

## 해양환경 하에서 침지실험에 의한 나노 고분자 특수도료의 방오 및 방식 성능 평가

전우석<sup>1</sup> · 김유진<sup>2</sup> · 안홍민<sup>3</sup> · 박일초<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>국립목포해양대학교 기관시스템공학부 대학원, 전남 목포시 해양대학로 91

<sup>2,3</sup>㈜그린웨이 & 대성과학, 경기도 시흥시 공단1대로80번길 80

<sup>4</sup>국립목포해양대학교 승선실습과정부, 전남 목포시 해양대학로 91

(2025년 4월 06일 접수, 2025년 4월 15일 수정, 2025년 4월 15일 채택)

## Evaluation of Antifouling and Anticorrosion Performance of Special Paint Composed of Nano Polymer Material using Immersion Tests in a Marine Environment

WooSeok Jeon<sup>1</sup>, You Jin Kim<sup>2</sup>, Hong Min An<sup>3</sup>, and Il-Cho Park<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Marine Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, Mokpo-si,  
Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

<sup>2,3</sup>Green Way & DSSCIENCE, 80 Gongdan 1-daero 80beon-gil, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15093, Republic of Korea

<sup>4</sup>Division of Cadet Training, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Republic of Korea

(Received April 06, 2025; Revised April 15, 2025; Accepted April 15, 2025)

This study conducted immersion tests to evaluate the antifouling and anticorrosion performance of aluminum alloys coated with antifouling and special paint in a marine environment. Laboratory immersion tests were conducted to evaluate anticorrosion performance, and coastal immersion tests were conducted to evaluate antifouling performance, which was assessed by visual observations. Additionally, the degree of paint deterioration on the specimens was analyzed before and after the laboratory immersion test using a sliding wear experiment. In the coastal immersion test, the antifouling paint showed better antifouling performance than the special paint. The special paint was observed to have attached and growing plant and animal marine organisms after 2 weeks of immersion. The laboratory immersion tests showed that the special paint exhibited superior corrosion resistance compared to antifouling paint. Since the special paint had a smaller friction coefficient and less surface wear damage than the antifouling paint, its durability was confirmed to be relatively excellent.

**Keywords:** Paint, Immersion test, Antifouling, Anticorrosion, Marine environment

### 1. 서론

선박 및 해양구조물이 해양환경에 지속적으로 노출됨에 따라 미생물, 해조류, 저서생물 등과 같은 해양생물이 구조물 표면에 부착된다 [1]. 해양생물은 시간이 경과함에 따라 서식 및 성장하여 선박 및 해양구조물을 오손(biofouling) 시키게 된다 [2,3]. 이러한 오손은 강재, 알루미늄 합금, FRP 등의 선박 또는 해양구조물의 재

질과 관계없이 발생할 수 있다 [4]. 또한 선박이나 해양구조물에 해양생물이 부착되면 유지 보수 비용이 증가하고 금속 표면의 산소농도전지 형성 등에 의해 부식이 가속화되어 다양한 부정적인 영향을 유발할 수 있다 [5]. 타 연구자의 연구에 따르면, 선박에 부착된 해양생물로 인해 선체저항이 증가하여 동일한 선속 유지를 위해 요구되는 선박 연료 소비량이 최대 50%까지 증가하는 것으로 보고하였다 [6]. 이러한 연료 소비량의 증가는 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 미세먼지(PM), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO) 등 대기오염물질의 배출을 가속화시킬 수 있다 [7]. 결과적으로 해양생물에 의한 오손은 선박 성능 저

<sup>†</sup>Corresponding author: [pic@mmu.ac.kr](mailto:pic@mmu.ac.kr)

전우석: 박사과정 대학원생, 김유진: 대표이사, 안홍민: 대리, 박일초: 조교수

하와 운송 비용 증가를 초래하여 해운업계의 경제적 부담을 증가시키고, 연료 소비 및 배출가스 증가를 유발하여 환경 문제를 발생시키는 요인으로 작용할 수 있다 [8,9].

본 연구에서는 알루미늄 합금 재질의 선박 또는 해양 구조물에 대하여 나노 고분자 특수도료의 방오 및 방식 성능을 비교 평가하기 위해 기존 상용 방오도료와 함께 연안 및 실험실 침지실험을 실시하여 육안 관찰을 수행하였다. 더불어 실험실 침지실험 전후 시험편에 대하여 미끄럼 마모실험을 통해 도료의 열화 정도를 비교 분석하고자 하였다.

## 2. 선박 도료 현황

선박에 부착된 해양생물의 제거 방법은 다양하다. 그 중 물리적 제거 [10], 해수 전기분해 [11,12], 화학 처리제 [13,14], 방오도료 [15,16] 등이 대표적이다. 물리적 제거 방법은 개체가 큰 해양생물에는 효과적이지만, 장시간의 작업 시간이 요구됨에 따라 선박 운항 일수가 감소할 수 있으며, 미생물의 제거는 어려운 실정이다. 아울러, 특정 국가 및 해역에서는 해양생물의 물리적 제거가 금지되거나 제한되어, 제거 작업이 어렵다 [17]. 해수 전기분해는 많은 에너지를 소비하고 초기 투자 비용이 크기 때문에 장기적인 운용 측면에서 적용에 어려움이 있다. 화학 처리제는 효과적이기는 하지만 해양환경에 악영향을 미칠 수 있으며, 항해하는 선박의 특성으로 인하여 운항 중 적용이 어렵다. 한편 방오도료는 재료 본래의 특성을 유지하면서 코팅을 통해 표면 성능을 향상시킬 수 있다는 점에서 다른 방식과는 차별화된다. 방오도료의 성분을 다양하게 조정 및 혼합하여 해양생물의 부착 방지 효과를 향상시킬 수 있다. 방오도료는 주로 실리콘 기반 및 구리 함유 방오 코팅과 같은 유기 재료를 사용한다 [18-21]. 그러나 심해 시추 플랫폼, 해저 케이블, 해양 부표와 같이 더 가혹한 환경에서는 방오 성능 뿐만 아니라 시간 경과에 따른 도료의 접착력을 유지하기 위해 적절한 기계적 강도와 내마모성을 갖춘 재료가 필요하다 [22,23]. 한편 금속 기반 및 세라믹 코팅은 높은 경도, 우수한 내마모성, 내식성 및 장기 수명 등의 우수한 장점이 있다 [24-28]. 결과적으로 적절한 제조 기술과 결합하여 향상된 성능을 갖는 도료의 개발은 연구 초점의 핵심이 되어 왔다. 예를 들어, 주요 항균 성분으로 구리를 사용하는 코팅 조성 설계 [29-31], 다층 코팅 구조 설계 연구 [32,33],  $\text{TiO}_2$  세라믹상 복합 금속 기반 재료의 성능 향상 메커니즘 연구 [34,35] 등이 있다. 국내 조선소에서는 다양한 방오도료 적용에 따른 경제성을 평가한 결과, 목표 속력 손실 값이 작은 방오도료를 적용하는 것이 초기 투자 비용은 높지만 경제

