

해양환경에서 Al-Mg-Si 알루미늄 합금의 부식 및 캐비테이션-침식 저항성에 미치는 양극산화시간의 영향

황현규¹ · 신동호² · 김성종^{3,†}

¹한국과학기술원 원자력 및 양자공학과, 대전광역시 유성구 대학로 291

²국립목포해양대학교, 전라남도 목포시 해양대학로 91

³국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91
(2025년 10월 12일 접수, 2025년 10월 23일 수정, 2025년 10월 24일 채택)

Effect of Anodizing Time on the Corrosion and Cavitation–Erosion Resistance of Al-Mg-Si Aluminum Alloy in Marine Environments

Hyun-Kyu Hwang¹, Dong-Ho Shin², and Seong-Jong Kim^{3,†}

¹Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Republic of Korea

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

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

(Received October 12, 2025; Revised October 23, 2025; Accepted October 24, 2025)

In this investigation, anodizing of aluminum alloy was conducted at a current density of 20 mA/cm² in a 10 vol.% sulfuric acid solution at 10 °C for durations of 10, 20, and 40 minutes. The electrochemical characteristics and cavitation-erosion behavior of the anodized specimens in natural seawater were examined in relation to anodizing time. In a static seawater environment, results from the potentiodynamic polarization experiments indicated that the corrosion current density decreased with longer anodizing times. This improvement in corrosion resistance is attributed to the increasing thickness of the oxide film, which slows or blocks the rate at which chloride ions—corrosive agents in seawater—reach the base material. The cavitation-erosion experiment revealed that the maximum damage depth of the specimen anodized for 10 minutes was reduced by 63.903 μm compared to the uncoated base material. However, while the thickness of the oxide film increased for the specimen anodized for 40 minutes, its higher brittleness diminished the toughness necessary to prevent crack formation and propagation, ultimately weakening its resistance to cavitation and erosion.

Keywords: Aluminum, Propeller, Anodizing, Corrosion, Cavitation-erosion

1. 서론

6000계열 알루미늄은 Al-Mg-Si계 합금으로서 용체화 처리 후 인공시효 과정을 거쳐 기계적 강도와 가공성이 우수하여 내식성과 내구성이 우수하다 [1,2]. 이에 따라 소형 선박의 선체뿐만 아니라 프로펠러 소재로도 활용되고 있다 [3]. 그러나 알루미늄 합금은 대기 중 얇은 산화피막을 형성하여 일정 수준의 내식성을 나타내지만,

해양환경에서는 염소이온에 의해 산화피막이 파괴되어 공식이나 틈부식과 같은 손상이 발생한다 [4,5]. 특히 고속운항 중 프로펠러는 회전에 따른 유동현상으로 국부적인 압력 강하가 빈번히 발생한다. 이 과정에서 형성된 기포가 붕괴되면서 강력한 마이크로 제트와 충격파를 발생시킨다 [6]. 이러한 반복적인 충격은 프로펠러 표면에 심각한 침식손상을 발생시켜, 장기간 노출 시 파손을 유발할 수 있다. 따라서 해양환경에서의 부식 및 캐비테이션-침식이 복합적으로 작용하는 거동은 프로펠러의 수명을 결정짓는 핵심요인 중 하나이다.

[†]Corresponding author: ks@mmu.ac.kr

황현규: 박사후연구원, 신동호: 박사후연구원, 김성종: 교수

기존 연구에서는 5000과 6000계열 등 다양한 알루미늄 합금에 대하여 캐비테이션 진폭과 시간 변수에 따른 침식 특성을 연구하였으며, 일부 합금은 상대적으로 우수한 캐비테이션-침식 저항성을 나타내었다 [7-9]. Yang 등은 5000과 6000계열 알루미늄 합금에 대하여 진폭과 시간변수로 캐비테이션-침식실험을 실시하였다 [7]. 실험결과, 30 μm 의 진폭에서 30분 동안 캐비테이션-침식 실험 후 무게감소량은 30~40 mg으로 산출되었다. Park 등은 Zn, Cu 및 Mg 함량을 높인 고강도 알루미늄에 대하여 캐비테이션-침식실험 결과, 기존 사용된 알루미늄 합금보다 캐비테이션-침식 저항성이 개선되었다고 보고하였다 [8]. Pan 등은 7000계열 알루미늄에 대하여 일정시간 침지 후, 캐비테이션-침식실험을 수행하였으며, 부식환경에서 침지하여 형성된 산화층이 캐비테이션 충격을 완화시킨다고 보고하였다 [9]. 기존 연구는 대부분 알루미늄 합금 종류에 따른 캐비테이션-침식 거동을 연구하였다. 그러나 대부분의 경우, 캐비테이션-침식 환경에 장시간 노출 시 표면 탈리, 크레이터 형성 및 균열이 가속화되어 프로펠러 재료의 신뢰성 확보에 한계가 발생할 수 있다. 따라서 장기간 노출된 캐비테이션-침식 환경에서도 내구성을 향상시킬 수 있는 다양한 기술 개발이 필요하다.

이러한 관점에서 표면개질기술은 프로펠러 내구성 향상을 위한 중요한 대안이며, 이를 통해 내식성, 경도 및 내마모성 등 다양한 특성을 개선할 수 있다 [10]. 특히 알루미늄 합금에 적용되는 양극산화기술은 표면에 치밀하고 높은 경도의 양극산화피막을 형성하여 내식성과 내마모성을 동시에 향상시킬 수 있다 [11]. 그러나 양극산화시간에 따라 산화피막의 두께와 기계적 특성이 변하며, 경도 향상과 인성 저하 간의 상충관계가 존재한다 [11]. 따라서 지나치게 두꺼운 산화피막은 초기 충격하중을 억제할 수 있으나, 반복적인 캐비테이션-침식에 따른 피로하중에 취약하여 손상될 수 있다. 따라서 양극산화조건 최적화 연구는 프로펠러의 장기 내구성 확보를 위한 핵심요인이다.

