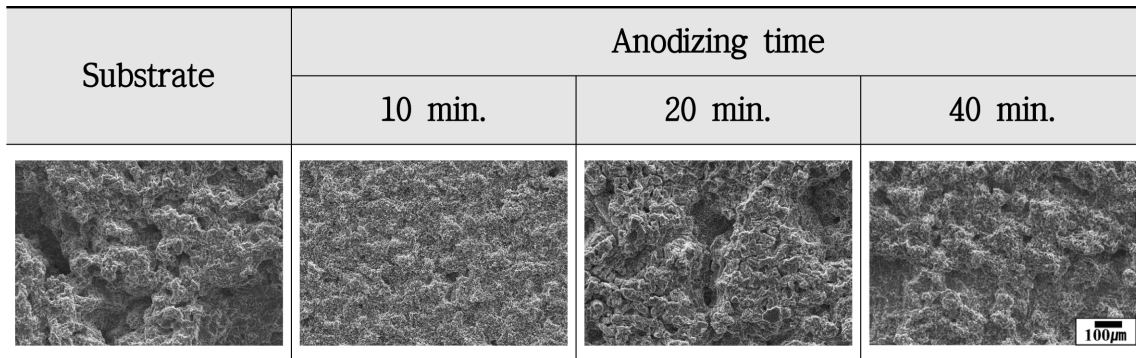


Fig. 6. SEM observation results after hybrid experiment of Al alloy with anodizing time

대손상깊이는 각각 0.472  $\mu\text{m}$ 와 18.128  $\mu\text{m}$  정도 소폭 감소하였다. 이는 여전히 10분 양극산화한 조건 대비 높은 값을 나타내었다. 결과적으로 과도한 양극산화 시간은 오히려 표면손상을 가속화하여 표면거칠기와 최대손상깊이가 증가시키는 원인이 되었다. Lee 등은 알루미늄에 대하여 양극산화를 실시하였으며, 높은 경도는 취성적 거동을 증가시켜, 캐비테이션-침식 저항성을 저하시키는 것으로 보고하였다 [12]. 본 연구에서도 이와 유사한 경향을 나타낸 것으로 사료된다.

Fig. 6은 하이브리드실험 후 주사전자현미경 관찰 결과이다. 모든 시험편은 캐비테이션-침식에 의한 손상이 지배적으로 관찰되었다. 일반적으로 알루미늄 합금 양극분극 시, 면심입방구조(FCC) 특성상 산화반응은 결정방위에 따라 다르게 진행된다 [29]. 이에 따라 결정립계나 특정 면이 선택적으로 용해되어 표면은 다면체형상(Polyhedron morphology)과 같이 각진 형상(Faceted morphology)을 나타낸다. 그러나 하이브리드실험 시, 캐비테이션-침식의 영향으로 각진 형상의 물리적 충격에 의한 손상과 부식에 의해 부드러운 형상을 나타냈다. 특히 모재와 20분 양극산화한 시험편은 국부적인 탈리에 의한 손상이 지배적으로 발생하였다. 반면, 10분 양극산화한 시험편의 경우, 표면손상은 대체적으로 균일하게 발생하였다. 그러나 40분 양극산화한 시험편은 10분에 비해 국부적인 손상이 더 크고 거친 형상이 관찰되었다. 이는 40분 양극산화공정을 실시함에 따라 형성된 산화피막이 초기 염소이온의 부식인자의 침투를 억제시켰으나, 장시간의 캐비테이션 기포 발생 시 형성된 충격이 금속의 부식과 캐비테이션-침식이 동시에 가속화되어 10분에 비해 손상이 큰 것으로 여겨진다.