적으로 유리하며, 특히 연료 소모량이 많은 컨테이너선의 경우 방오도료 선정에 따른 연료비에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하기도 하였다. 이는 방오도료 성능에 따라 경제적 손실에 미치는 영향이 크기 때문에 산업적 관심이 높으며, 방오도료 성능을 개선하기 위한 도료 개발 및 평가가 중요하다는 것을 시사하기도 한다 [36].

선체 도료는 해양생물의 부착 및 서식을 방지하는 방오 역할도 해야 하나, 부식에 노출된 알루미늄 합금 및 강재 등의 금속 재질의 경우 부식 방지 기능도 필요하다 [37]. 선박 및 해양구조물 등 해수에 잠긴 금속성 물질은 해수가 강한 부식성 전해질이기에 때문에 별도의 보호 수단이 없다면 심각한 부식 손상을 발생하게 된다 [38-41]. 또한 해양 부식은 해수의 염도 뿐만 아니라, 온도, 해양 부착물, 오염, 누설 전류 등 여러 요인에 영향을 받는 복잡한 과정으로 진행된다 [42]. 이에 대한 부식 방지 방법으로는 이온화 경향이 높은 다른 금속을 사용하여 기재를 보호하는 희생양극식 음극방식법(Sacrificial Anode Cathodic Protection, SACP)과 외부 전원을 인가하여 음극 전위를 형성시켜 기재가 부식되지 않도록 하는 강제전류 음극방식법(Imposed Current Cathodic Protection, ICCP)이 있으며, 일반적으로 SACP는 소형선박에 더 적합한 반면, ICCP는 대형선박에 선호된다 [43]. SACP와 ICCP가 부식 방지 기술로 활용되고 있으나, 선체나 해양구조물이 해수에 노출된 경우, 도장의 결함 부위에서 부식이 진행될 수 있으므로 근본적인 부식 방지가 될 수 있도록 도료의 도포는 중요하다.

선박용 부식방지를 위한 도료로는 주로 폴리머, 금속 기반 합금 및 세라믹 기반 코팅이 있다 [44]. 이 중 폴리머 부식 방지 코팅이 가장 널리 사용되는데, 물리적 장벽, 부식 억제 및 희생양극 기능에 의한 음극방식법을 포함하기 때문이다. 폴리머 부식 방지 방법에는 에폭시, 폴리에스터, 폴리우레탄, 아크릴 등을 사용하는 다양한 유형이 있다 [45-48]. 금속 기반 코팅은 금속이 주요 구성 요소이며, 부식 방지와 일정 수준의 내마모성을 가진다. 이러한 코팅은 부식성 물질을 차단하는 물리적 장벽 역할을 하며, 금속 원소의 희생적 소모를 통해 음극 방식기능을 제공하여 기재 부식을 방지한다. 선박 또는 해양구조물의 금속 기재와 금속 코팅은 유사한 물리적 및 화학적 특성으로 인하여 비교적 강한 접착력을 형성하여 도막이 박리되는 것을 방지한다. 해양환경 및 고염도 지역에서 부식 방지에 적합하며 일반적으로 중요한 해양 장비의 구성 요소에 사용된다. 세라믹 기반 코팅은 티타늄, 크롬, 질소, 산화물 및 카바이드 등의 세라믹 소재 이온과 공유결합 구조로 인해 해수와 산(acid)과 같은 가혹한 환경에서도 우수한 내식성을 가진다. 예를 들어, 질화 티타늄(TiN) 코팅은 부식성 물질

의 침투를 방지하기 위해 다층 구조를 채택하여 강화할 수 있으므로 코팅의 전반적인 내구성이 향상된다 [49]. TiN 코팅에 알루미늄을 추가하면 접착력, 내마모성 및 부식 방지 기능도 향상될 수 있다. 질화크롬(CrN) 코팅은 다층 Cr/CrAlN 구조를 사용하여 최적화할 수 있으며, 이는 내부 응력을 줄일 뿐만 아니라 염화물 이온의 침투를 방지하여 해양환경에서 국부 부식 문제를 해결할 수 있다 [50].

이와 같이 부식 방지를 위한 도료도 다양한 성분을 조합하여 각 환경에 적합하게 개발 및 사용 중이나, 각 도료는 사용상 한계가 존재한다. 에폭시 코팅은 취성이 크기 때문에 기계적 응력에 의한 균열 발생으로 해수 환경에서 방식 기능이 저하된다 [51]. 폴리우레탄 코팅은 자가 치유 기능이 제한적임에 따라 기계적 손상이 발생하면 원래의 방식 특성을 회복하기 어렵다 [52]. 아울리, 아크릴 코팅은 저렴한 비용, 안전성, 환경보호 및 우수한 내구성이 장점이나 열 안정성이 낮고 오염 방지 성능이 부족하여 실제 적용에 크게 제한된다 [53]. 폴리우레아 코팅은 우수한 내식성을 제공하지만 세라믹 박막(film)에 미세균열과 미세기공이 발생하면 내식성이 저하될 수 있다 [54]. 금속 기반 합금 코팅 중 아연-알루미늄 코팅은 우수한 내식성을 가지나 기계적 손상과 침식이 발생할 수 있어 장기적인 안전성과 방식 능력에 영향을 미친다. 세라믹 코팅은 내마모성과 부식 방지 효과가 우수하나 TiN 코팅의 다층 구조는 부식성 물질의 침투를 방지하는 데 효과적이지 않으며, 시간 경과에 따라 내식성이 점차 저하될 수 있다 [55].