본 연구에서는 알루미늄 합금에 대하여 양극산화시간을 변수로 산화피막을 형성시킨 후, 전기화학적 실험과

캐비테이션-침식실험을 실시하였다. 전기화학적 실험으로 산화피막 특성과 내식성 간의 상관관계를 비교 분석하였으며, 캐비테이션-침식실험을 통해 캐비테이션의 반복적인 충격에 따른 표면손상 거동을 규명하였다. 따라서 본 연구는 양극산화시간에 따른 산화피막 특성, 내식성과 내구성에 미치는 영향을 종합적으로 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편과 양극산화공정

Table 1은 본 연구에 사용된 알루미늄 합금의 화학적 조성과 기계적 특성을 나타낸 것이다. 이는 Si 함량이 약 0.3104 %인 Al-Mg-Si계 알루미늄 합금이다. 또한 우수한 주조성과 형상 안정성을 바탕으로 복잡한 형상 제작이 가능하며, 경질의 Si 상에 의해 내마모성이 향상된다. 또한 Mg와 Mn첨가로 기계적 강도가 우수하다 [12]. 이러한 특성으로 인해 알루미늄 합금(Al-Mg-Si)은 소형선박용 프로펠러에 요구되는 내식성과 내마모성 확보에 적합하다. 시험편 준비는 냉각수가 공급되는 미세 절단기로 열변형을 최소화하여 2.5 cm \times 2.5 cm로 가공하였다. 가공된 시험편은 6.25 cm²의 노출면적이 되도록 에폭시 레진으로 마운팅하였다. 이후 에머리페이퍼 # 2000까지 단계적으로 기계연마하였다. 연마한 시험편은 아세톤과 증류수로 초음파 세척하였다.

알루미늄 양극산화공정은 포텐시오/갈바노스타트 (Interface 3000, GAMRY instrument)를 사용하여 10 °C의 10 vol.% 황산용액에서 20 mA/cm²의 전류밀도로 10, 20 그리고 40분 동안 실시하였다. 이는 3-전극 셀을 구성하여 실시하였으며, 상대전극과 기준전극은 각각 백금과 은/염화은(Ag/AgCl) 전극을 사용하였다. 양극산화된 알루미늄 합금은 상온의 천연해수에서 동전위분극실험과 캐비테이션-침식실험을 실시하였다. 천연해수의 화학적 조성과 특성은 Table 2에 나타내었다. 또한 각각의 실험 후 표면은 3D 공초점 레이저 현미경(OLS5000 LEXT, OLYMPUS^{STM})과 주사전자현미경(SNE-4500M Plus, SEC)으로 분석하였다.

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

Table 2. Chemical composition and properties of sea water

Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺			
1746	15721	8401	344	1121	357	7.9	16.1	45.3

2.2 전기화학적 실험

전기화학적 실험은 양극산화공정과 동일한 포텐시오/갈바노스타트, 상대전극 및 기준전극을 사용하였다. 전기화학적 실험은 동전위분극실험을 실시하였으며, 1 시간 안정화시킨 후 개로전위기준 -0.25 V에서 1.6 V까지 1 mV/sec의 주사속도로 실시하였다. 동전위분극실험 후 획득한 분극곡선에 대하여 타펠외삽법에 의해 부식전위와 부식전류밀도를 산출하였다.

2.3 캐비테이션-침식실험

캐비테이션-침식실험은 ASTM-G32 규정(Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus)에 준용하는 진동발생 장치로 압전효과(Piezo electric)를 발생시켜 캐비테이션-침식 환경을 구현하였다. 사용된 장비는 60 Hz, 220 V 전원을 공급하여 원추형 혼을 축방향으로 진동시켜 인위적으로 재료표면에 캐비테이션 충격을 가한다. 이때 진동은 20 kHz로 유지시켰으며, 캐비테이션 진폭은 정진폭 자동제어 방법으로 일정하게 유지하였다. 시편과 혼은 1 mm의 간극을 유지하였다. 실험은 30 μm의 캐비테이션 진폭으로 31분 동안 실시하였다. 캐비테이션-침식실험 시간을 31분으로 설정한 이유는 전기화학적 실험과 캐비테이션-침식실험 종료시간을 동일하게 설정하기 위함이다. 이에 따라 두 실험 조건에서의 시험편을 상호 비교·분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전기화학적 특성 연구

Fig. 1은 천연해수에서 양극산화시간에 따른 알루미늄 합금의 동전위분극곡선을 나타낸 것이다. 모든 시험편은 개로전위를 기준으로 전위가 귀방향으로 이행하면서 전류밀도가 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이것은 해수환경에서 양극산화시간에 따라 생성된 산화피막의 파괴 후, 금속용해반응($Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$)에 기인한 것으로 사료된다. 양극분극 영역에서 가장 높은 전류밀도는 모재로 나타났으며, 그 다음으로 10분, 20분 그리고 40분 동안 양극산화한 시험편 순으로 관찰되었다. Naief 등은 양극산화공정 시간에 따라 산화피막의 두께가 증가한다고 보고하였다 [13]. 이는 페러데이 법칙인식 (1)에 기인하여 산화피막의 두께가 전하량에 비례하