### 3.3 동전위분극, 캐비테이션-침식실험 및 하이브리드 실험 비교·분석

Fig. 7은 선행 연구결과인 동전위분극실험 [18]과 본

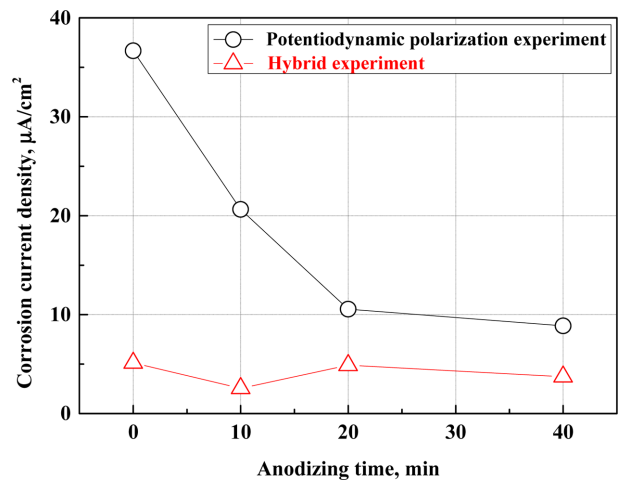


Fig. 7. Comparison of corrosion current densities obtained from polarization curves after potentiodynamic polarization and hybrid experiments

연구에서 수행한 하이브리드실험으로 획득한 분극곡선으로 산출된 부식전류밀도를 비교·분석한 결과이다. 모든 조건에서 하이브리드실험의 부식전류밀도는 동전위분극실험보다 낮게 나타났다. 일반적으로 하이브리드실험에서 캐비테이션 발생 시, 캐비테이션 기포가 붕괴되면서 국부적인 난류와 압력변동으로 유속이 빨라진다 [30]. 이로 인해 전해질 내 용존산소나 부식인자의 이온공급속도가 빨라져 부식전류밀도가 증가하게 된다. 그러나, 본 연구에서는 이와 반대되는 경향이 관찰되었으며, 이는 하이브리드 실험에서 캐비테이션 과정 중 형성되는 기포층이 금속표면을 일시적으로 차단하여 전해질과의 반응 면적을 감소시키고, 그 결과 전류밀도가 작게 측정된 것으로 사료된다. Vogt는 전극에 발생하는 기포와 단위면적당 전류밀도의 상관관계에 대하여 연구하였다 [31]. 연구결과, 전극과 접촉하면서 성장한 기포는 전류전달에 필요한 단위면적 일부를 차단하여 단위면적

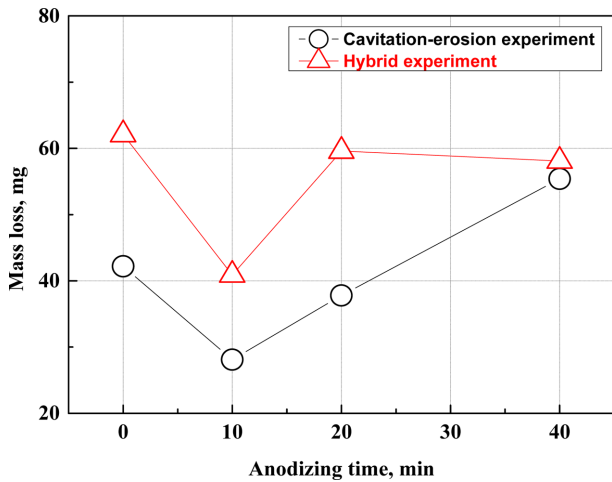
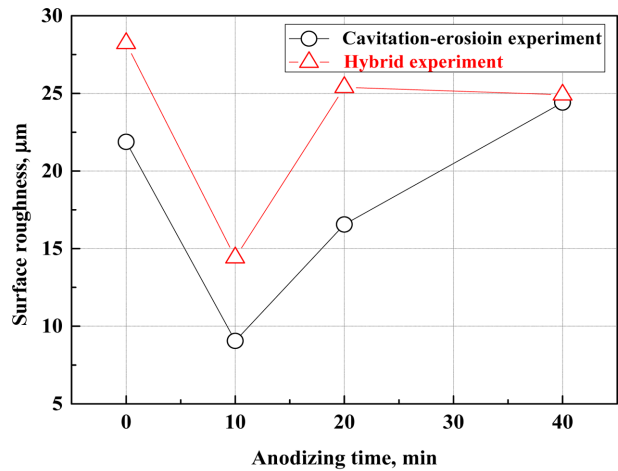


Fig. 8. Comparison of weight loss after cavitation-erosion and hybrid experiments