### 3. 실험방법

#### 3.1 시험편 제작

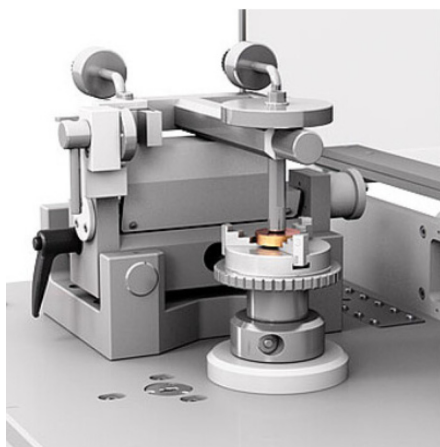
시험편은 알루미늄 합금 5083H-321 판재(20 cm × 20 cm × 0.1 cm)를 사용하였으며, 그 성분조성은 Table 1에 제시하였다. 시험편 제작은 나노 고분자 특수도료(S-COMPOSIT<sup>TM</sup> Crystal, 대성과학 & 그린웨이)와 국내 H사의 비유기주석계 자기마모 및 자기평활형 상용 방오 도료를 각각 제품 설명서에 제시된 시공 절차에 따라 에어 스프레이 도포 방식으로 제작하였다.

#### 3.2 침지실험

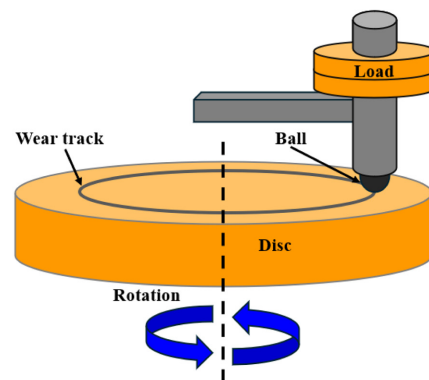
침지실험은 방오와 방식 성능을 비교하기 위해 2종의 시험편에 대하여 연안과 실험실 침지실험 2가지로 구분하여 실시하였다. 방오 성능 확인을 위한 연안 침지실험은 비전도체 재질로 제작된 거치대에 시험편을 고정 설치하고, 밀물과 썰물에 의한 수심 변화 영향을 최소화하기 위해 부유식 해양구조물에 거치하여 항상 수심 1 m를 유지하도록 하였다. 침지 장소는 전라남도 목포시 소재 국립목포해양대학교 연안부두 내에 위치하고 있으며, 시험편 거치대의 설치 좌표는 34.793106, 126.360242이다. 방식 성능 확인을 위한 실험실 침지실험은 천연해수로 채워진 용기에 2종의 시험편을 침지시켜 실시하였으며, 천연해수는 2주 간격으로 신환하였다. 연안과 실험실 침지실험 기간은 각각 20주(대략 4월~8월)와 28주(대략 4월~10월) 동안 실시하였으며, 침지실험 시간 경과에 따른 육안 표면 관찰을 수행하였다.

Table 1. Chemical compositions of AA5083-H321

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



(a)



(b)

Fig. 1. Tribometer (a) and schematic diagram (b) for sliding wear experiments

### 3.3 미끄럼 마모실험

실험실 침지실험 후 도료의 열화 상태를 확인하기 위해 2종의 시험편에 대하여 침지실험 전후 미끄럼 마모 실험을 수행하였으며, 실험 개략도를 Fig. 1에 제시하였다. 미끄럼 마모실험은 트라이보미터(Tribometer, TRB3, Anton paar)를 사용하였으며, 볼-온 디스크(ball-on disc) 방식으로 실시하였다. 실험에 사용된 대응 볼은 직경 6 mm 및 비커스 경도 1650 HV의 알루미늄 볼을 사용하였다. 실험조건은 디스크 회전반경 3 mm, 속도 5 cm/s, 인가하중 10 N 및 미끄럼 거리 100 m로 설정하였다. 또한, 실험 환경은 온도와 습도를 각각 25 °C 및 65%로 유지하였다. 마모실험 후 미끄럼 거리에 따른 마찰계수를 상호 비교하였으며, 마모된 시험편은 3D 공초점 레이저 현미경(OLS-5000, Olympus)을 이용하여 마모 트랙의 표면 프로파일 분석과 손상 깊이 및 너비를 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 방오성능

Fig. 2는 연안 침지실험 기간에 따른 방오도료와 특수도료 시험편의 표면을 각각 촬영한 사진이다. 방오도료의 경우 침지실험 기간 8주까지 시험편 표면에 해양생물의 서식이 관찰되지 않은 양호한 표면 상태가 확인되었으며, 시험편 거치대에서만 해양생물의 부착 및 서식이 관찰되었다. 침지실험 기간 12주 경과 시에는 시험편 표면에 방오도료의 크랙 손상이 부분적으로 관찰되었으며, 이후 20주 경과 시에는 크랙 손상 부위의 도막이 박리되어 부식손상 및 해양생물의 서식이 관찰되었다. 또한 다른 부위에서도 도막이 박리되어 발생한 부식손상이 부분적으로 관찰되었고, 이러한 부식손상 부위에서 해양생물이 부착 및 서식하는 양상이 확인되었다. 결과적으로 방오도료 자체의 방오성능은 매우 우수하게 확인되었으나, 내구성이 상대적으로 열악한 부분에서 도막의 박리에 의해 부식 손상 및 해양생물 서식이 진행되는 것으로 나타났다. 반면 특수도료의 경우 침지실험 기간 2주만에 식물성 해양생물의 서식이 표면 전반에서 관찰되었다. 이후 4주 경과 시에는 따개비류의 동물성 해양생물도 함께 서식하는 것이 확인되었으며, 8주 이후로는 부착된 식물성 및 동물성 해양생물이 급격하게 성장하였다. 결국 12주 경과 시에는 해양생물이 시험편 표면 전반을 뒤덮었으며, 20주에는 해양생물이 더욱 성장하여 시험편 표면을 완전히 뒤덮을 정도로 번식하였다. 결과적으로 특수도료의 경우 기존 상용 방오도료에 비해 방오성능이 상대적으로 열악한 것으로 명확하게 확인되었다.