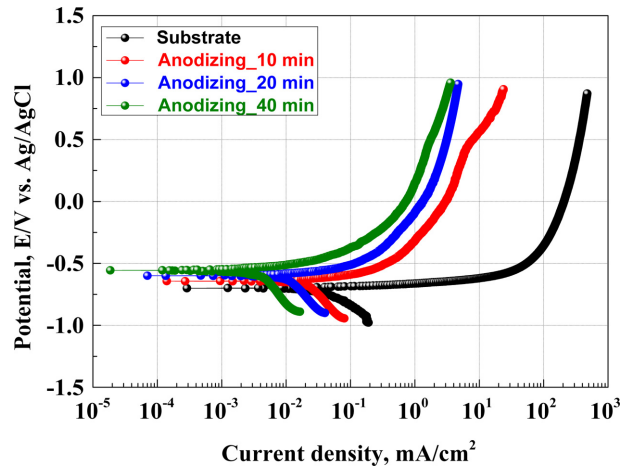


Fig. 1. Potentiodynamic polarization curves of Al alloy with anodizing time at room temperature

기 때문이다. 결과적으로 산화피막은 양극산화시간 증가에 따른 누적 전하량의 증가로 두꺼워진다.

$$m = \frac{M \times I \times t}{n \times F} \quad (1)$$

m : 전극에 용해된 물질의 질량 (g), M : 물질의 몰질량 (g/mol), I : 전류(A), t : 시간(s), n : 산화/환원에 관여한 전자수, F : 페러데이 상수

따라서 본 연구에서도 양극산화시간 증가에 따른 산화피막 두께 증가로 내식성이 향상된 것으로 사료된다. 산화피막 두께가 증가할 경우, 해수 내 부식인자인 염소이온(Cl⁻)이 모재에 도달하는 속도가 늦춰지기 때문이다.

Table 3은 동전위분극곡선에 대하여 타펠외삽법에 의해 구한 주요 전기화학적 파라미터를 나타낸 것이다. 모재, 10분, 20분 및 40분 양극산화한 시험편의 부식전위는 각각 -701.459, -644.283, -606.204 및 -557.509 mV로 산출되었다. 또한 부식전위는 40분 동안 양극산화한 시험편이 가장 높게 관찰되었으며, 그 다음 20분, 10분 및 모재로 관찰되었다. 일반적으로 부식전위는 금속이 산화되기 쉬운 경향성을 나타내는 지표로 비방향의 값에 따라 산화반응이 활발한 특성을 나타낸다 [14]. 그러나 부식전위는 서로 다른 금속 간의 갈바닉 셀형성 시 부식속도에 큰 영향을 주는 인자이므로 개별적인 실험에서는 이를 비교·분석하는 것은 큰 의미를 갖지 않는다.

Table 3. Results obtained by Tafel extrapolation method for potentiodynamic polarization curve

	Substrate	Anodizing time		
		10 min.	20 min.	40 min.
E_{corr} (mV)	-701.459	-644.283	-606.204	-557.509
I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	36.671	20.640	10.549	8.86

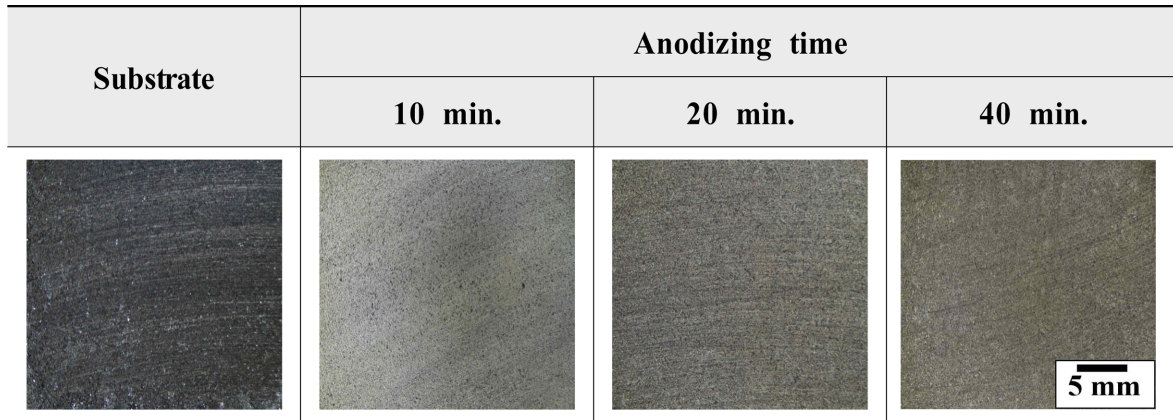


Fig. 2. Surface observation results after potentiodynamic polarization experiment of Al alloy with anodizing time at room temperature

또한 모재, 10분, 20분 및 40분 양극산화한 시험편의 부식전류밀도는 각각 36.671, 20.640, 10.549 및 8.86 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 산출되었다. 부식전류밀도는 모재, 10분, 20분 및 40분 양극산화한 시험편 순으로 높게 관찰되었다. 부식전류밀도는 부식환경에 노출될 경우, 단위 시간당 흐르는 부식반응전류의 크기를 나타내며, 내식성을 비교하는 지표로 사용된다. 결과적으로 양극산화시간 증가에 따라 부식전류밀도가 감소하는 경향을 나타내어 내식성이 우수해지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 양극산화피막은 다공층(Porous layer) 구조로 성장하며, 전해질 성분배에 따라 그 구조의 차이가 발생하고, 표면의 수직 방향을 따라 육각기둥배열로 성장한다 [15]. 초기 양극산화공정 시 산화피막 내 공극은 불규칙적이고, 육각기둥 배열이 정렬되지 않은 상태이므로 산화피막은 불안정할 수 있다. 이에 따라 양극산화시간 증가에 따라 산화피막의 두께가 증가하면서 전기화학적으로 안정화되어 내식성이 증가하게 된다.