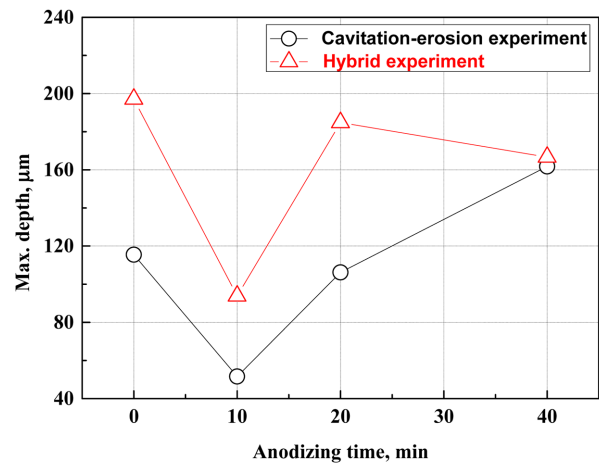
당 전류밀도가 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서는 캐비테이션 현상에 의해 형성된 다량의 기포가 전류밀도 변화에 큰 영향을 미친 것으로 여겨진다.

Fig. 8은 선행 연구결과인 캐비테이션-침식실험 [18]과 본 연구에서 수행한 하이브리드실험 후 무게감소량을 비교한 것이다. 하이브리드실험한 경우의 무게감소량은 전체적으로 캐비테이션-침식실험보다 크게 관찰되었다. 캐비테이션-침식실험은 캐비테이션 기포가 붕괴되면서 발생하는 마이크로제트와 충격파가 주요한 손상 메커니즘으로 작용한다. 반면 하이브리드 실험에서는 물리적 충격과 전기화학적 반응에 따른 용해반응이 서로 시너지 효과로 작용하여 캐비테이션-침식실험보다 무게감소량이 증가한 것으로 사료된다 [32].

Fig. 9는 선행 연구결과인 캐비테이션-침식실험 [18]과 본 연구에서 수행한 하이브리드실험 후 표면거칠기와 최대손상깊이를 비교한 것이다. 무게 감소량 측정결과와 동일하게, 하이브리드실험 후 표면거칠기와 최대손상깊이는 캐비테이션-침식 단독 실험에 비해 전체적으로 더 크게 관찰되었다. 캐비테이션-침식실험에서는 10분 양극산화한 시편이 모재에 비해 우수한 저항성을 나타내어 표면손상이 억제되고, 표면거칠기와 최대손상깊이 모두 감소하였다. 그러나 양극산화시간 증가에 따라 산화피막의 안정화로 경도는 증가하였으나, 인성이 저하되어 표면손상이 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 하이브리드실험에서도 10분 양극산화한 시편은 캐비테이션-침식실험과 동일하게 우수한 경향을 나타냈다. 그러나 40분 양극산화한 시편의 표면거칠기와 최대손상깊이는 20분에 비해 낮게 관찰되었다. 이는 장시간 양극산화공정으로 형성된 높은 경도의 산화피막이 지속적인 물리적 충격에는 취약하나, 전해질 내부



(a) Surface roughness



(b) Maximum damage depth

Fig. 9. Comparison of surface roughness and maximum damage depth after cavitation-erosion and hybrid experiments

식 인자의 침투는 20분 조건보다 효과적으로 억제할 수 있기 때문에 해석된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 합금에 대하여 양극산화공정 시간 변수로 인텐테이션 실험과 하이브리드실험을 수행하였다. 또한, 선행 연구와 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 인텐테이션실험 결과, 표면경도는 양극산화시간 경과에 따라 증가하였다. 이는 산화피막의 두께가 지속적으로 증가하여 외부하중에 대한 저항성이 향상된 것으로 판단된다.
- 2) 하이브리드실험 결과, 캐비테이션-침식 환경에서의 전기화학적 저항성은 10분 양극산화한 조건에서 가장

우수한 결과를 나타냈다.

3) 하이브리드 실험 후 표면형상 관찰 결과, 표면손상은 전기화학적 반응에 의해 결정립계나 특정 면이 선택적으로 용해되는 형상이 아니라, 물리적 충격에 의한 손상과 부식에 의해 부드러운 형상이 관찰되었다.