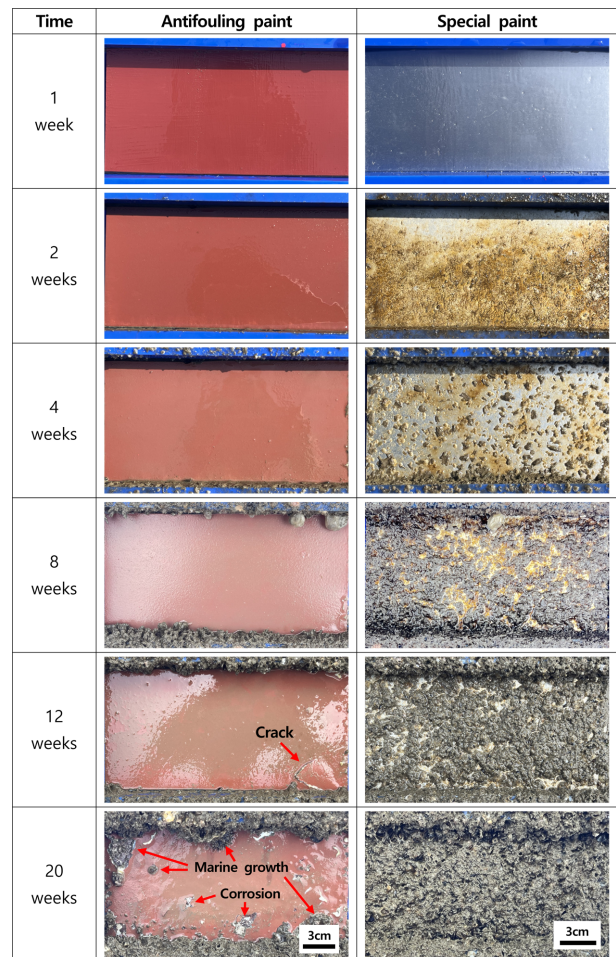
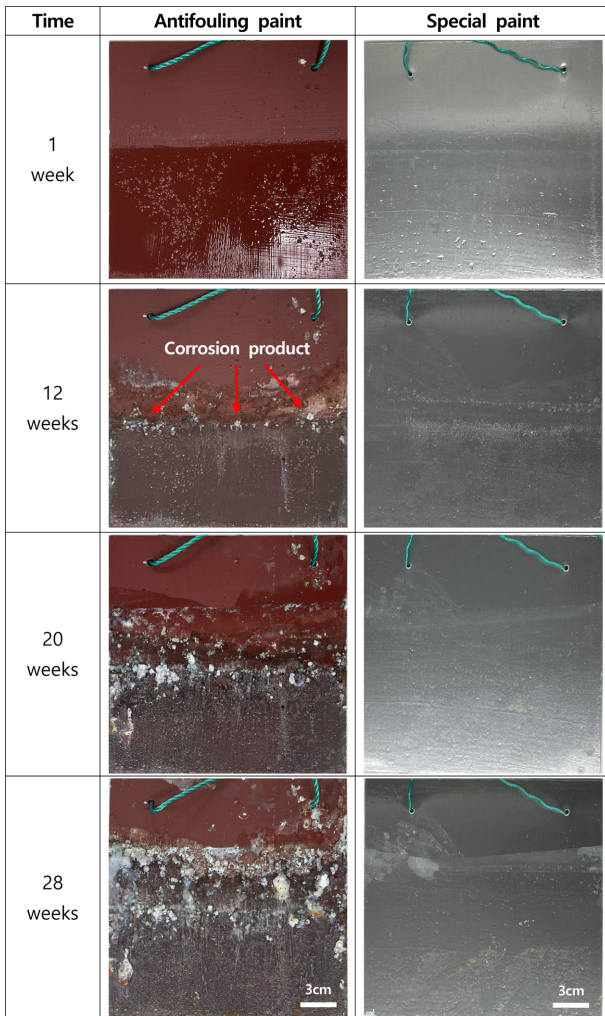


Fig. 2. Surface observations with coastal immersion test time

### 4.2 방식성능

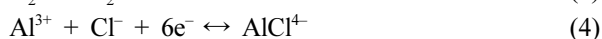
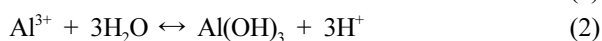
Fig. 3은 실험실 침지실험 기간 경과에 따른 상용 방오도료와 특수도료 시험편의 표면을 촬영한 사진이다. 먼저 방오도료의 경우 침지실험 기간 12주 경과 시 해수면과 대기 노출면의 경계선 부근인 수선(water line)에서 중점적으로 백색의 알루미늄 합금의 부식 생성물이 관찰되었다. 그리고 해수에 의해 완전 침지된 부분은 해수가 도막에 침투하여 방오도료 외관이 변색되어 나타났다. 이후 침지실험 기간 28주의 경우 수선 부근에서의 알루미늄 합금 부식 손상은 더욱 진행되어 시험편 표면에 부식 생성물의 양이 크게 증가하는 경향을 나타냈다. 이와 유사한 사례로 실제 해양구조물의 수선 부근인 비말대(splash zone)에서는 해수 대비 약 30배 가량 고농축된 3 mg/m<sup>3</sup>의 염화물과 원활한 산소 공급으로 인해 부식 손상이 가장 크게 발생한다 [56]. 이는 고농축 염화물의 경우 알루미늄 합금 표면에 형성된 산화 피막에 공격성 Cl<sup>-</sup> 이온이 흡착되면 부동태 피막의 국





**Fig. 3. Surface observations with laboratory immersion test time**

부적인 공식(pitting)을 촉진하는 경향을 나타내기 때문이다. 이때 생성된 공식 손상의 크기는 매우 작기 때문에 초기에 발견하기 어려운 실정이며, 일단 공식이 진행되면 알루미늄 합금의 깊이방향으로 파고들어 가서 심각한 손상을 유발할 수 있다. 이로 인해  $\text{Cl}^-$  이온이 포함된 용액에서 알루미늄 합금의 부식 손상 거동 및 방지대책에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔다 [57-59]. 대표적인  $\text{Cl}^-$  이온에 의한 알루미늄 부식 손상 메카니즘은 다음 반응식으로 표현할 수 있다 [60,61].