Fig. 2는 천연해수에서 양극산화시간에 따른 알루미늄 합금의 동전위분극실험 후 표면관찰결과이다. 동전위분극실험 후 모든 시험편은 천연해수에서 일반적으로 발생할 수 있는 주요 손상인 현저한 공식은 관찰되지 않았다. 반면, 양극산화시간에 따라 표면색상은 변화하였다. 일반적으로 산화피막의 두께와 조성 변화에 따라 표면의 미세한 색조차이를 유발할 수 있다. 본 연구에서는

동일한 전해질에서 알루미늄 산화피막을 형성시켰으므로 산화피막 두께에 따른 색의 변화로 판단된다. 초기 10분 동안 양극산화한 시험편은 얇은 산화피막으로 다소 옅은 회백색에 가까운 색을 나타냈다. 그러나 시간 경과에 따라 이는 점차 짙은 황갈색으로 변하는 것을 알 수 있다. Afsin 등은 알루미늄 합금의 양극산화에 따른 착색 메커니즘을 규명하였으며, 표면색상은 양극산화층 두께 증가에 따라 어두운 갈색으로 변한다고 보고하였다 [16]. 본 연구에서도 산화피막의 두께 증가에 따라 표면색이 점차 어두워지는 경향을 나타냈으며, 이는 부식저항성 향상과 연관이 있는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 천연해수에서 양극산화시간에 따른 알루미늄 합금의 동전위분극실험 후 표면거칠기와 최대손상깊이 측정결과이다. 일반적으로 부식손상이 클수록 금속표면의 산과 골의 높이차가 커져 표면거칠기와 최대손상깊이는 증가한다. 모재의 표면거칠기와 최대손상깊이는 각각 3.317 μm 과 31.227 μm 로 가장 크게 관찰되었다. 반면, 40분 동안 양극산화한 시험편의 표면거칠기와 최대손상깊이는 각각 0.893 μm 과 5.615 μm 로 가장 작게 관찰되었다. 이러한 경향은 동전위분극곡선 및 부식전류밀도 결과와 동일하게 나타났다. 반면, 2D 프로파일에서 광학현미경으로 관찰되지 않은 모재의 공식손상이 뚜렷하게 관찰되었다. 일반적으로 공식은 입구가 좁고, 깊이방향으로 손상이 증가하는 형상을 나타낸다 [17].

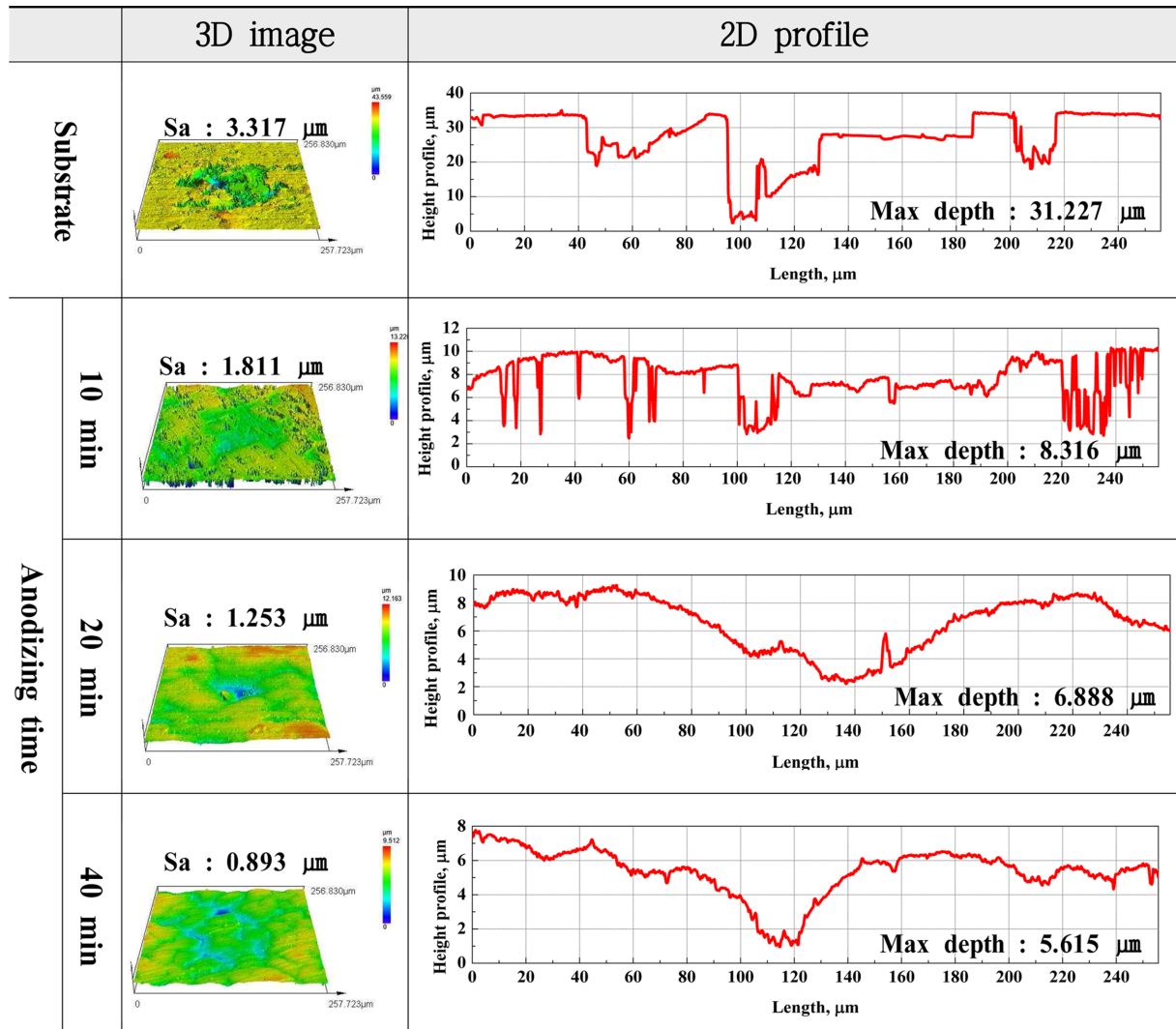


Fig. 3. Surface roughness and maximum damage depth after potentiodynamic polarization experiment of Al alloy with anodizing time at room temperature