4) 하이브리드 환경에서의 저항성이 가장 우수한 조건은 캐비테이션-침식실험 결과와도 일치하였다. 이는 하이브리드 환경에서의 손상거동이 전기화학적 요인보다 캐비테이션-침식에 따른 물리적 영향에 더 크게 지배됨을 의미한다.

## 감사의 글

본 논문은 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-14-002). 또한, 2025년 전라남도과 전남테크노파크의 「전남 소재 부품뿌리산업 연구개발대행 원스톱 지원사업」의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

1. K. V. Shankar, J. Jezierski, V. V. Ramalingam, D. Padmakumar, M. R. Leena, A. Amal, G. Reghunath, and R. Krishnan, Investigating the effect of fly ash addition on the metallurgical and mechanical behavior of Al-Si-Mg-Cu alloy for engine cylinder head application, *Materials*, **15**, 5462 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma15155462>
2. S. K. Tiwari, S. Soni, R. S. Rana, and A. Singh, Effect of heat treatment on mechanical properties of aluminium alloy-fly ash metal matrix composite, *Materials Today: Proceedings*, **4**, 3458 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.235>
3. I. C. Park, H. K. Hwang, D. H. Shin, and S. J. Kim, Electrochemical and cavitation-erosion properties in natural seawater of cast aluminum alloys, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 437 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2024.23.5.437>
4. S. Thomesen, O. S. Hopperstad, and T. Børvik, Anisotropic plasticity and fracture of three 6000-series aluminum alloys, *Metals*, **11**, 557 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/met11040557>
5. S. B. Kim, D. H. Kim, J. W. Kang, and others, Role of ultrasonic melt treatment in the improvement of corrosion resistance of Al-7Si-0.4Mg cast alloy, *Metals and Materials International*, **29**, 705 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01252-2>
6. M. A. Manjunath, P. Vinod, N. Balashanmugam, and M. R. Sankar, Abrasive flow finishing for surface roughness improvement of aluminum propeller: A case study, *Materials Today: Proceedings*, **26**, 1113 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.223>
7. J. S. Kim and C. Y. Jeong, Investigation of functional 6061 aluminum alloy oxide film with anodization voltage and its corrosion resistance, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 399 (2023). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2023.22.6.399>
8. G. S. Choi, Y. M. Kim, and C. J. Park, Effects of corrosion inhibitor on corrosion of Al-based alloys in ethylene glycol-water coolant environment, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 305 (2023). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2023.22.5.305>
9. H. S. Heo and S. J. Kim, Effect of cavitation amplitude on the electrochemical behavior of super austenitic stainless steels in seawater environment, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 138 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2022.21.2.138>
10. Y. J. Yang and S. J. Kim, Investigation on cavitation-erosion damage with the cavitation amplitude of Al alloy materials in seawater, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 250 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2020.19.5.250>
11. I. C. Park and S. J. Kim, Cavitation erosion behavior in seawater of electroless Ni-P coating and process optimization using Taguchi method, *Applied Surface Science*, **477**, 37 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.033>
12. S. J. Lee, J. H. Lee, and S. J. Kim, Effect of solution temperature for Al alloy anodizing on cavitation characteristics, *Corrosion Science and Technology*, **14**, 140 (2015). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2015.14.3.140>
13. J. Fahim, S. M. M. Hadavi, H. Ghayour, and S. A. Hasanzadeh Tabrizi, Cavitation erosion behavior of superhydrophobic coatings on Al5083 marine aluminum alloy, *Wear*, **424-425**, 122 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.017>
14. C. A. Grubbs, Anodizing of aluminum, *Metal Finishing*, **97**, 476 (1999). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(99\)80049-X](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(99)80049-X)
15. E. Dervishi, M. McBride, R. Edwards, M. Gutierrez, N. Li, R. Buntyn, and D. E. Hooks, Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions, *Surface and Coatings Technology*, **444**, 128652 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128652>