$\text{Cl}^-$  이온이 알루미늄 표면의 산화 피막에 흡착되어 수

nm의 미세균열을 형성하면서 산화 피막의 손상이 시작된다. 손상된 산화 피막 영역에서는 복합 염화물인  $\text{AlCl}_4^-$ 의 생성과정을 통해 음극 부위에서는 용존산소가 감소하여 알루미늄을 빠르게 산화시키게 된다 [62]. 공식 손상의 하단부에 고농축된  $\text{Al}^{3+}$  이온은 상부 쪽으로 확산되어 알루미늄 표면의 알칼리성 용액과 반응하여  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 를 형성한다. 공식 손상 내부에 형성된  $\text{H}^+$  이온은 공식 손상 표면 주위의 백색 부식 생성물인  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 을 형성할 수 있도록 도와준다. 또한 공식의 하단부의  $\text{Al}^{3+}$  이온은  $\text{Cl}^-$  이온을 끌어들여  $\text{AlCl}_4^-$ 의 형성을 촉진하여 공식의 깊이는 점점 더 깊어진다. 부식 생성물  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 축적은 공식의 표면에 돔(dome)을 형성하여 공식의 상부를 점차적으로 차단하여 공식 손상의 성장을 지연시킬 수 있다. 결과적으로 공식 손상은 대면적의 음극에 둘러싸인 국부적인 양극으로 간주할 수 있다 [63].

또한 알루미늄 합금의 수선부 부식은 산소농도전지 형성에 따른 부식 촉진 현상으로도 설명할 수 있다 [62]. 공식이 발생하게 되면 해수 내 용존산소가 고갈되는데 본 실험과 같이 해수가 정적 상태인 경우 수면 가까이에서 산소가 가장 쉽게 공급된다. 반면 수면으로부터 멀리 떨어진 완전 침지 부분에서는 용존산소의 고갈로 인해 양극이 되고 수선 가까이에서는 풍부한 용존산소의 환원에 의해 음극이 된다. 수선 가까이에 있는 알루미늄 합금 표면은 반응식 (3)에 의한 용존산소 환원으로 인해 국부적인 알칼리 영역이 되어 부동태화된다. 그러나 용존산소가 부족하고 인접한 알루미늄 합금 사이에 용액저항이 최소가 되는 표면에서는 집중적인 부식 손상이 발생하게 된다. 이러한 산소농도전지에서 양극과 음극 사이에 발생하게 되는 부식속도의 차이는 시간이 경과함에 따라 농도 차이가 커지게 되므로 더욱 가속화된다. 결과적으로 침지실험 기간이 경과함에 따라 도막의 열화작용으로 해수가 알루미늄 합금 기재까지 침투하게 되면 고농축 염화물과 산소농도전지가 형성되는 수선부를 중심으로 부식 손상이 가속화되어 백색의 부식 생성물이 축적되는 것으로 판단된다.

반면 특수도료의 경우에는 침지실험 기간 28주 동안 부식 손상이 육안으로 확인되지 않을 정도로 양호한 표면 상태를 유지하여 상용 방오도료 대비 매우 우수한 방식능이 확인되었다.

#### 4.3 마찰마모 성능

Fig. 4는 방오도료와 특수도료 시험편에 대하여 미끄럼 마모실험을 통해 실험실 침지실험 전후의 마찰계수를 나타낸 것이다. 먼저 침지실험 전 방오도료(antifouling)의 경우 마찰계수가 초기 0.15에서 시작하여 미끄럼 거리가 약 18.4 m까지 상대적으로 작고 안정적으로 유지

하여 평균 마찰계수는 0.166 정도로 확인되었다. 이후 미끄럼 거리에서는 마찰계수의 큰 변동을 나타냈다. 실험종료 시점인 미끄럼 거리 100 m 도달 시까지의 평균 마찰계수는 0.32로 상대적으로 크게 확인되었다. 침지실험

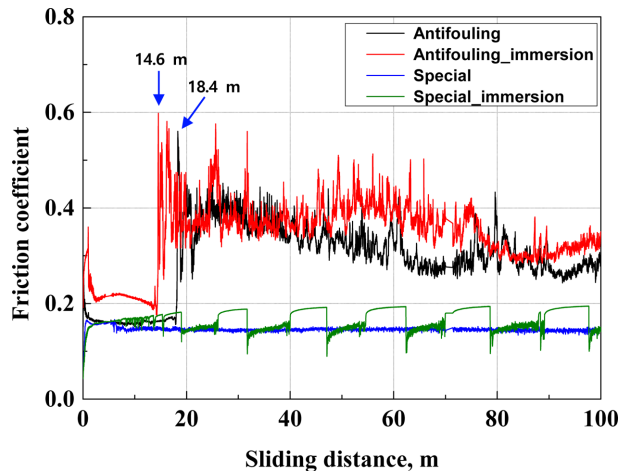


Fig. 4. Friction coefficient curves before/after laboratory immersion test

후 방오도료(antifouling\_immersion)의 마찰계수는 침지실험 전 방오도료와 유사한 경향의 마찰계수 변화가 확인되었다. 초기 마찰계수는 0.19이고 마찰계수가 급격하게 변동되기 시작하는 미끄럼 거리 약 14.6 m까지의 평균 마찰계수는 0.22 정도로 실험 전 방오도료에 비해 상대적으로 크게 확인되었다. 이후 실험종료 시점까지의 평균 마찰계수는 0.36으로 침지실험 전 방오도료에 비해 역시 크게 나타났다. 침지실험 전후 방오도료의 경우 미끄럼 거리가 각각 약 18.4 m와 약 14.6 m에서 급격하게 마찰계수 변동이 커지는 이유는 방오도료 도막이 마모되어 모재인 알루미늄 합금이 일부 노출되면서 형성되는 거친 표면이 마찰계수에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그리고 미끄럼 마모실험 전반 동안 침지실험 전 방오도료에 비해 침지실험 후 방오도료의 마찰계수가 상대적으로 크게 확인되었으며, 침지실험 전후 방오도료의 전체 평균 마찰계수는 각각 0.29와 0.34로 확인되었다.