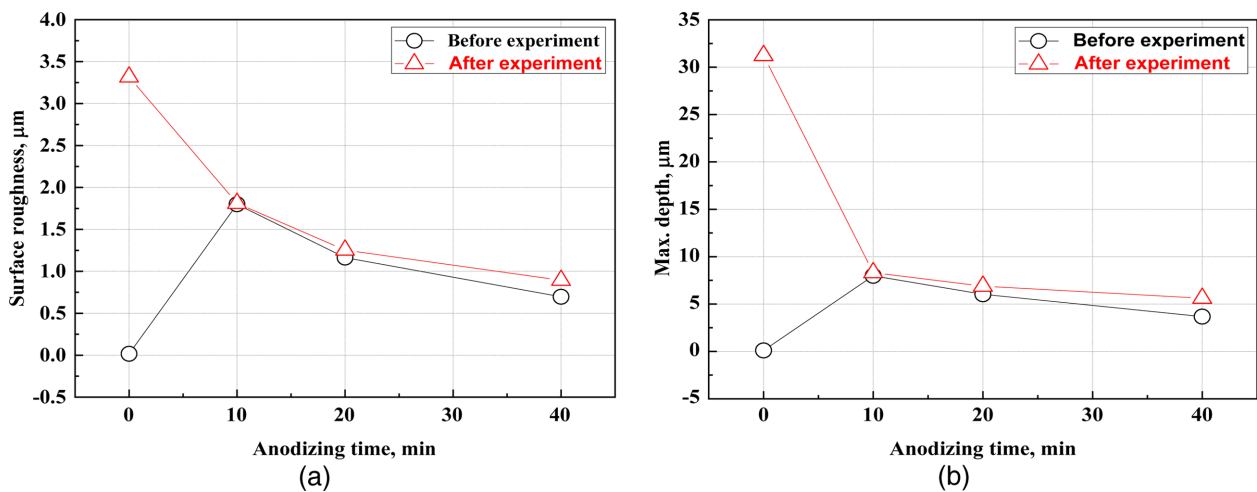


Fig. 4. Comparison graph of surface roughness and maximum damage depth after potentiodynamic polarization experiment of Al alloy with anodizing time at room temperature

이에 따라 저배율로 관찰한 광학현미경에서 좁은 손상 입구가 뚜렷한 명암대비를 발생시키지 않아 손상식별에 어려움이 있는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 동전위분극실험 전과 후 표면거칠기와 최대 손상깊이를 비교한 그래프이다. 실험 후 표면거칠기와 최대손상깊이는 양극산화시간 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 양극산화 시간경과에 따라 산화피막의 구조는 점차 안정되어 내식성이 증가하는 것을 의미한다. 모재의 경우, 실험 전과 후 표면거칠기와 최대손상깊이 차이가 가장 크게 관찰되었다. 또한 양극산화한 시험편은 실험 전과 후의 차이가 양극산화 시간경과에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 양극산화시간에 따라 내식성이 증가하여 표면 거칠기와 최대손상깊이는 감소하였으나, 산화피막의 구조적 안정화로 실험 전 표면거칠기와 산과 골의 높이차가 감소하였기 때문이다.

3.2 캐비테이션-침식 특성 연구

Fig. 5는 양극산화시간에 따라 30 μm의 진폭에서 31 분 동안 캐비테이션-침식실험 후 손상부의 표면관찰결과이다. 모든 시험편에서 캐비테이션 손상흔적이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 캐비테이션 현상에 의한 충격압의 영향이 전반적으로 고르게 분포함을 의미한다. 그러나 실제현미경과 같은 거시적 분석으로 상호 손상 정도와 특성을 비교하기 어려워 무게감소량 측정, 3D 레이저 현미경 그리고 주사전자현미경 분석을 실시하였다.

Fig. 6은 캐비테이션-침식실험 후 무게감소량 측정 결과이다. 실험 후 모재, 양극산화 10분, 20분 그리고 40분 조건에서의 무게감소량은 각각 42.2, 28.1, 37.8 그리고 55.4 mg으로 산출되었다. 10분 양극산화한 시험편이 캐비테이션-침식 저항성이 가장 우수하였으나, 40분의 경우 경도는 가장 높았으나, 캐비테이션-침식 저항성은