16. J. M. Jeon, Y. R. Yoo, M. J. Jeong, Y. C. Kim, and Y. S. Kim, Effect of solution temperature on the cavitation degradation properties of epoxy coatings for seawater piping, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 335 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2021.20.6.335>
17. I. C. Park, Influence of shot peening on cavitation erosion resistance of gray cast iron, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 143 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2021.20.3.143>
18. H. K. Hwang and S. J. Kim, Effect of Anodizing Time on the Corrosion and Cavitation–Erosion Resistance of Al–Mg–Si Aluminum Alloy in Marine Environments, *Corrosion Science and Technology*, **24**, 393 (2025). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2025.24.5.393>
19. H. K. Hwang, D. H. Shin, and S. J. Kim, Hydrogen embrittlement characteristics by slow strain rate test of aluminum alloy for hydrogen valve of hydrogen fuel cell vehicle, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 503 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.6.503>
20. W. C. Oliver and G. M. Pharr, Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology, *Journal of Materials Research*, **19**, 3 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
21. W. Lu, J. Wu, J. Liu, X. Yi, Q. Zhang, Y. Chen, J. Li, and Q. Fang, Creep behavior and deformation mechanism of aluminum alloy: integrating multiscale simulation and experiments, *Symmetry*, **17**, 1146 (2025). Doi: <https://doi.org/10.3390/sym17071146>
22. T. M. Naief and K. H. Rashid, Comparative study for anodizing aluminum alloy 1060 by different types of electrolytes solutions, First Scientific Conference on Modern Technologies in Oil & Gas Refining, 1, 10-16 (2011). <https://www.uotechnology.edu.iq/dep-chem-eng/PAPERS/taleb%20kaled%20h%20x.pdf>
23. F. Sepahi, R. Verzicco, D. Lohse, and D. Krug, Mass transport at gas-evolving electrodes, *Fluid Mechanics*, **983**, A19 (2024). Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.13113>
24. D. H. Shin, H. K. Hwang, K. H. Jung, and S. J. Kim, Effect on anodizing oxide film for aluminum 6061-T6 alloy on corrosion and stress corrosion cracking in seawater, *Journal of The Korean Institute of Surface Engineering*, **53**, 219 (2020). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2020.53.5.219>
25. D. Istrate, I. Bordeasu, B. Ghiban, B. Istrate, B.-G. Sbarcea, C. Ghera, A. N. Luca, P. O. Odagiu, B. Florea, and D. Gubencu, Correlation between mechanical properties—structural characteristics and cavitation resistance of rolled aluminum alloy type 5083, *Metals*, **13**, 1067 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/met13061067>
26. M. Hou, C. Pan, M. Wang, D. H. Xia, Z. Qin, and W. Hu, Improving the cavitation corrosion resistance of 6061 aluminum alloy by anodizing, *Electrochimica Acta*, **503**, 144890 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144890>
27. C. Pan, Y. Behnamian, Y. Guo, Z. Qin, W. Hu, D. H. Xia, and B. Tribollet, Cavitation erosion of the AA7050 aluminum alloy in 3.5 wt% NaCl solution—Part 2: an impedance investigation of the effect of cavitation intensity on interfacial states, *Corrosion Science*, **251**, 112936 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112936>
28. A. W. Zia, Z. Zhou, P. W. Shum, and L. K. Y. Li, The effect of two-step heat treatment on hardness, fracture toughness, and wear of different biased diamond-like carbon coatings, *Surface and Coatings Technology*, **320**, 118 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.089>
29. J. Y. Lee and E. Lee, Crystallographic orientation-dependent corrosion behavior of aluminum under residual stress, *Materials Characterization*, **205**, 113310 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113310>
30. M. Liu, L. Tan, and S. Cao, Cavitation–vortex–turbulence interaction and one-dimensional model prediction of pressure for hydrofoil ALE15 by large eddy simulation, *Journal of Fluids Engineering*, **141**, 021103 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1115/1.4040502>
31. A. H. Vogt, The quantities affecting the bubble coverage of gas-evolving electrodes, *Electrochimica Acta*, **235**, 495 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.116>
32. H. K. Hwang and S. J. Kim, Electrochemical characteristics with cavitation amplitude under cavitation erosion of 6061-T6 in seawater, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 318 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.6.318>