한편 침지실험 전 특수도료(special)의 마찰계수는 초기 0.05에 시작하여 실험종료 시까지 큰 변동 없이 안정적인 마찰계수가 확인되었으며, 전체 평균 마찰계수

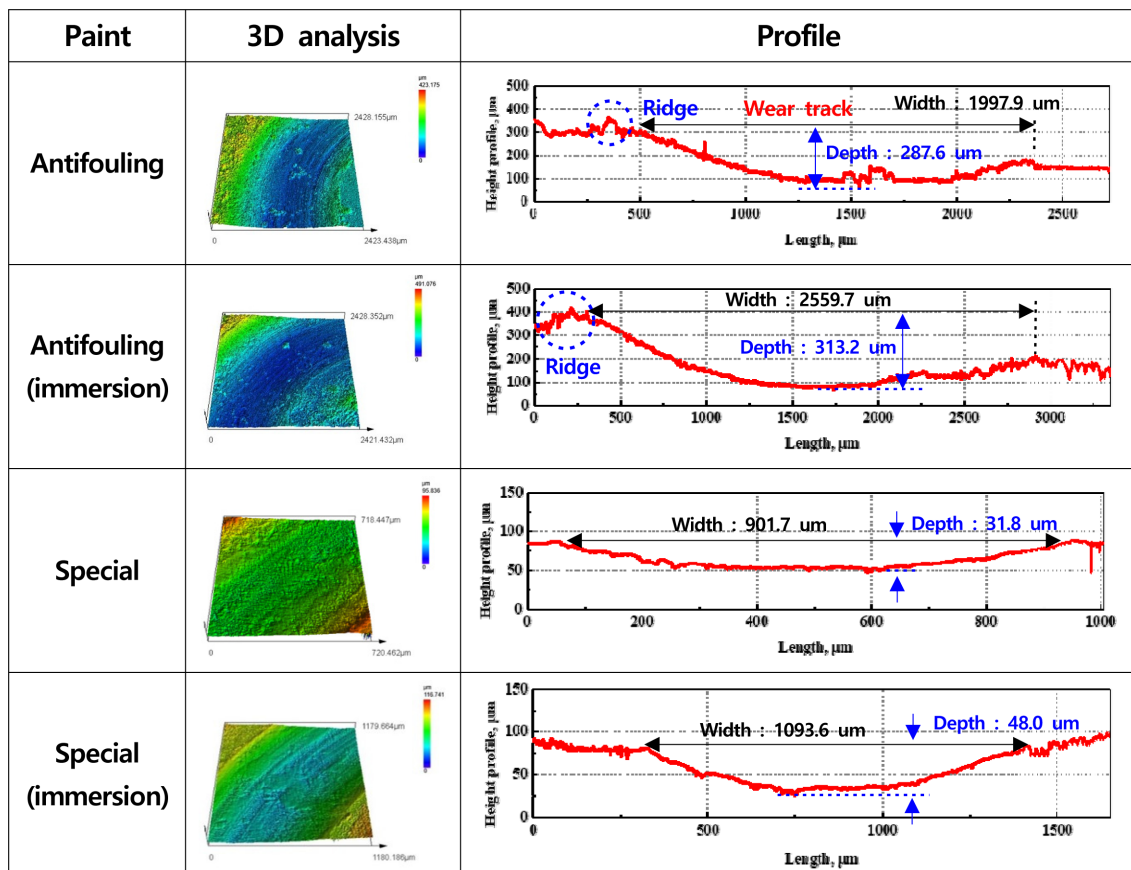


Fig. 5. 3D image and profile after sliding wear experiment

는 0.15로 나타났다. 반면 침지실험 후 특수도료 (special immersion)의 마찰계수는 초기 0.04에 시작하여 실험종료 시까지 stick-slip이 반복적으로 발생하였으며, 그 영향으로 침지실험 전 특수도료에 비해 전체 평균 마찰계수가 0.17로 상대적으로 크게 확인되었다. 침지실험 전 특수도료와 달리 침지실험 후 특수도료에서만 stick-slip이 발생한 원인은 침지실험 수행 중 특수도료의 열화현상으로 인해 알루미늄 합금 모재와의 접착력이 부분적으로 저하 및 박리되어 나타난 현상으로 여겨진다. 결과적으로 방오도료 대비 특수도료의 마찰계수가 상대적으로 작게 나타났으며, 침지실험 후 도료의 열화 현상은 마찰계수에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 실험실 침지실험 전후의 방오도료와 특수도료 시험편에 대하여 미끄럼 마모실험 후 마모 손상된 시험편 표면의 마모 트랙(wear track)을 3D 공초점 레이저 현미경으로 분석하여 마모 깊이, 마모 너비 및 산등성이(ridge)를 프로파일에 나타낸 것이다. 먼저 방오도료의 경우, 침지실험 전 시험편의 마모 트랙의 너비와 깊이는  $1997.9\ \mu\text{m}$ 와  $287.6\ \mu\text{m}$ 이고, 침지실험 후 시험편은 각각  $2559.7\ \mu\text{m}$ 와  $313.2\ \mu\text{m}$ 로 계측되어 침지실험 후 시험편의 마모손상도가 상대적으로 크게 확인되었다. 그리고 침지실험 전후 모든 시험편의 마모 트랙 가장자리에서 마모 생성물에 의한 산등성이(ridge)가 관찰되었으며, 침지실험 전에 비해 침지실험 후 시험편의 산등성의 높이와 너비가 상대적으로 크게 형성되어 마모 생성물이 더 많이 생성되었음을 확인할 수 있다. 한편 특수도료의 경우, 침지실험 전 시험편의 마모 트랙의 너비와 깊이는  $901.7\ \mu\text{m}$ 와  $31.8\ \mu\text{m}$ 이고, 침지실험 후 시험편은 각각  $1093.6\ \mu\text{m}$ 와  $48.0\ \mu\text{m}$ 로 계측되어 앞선 방오도료의 실험 결과와 동일하게 침지실험 후 시험편의 마모손상도가 상대적으로 크게 확인되었다. 그러나 방오도료와 달리 특수도료의 경우 마모 생성물로 형성되는 산등성은 관찰되지 않았다. 이는 침지실험 전후 방오도료의 경우 도막이 손상되어 알루미늄 합금 모재가 노출될 정도로 크게 손상된 반면, 특수도료의 경우에는 마모 트랙의 자국 손상 정도로만 상대적으로 작게 발생하여 마모 생성물이 형성되지 않았기 때문이다. 결과적으로 침지실험 전후 시험편의 마모 손상도는 방오도료 대비 특수도료가 현저히 작게 확인되어 내구성이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 연안 및 실험실 침지실험을 통해 특수도료와 방오도료의 방오 및 방식 성능을 비교 평가하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연안 침지실험 결과, 방오도료가 특수도료에 비해 우수한 방오 성능을 나타냈으며, 특수도료의 경우 침지실험 2주 경과 시부터 식물성 및 동물성 해양생물의 부착 및 서식이 관찰되었다.