가장 낮았다. 일반적으로 높은 경도의 표면은 소성변형에 대한 저항성이 높다 [18]. 이에 따라 외부충격에 대하여 소성변형을 억제하며, 손상깊이가 적어진다. 그러나 본 연구의 캐비테이션-침식실험은 액체 속 기포가 붕괴하여 국부적으로 매우 높은 운동에너지를 표면에 전달하는 마이크로 제트(Micro-jet)를 형성한다 [19]. 이러한 국부 충격파의 지속적인 형성은 표면에 대한 피로 누적을 유발하여 미세균열을 야기시킨다. 이러한 균열은 점차 진전하여 손상을 초래한다. 표면경도가 높은 경우, 취성적인 특성이 강하여 균열형성 및 전파를 억제시키는 인성(toughness)이 부족하여 충격하중에 취약해진 것으로 사료된다 [20]. Lee 등은 알루미늄에 대하여 양극산화를 실시하였으며, 15 °C 조건에서 가장 높은 경도를 나타내었다. 그러나 이는 높은 경도에 따른 취성적인 특성에 기인하여 캐비테이션-침식 저항성은 오히려

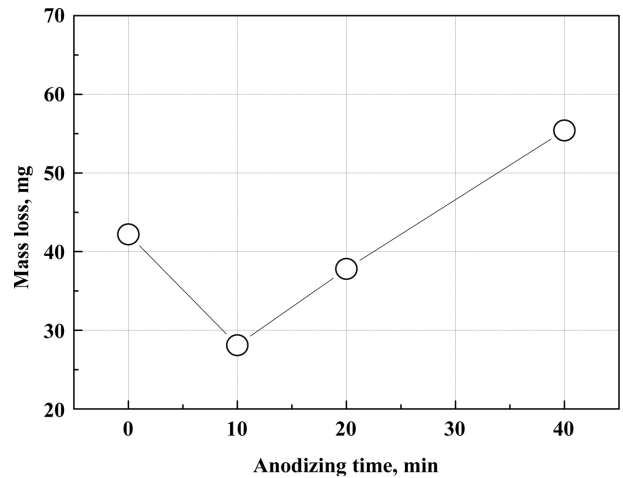


Fig. 6. Weight loss measurement results after cavitation-erosion experiment of Al alloy with anodizing time at room temperature

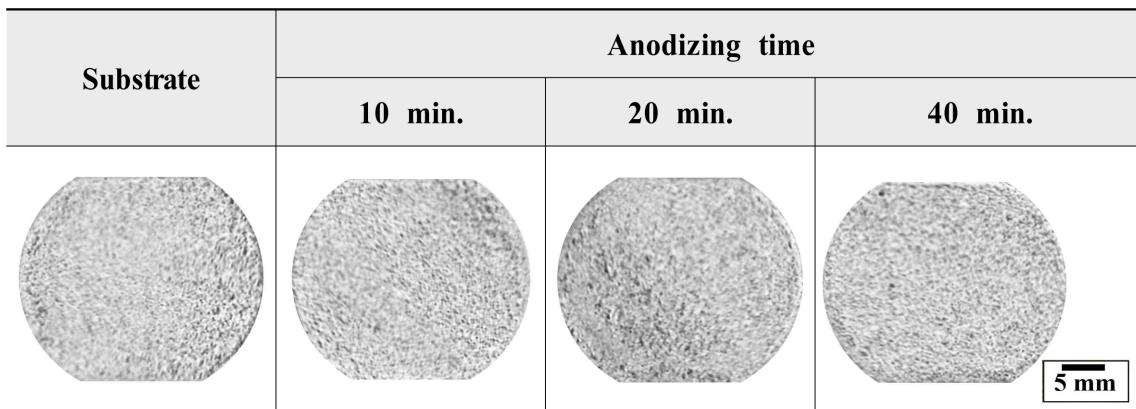


Fig. 5. Surface observation results after cavitation-erosion experiment of Al alloy with anodizing time at room temperature