2. 실험실 침지실험 결과, 특수도료가 방오도료 대비 우수한 방식 성능을 나타냈다. 특수도료는 실험기간 28주 동안 부식손상이 관찰되지 않는 양호한 표면을 유지하였다. 반면 방오도료는 실험기간 12주 경과 시점부터 부식 손상으로 인한 백색의 부식 생성물이 관찰되었으며, 실험시간 경과에 따라 그 양이 점차 증가하는 양상을 나타냈다.
3. 실험실 침지실험 전후 시험편에 대하여 미끄럼 마모실험 결과, 방오도료 대비 특수도료의 마찰계수 및 표면 마모손상도가 작게 나타나 상대적으로 내구성이 우수하게 확인되었다. 또한 침지실험 전 시험편에 비해 침지실험 후 시험편의 마찰계수 및 표면 손상도가 크게 나타나 도료의 열화 현상이 확인되었다.

## References

1. Maria João Romeu, and Filipe Mergulhão, Development of Antifouling Strategies for Marine Applications, *Microorganisms*, **11**, 1568 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061568>
2. Xiaolong Shi, Hua Liang, and Yanzhou Li, Review of Progress in Marine Anti-Fouling Coatings: Manufacturing Techniques and Copper- and Silver-Doped Antifouling Coatings, *Coatings*, **14**, 1454 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14111454>
3. Della Thomas, S. Surendran, and N. J. Vasa, Nanosecond laser induced breakdown spectroscopy for biofouling analysis and classification of fouling constituents, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **168**, 1058, (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105847>
4. G. Subramanian, S. Palanichamy, and P. Veeramani, An eco-friendly process for prevention of biofouling, *Progress in Organic Coatings*, **99**, 474, (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.07.013>
5. T. Munk, D. Kane, and D. M. Yebra, 7 - The effects of corrosion and fouling on the performance of ocean-going vessels: a naval architectural perspective, *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 148 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1533/9781845696313.1.148>
6. M. P. Schultza, J. A. Bendickb, E. R. Holm, and W. M. Hertel, Economic Impact of Biofouling on a Naval Surface Ship, *The Journal of Bioadhesion and Biofilm*