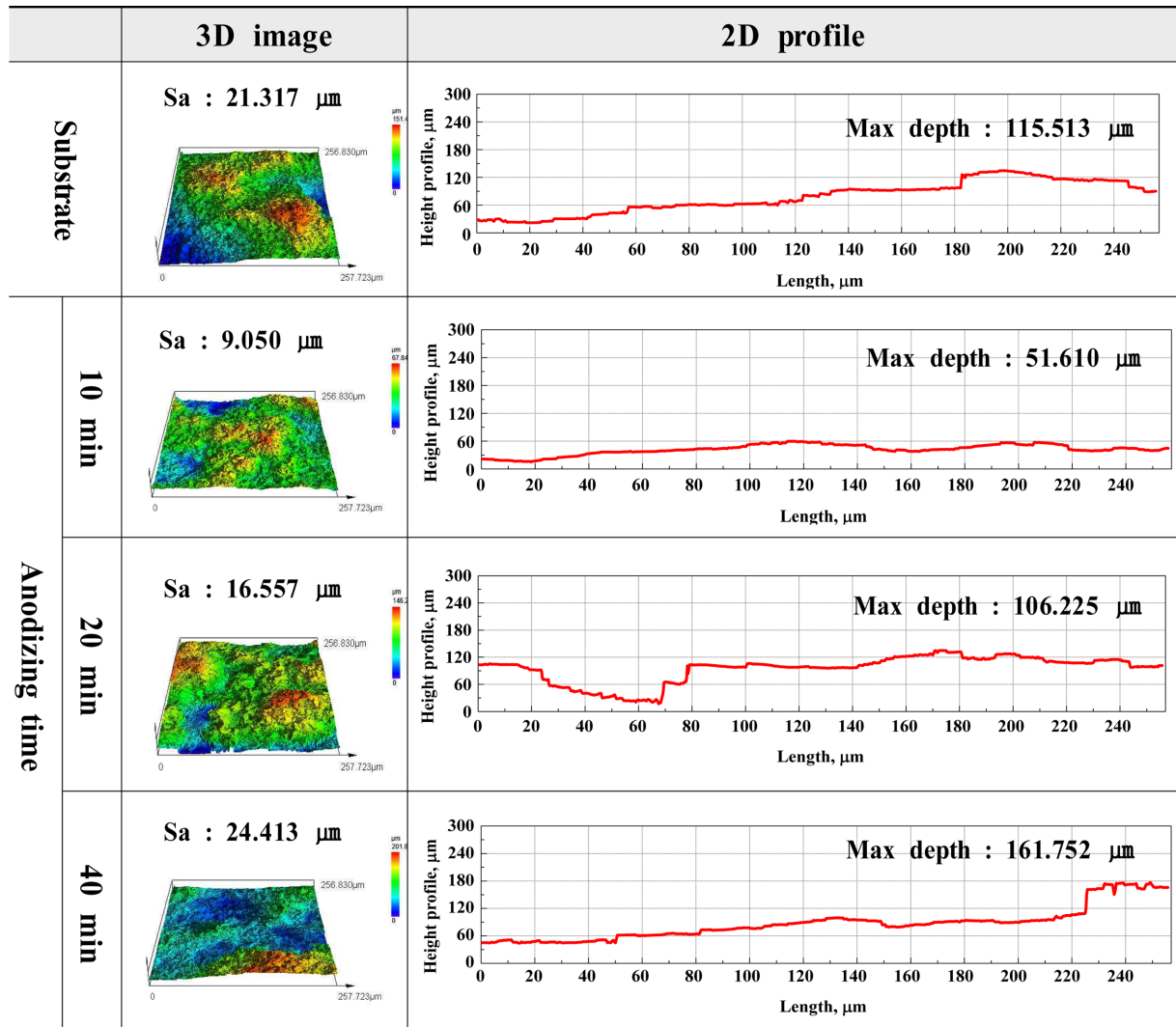


Fig. 7. Surface roughness and maximum damage depth after cavitation-erosion experiment of Al alloy with anodizing time at room temperature

려 감소한다고 보고하였으며, 본 연구에서도 이와 유사한 경향을 나타냈다 [11]. 이에 따라 10분 양극산화한 시험편의 경우, 경도는 다소 낮으나 적절한 인성을 갖고 있어 가장 우수한 캐비테이션-침식 저항성을 나타낸 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 캐비테이션-침식실험 후 표면거칠기와 최대 손상깊이 측정결과이다. 2D 프로파일 관찰결과, 10분 양극산화한 시험편의 최대손상깊이가 51.610 μm 로 가장 낮았으며, 40분 조건이 161.752 μm 로 가장 컸다. 이러한 결과는 표면거칠기에서도 동일한 경향으로 관찰되었다. 특히, 10분 양극산화한 시험편의 표면거칠기와 최대 손상깊이는 모재 대비 12.267 μm 와 63.903 μm 만큼 감소하였다. 그러나 40분 양극산화한 시험편의 경우, 표면거칠기와 최대손상깊이는 오히려 모재대비 3.096 μm 와

46.239 μm 만큼 증가하였다. 그리고 이는 무게 감소량 측정 결과와도 일치하며, 양극산화공정 시, 경도와 인성간의 균형이 중요한 요소임을 알 수 있다.

Fig. 8은 캐비테이션-침식실험 후 손상된 시험편에 대하여 주사전자현미경으로 표면관찰한 결과이다. 모든 시험편의 표면은 전반적으로 손상이 관찰되었다. 특히, 모재와 40분 양극산화한 시험편은 국부적인 벌크 형태의 탈리가 관찰되었다. 이는 캐비테이션 기포 붕괴 시 발생하는 마이크로 제트와 충격파가 국부적으로 높은 압력을 가하여, 결정립계의 손상 및 균열발생에 기인한 것으로 사료된다. 또한 경도가 높은 40분 양극산화한 경우, 산화피막은 안정적이나, 취성적인 특성이 강하여 충격하중에 대한 흡수특성이 저하한 것으로 여겨진다. 이에 따라 초기 균열 형성 시, 균열이 빠르게 전파하여 박

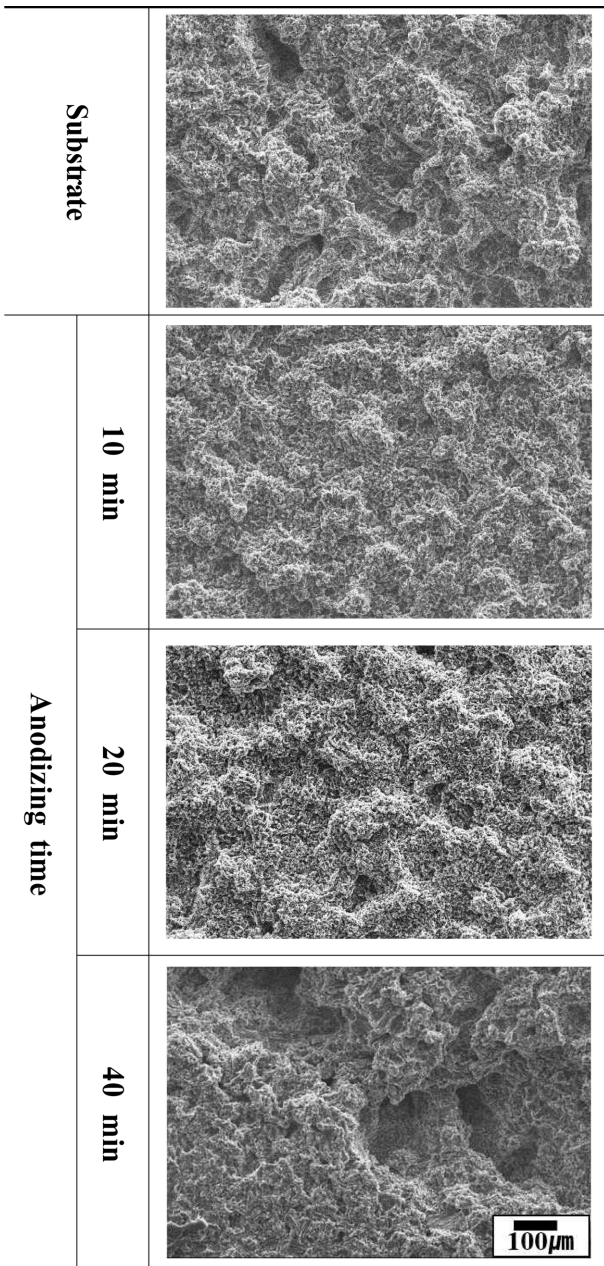


Fig. 8. SEM observation results after cavitation-erosion experiment of Al alloy with anodizing time at room temperature

리 및 국부적인 탈리가 촉진된 것으로 판단된다. 반면 10분 양극산화한 시험편은 적절한 경도와 인성을 유지하여 충격을 효과적으로 분산 및 흡수함으로써 상대적으로 손상이 적은 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 합금에 대하여 양극산화공정

시간변수로 전기화학적 실험과 캐비테이션-침식실험을 수행하였다. 이를 통해 부식특성과 캐비테이션-침식 특성을 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

1) 동전위분극실험 결과, 40분 양극산화한 시험편의 부식전류밀도가 가장 낮은 값이고, 모재가 가장 높은 값을 나타냈다. 이는 양극산화 시간경과에 따라 산화피막 두께 증가로 전해질 내 부식인자의 침투를 억제하여 내식성이 향상된 것으로 사료된다.

2) 동전위분극실험 후 표면관찰 결과, 양극산화 시간 경과에 따른 산화피막 두께 증가로 표면색상이 점차 회백색에서 황갈색으로 어두운 색을 나타냈다. 이는 동전위분극실험 시, 40분 양극산화한 시험편의 내식성이 가장 우수한 것을 뒷받침한다.

3) 캐비테이션-침식실험 결과, 10분 양극산화한 시험편이 캐비테이션-침식 저항성이 가장 우수하였으나, 40분 조건에서는 가장 낮은 저항성이 관찰되었다. 이는 표면경도 증가에 따라 취성적인 특성에 기인하며, 캐비티 충격 시 균열의 형성과 전파를 억제하는 인성저하에 기인한 것으로 판단된다.

4) 캐비테이션-침식실험 후 표면형상 관찰 결과, 10분 양극산화한 시험편의 손상은 상대적으로 가장 적고 균일하게 관찰되었다. 반면, 모재와 40분 양극산화한 시험편은 국부적인 벌크 형태의 탈리에 따른 손상이 관찰되었다.

감사의 글

본 논문은 2025년 전라남도와 전남테크노파크의 「전남 소재·부품·뿌리산업 연구개발대행 원스톱 지원사업」의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 또한 교육부와 전라남도의 재원으로 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과입니다.

References

1. 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>
2. A. Priyadarshi, W. Krzemien, G. Salloum-Abou-Jaoude, J. Broughton, K. Pericleous, D. Eskin, and I. Tzanakis, Effect of water temperature and induced acoustic pressure on cavitation erosion behaviour of aluminium alloys, *Tribology International*, **189**, 108994 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108994>

3. 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>
4. 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>
5. 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>
6. 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>
7. 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>
8. 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>
9. C. C. Pan, D. H. Xia, M. Y. Hou, Z. Qin, Y. Xu, Y. Behnamian, and W. Hu, Cavitation erosion of the AA7050 aluminum alloy in 3.5 wt% NaCl solution—Part 1: mitigating effect by corrosion, *Corrosion Science*, **232**, 112012 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112012>
10. W. Pakieła, T. Tanski, Z. Brytan, and others, The impact of laser surface treatment on the microstructure, wear resistance and hardness of the AlMg5 aluminum alloy, *Applied Physics A*, **126**, 231 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-020-3350-x>
11. 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>
12. 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>
13. 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>
14. 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>
15. S. Ono, Nanostructure analysis of anodic films formed on aluminum—focusing on the effects of electric field strength and electrolyte anions, *Molecules*, **26**, 7270 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/molecules26237270>
16. P. Afsin, C. Akyil, K. Kazmanlı, and M. Ürgen, Electrocoloring mechanism of aluminum anodic oxides in tin-based electrolytes, *Coatings*, **14**, 616 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14050616>
17. G. S. Frankel, J. R. Scully, and C. V. Jahnes, Repassivation of pits in aluminum thin films, *Journal of The Electrochemical Society*, **143**, 1834 (1996). Doi: <https://doi.org/10.1149/1.1836912>
18. R. B. Nair, M. C. C. Monu, S. Chatterjee, D. Kinahan, and D. Brabazon, Influence of nickel concentration on multi-scale mechanical properties and wear behavior of NiTi alloys processed via laser powder bed fusion, *Applied Surface Science Advances*, **27**, 100764 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100764>
19. J. Mur, A. Bußmann, T. Paula, S. Adami, N. A. Adams, R. Petkovsek, and C.-D. Ohl, Micro-jet formation induced by the interaction of a spherical and toroidal cavitation bubble, *Ultrasonics Sonochemistry*, **112**, 107185 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107185>
20. M. Zhao, X. Jiang, Y. Guan, H. Yang, L. Zhao, D. Liu, H. Jiao, M. Yu, Y. Tang, and L. Zhang, Enhanced hardness-toughness balance induced by adaptive adjustment of the matrix microstructure in in situ composites, *Materials*, **16**, 4437 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma16124437>