- Research*, **27**, 87 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1080/08927014.2010.542809>
7. Y. Wu, J. Hua, and D. L. Wu, Economic analysis of ship operation using a new antifouling strategy, *Ocean Engineering*, **266**, 113038 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113038>
8. Neven Hadžić, Inno Gatin, Tessa Uroić, and Viktor Ložar, Biofouling dynamic and its impact on ship powering and dry-docking, *Ocean Engineering*, **245**, 110522 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110522>
9. M. P. Schultza,, Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering, *Biofouling*, **23**, 331 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1080/08927010701461974>
10. Donald Morrissey, and Chris Woods, In-water cleaning technologies: Review of information, MPI Technical Paper No: 2015/38, Ministry for Primary Industries: Wellington, New Zealand (2015).
11. Shuangkou Chen, Janfang Zhu, Bochu Wang, Huoan Liu, Bai He, Experimental Study on Hypochlorous Acid Blocking the Marine Diatom Adhesion, *International Journal of Electrochemical Science*, **7**, 5331 (2012). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)19624-6](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)19624-6)
12. Jongchan Yi, Yongtae Ahn, Moongi Hong, Gi-Hyeon Kim, Nisha Shabnam, Byongsueng Jeon, Byoung-In Sang, and Hyunook Kim, Comparison between OCl<sup>-</sup>-Injection and In Situ Electrochlorination in the Formation of Chlorate and Perchlorate in Seawater, *Applied Sciences*, **9**, 229 (2019). Doi: <https://doi.org/10.3390/app9020229>
13. Mary E. Mainous, David D. Kuhn, and Stephen A. Smith, Efficacy of Common Aquaculture Compounds for Disinfection of *Flavobacterium Columnare* and *F. Psychrophilum*, *Journal of Applied Aquaculture*, **24**, 262 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1080/10454438.2012.708291>
14. Christine M. Moffitt, Amber Barenberg, Kelly A. Stockton, and Barnaby J. Watten, Efficacy of Two Approaches for Disinfecting Surfaces and Water Infested with Quagga Mussel Veligers? Edited by: Wai Hing wong, and Shawn L. Gerstenberger), In *Biology and Management of Invasive Quagga and Zebra Mussels in the Western United States*, 467 (2015).
15. Y. Wu, J. Hua, and D. L. Wu, Economic analysis of ship operation using a new antifouling strategy, *Ocean Engineering*, **266**, 113038 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113038>
16. Haoyi Qiu, Kang Feng, Anna Gapeev, Kerstin Meurisch, Sören Kaps, Xia Li, Liangmin Yu, Yogendra Kumar Mishra, Rainer Adelung, and Martina Baum. Functional polymer materials for modern marine biofouling control, *Progress in Polymer Science*, **127**, 101516 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101516>
17. Ashley D. M. Coutts, Joseph P. Valentine, Graham J. Edgar, Adam Davey, and Bella Burgess-Wilson, Removing vessels from the water for biofouling treatment has the potential to introduce mobile non-indigenous marine species, *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 1533 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.04.015>
18. Xiaobin Lin, Qingyi Xie, Chunfeng Ma, and Guangzhao Zhang, Self-healing, highly elastic and amphiphilic silicone-based polyurethane for antifouling coatings, *Journal of Materials Chemistry B*, **9**, 1384 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1039/D0TB02465A>
19. Jiawen Sun, Chao Liu, Jizhou Duan, Jie Liu, Xucheng Dong, Yimeng Zhang, Ning Wang, Jing Wang, and Baorong Hou, Facile fabrication of self-healing silicone-based poly(urea-thiourea)/tannic acid composite for anti-biofouling, *Journal of Materials Science & Technology*, **124**, 1 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.01.026>
20. Chuanying Wei, Yan Zhang, Zhen Tang, Changan Zhang, Jianhua Wu, and Bo Wu, Surface Reconstruction of Silicone-Based Amphiphilic Polymers for Mitigating Marine Biofouling, *Polymers*, **16**, 1570 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/polym16111570>
21. Peng Hu, Qingyi Xie, Chunfeng Ma, Guangzhao Zhang, Silicone-Based Fouling-Release Coatings for Marine Antifouling, *Langmuir*, **36**, 2170 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03926>
22. Shun-Han Yang, Jonas W. Ringsberg, Erland Johnson, Zhiqiang Hu, Biofouling on mooring lines and power cables used in wave energy converter systems-Analysis of fatigue life and energy performance, *Applied Ocean Research*, **65**, 166 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.04.002>
23. Kate Gormley, Faron McLellan, Christopher McCabe, Claire Hinton, David I. Kline, and Beth E. Scott. Automated Image Analysis of Offshore Infrastructure Marine Biofouling, *Journal of Marine Science and Engineering*, **6**, 2 (2018), Doi: <https://doi.org/10.3390/jmse6010002>
24. Richard Piola, Andrew S. M. Ang, Matthew Leigh, and Scott A. Wade, A comparison of the antifouling performance of air plasma spray (APS) ceramic and high velocity oxygen fuel (HVOF) coatings for use in marine hydraulic applications, *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, **34**, 479 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1080/08927014.2018.1465052>



25. Peng Yi, Hongyu Jia, Xiaoshuang Yang, Yong Fan, Shusheng Xu, Jing Li, Mingli Lv, and Yuanjiang Chang, Anti-biofouling properties of TiO<sub>2</sub> coating with coupled effect of photocatalysis and microstructure, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **656**, 130357 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.col-surf.2022.130357>
26. David Salvador Sanz, Sergio García, Laura Trueba, and Alfredo Trueba, Bioactive Ceramic Coating Solution for Offshore Floating Wind Farms, *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, **15**, 407 (2021). Doi: <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.19>
27. Yidong Wu, Yuluo Li, Xuli Liu, Qinjia Wang, Xiaoming Chen, and Xidong Hui, High strength NiMnFeCrAlCu multi-principal-element alloys with marine application perspective, *Scripta Materialia*, **202**, 113992 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.113992>
28. Yixing Li, Linlin Yang, Yijun Liao, Rongzhi Zhao, Lianze Ji, Rui Su, Dake Xu, and Fuhui Wang, Photothermal Heating-Assisted Superior Antibacterial and Anti-biofilm Activity of High-Entropy-Alloy Nanoparticles, *Advanced Functional Materials*, **33**, 2302712 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202302712>
29. Jinlong Zhao, Tongyu Lian, Ziqing Sun, Hanyu Zhao, Chunguang Yang, Xiujuan Fan, Shuangjian Li, Jie Mao, Chunming Deng, and Ke Yang, Controllable release of Cu ions contributes to the enhanced environmentally-friendly performance of antifouling Cu-bearing stainless steel coating prepared using high-velocity air fuel, *Surface and Coatings Technology*, **481**, 130629 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130629>
30. Tongyu Lian, Jinlong Zhao, Chunguang Yang, and Ke Yang, Environment-friendly antifouling coating of Cu-bearing stainless steel prepared by pre-alloyed powder, *Materials Letters*, **344**, 134439 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134439>
31. Mutiu Erinosh, Esther Akinlabi, Sisa Pityana, Gbadebo Owolabi, Laser Surface Modification of Ti6Al4V-Cu for Improved Microhardness and Wear Resistance Properties, *Materials Research*, **20**, (2017), Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0175>
32. Herong Ma, Zongde Liu, Jiakuan Li, Quanbing Liu, Jian Zhang, and Tianjia Wei, Optimization design of environmental-friendly Cu-Fe laser cladding coating for self-grown microchannel in a marine corrosive environment, *Journal of Alloys and Compounds*, **940**, 168820 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168820>
33. Vinita Vishwakarma, J Josephine, R P George, R Krishnan, S Dash, M Kamruddin, S Kalavathi, N Manoharan, A K Tyagi, and R K Dayal, Antibacterial copper-nickel bilayers and multilayer coatings by pulsed laser deposition on titanium, *Biofouling*, **25**, 705 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1080/08927010903132183>
34. P. Muhamed Ashraf, and S. M. A. Shibli, Development of CeO<sub>2</sub>-and TiO<sub>2</sub>-incorporated aluminium metal-composite matrix with high resistance to corrosion and bio-fouling, *Journal of Solid State Electrochemistry*, **12**, 315 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-007-0393-2>
35. Viviane Lilian Soethe, Rafael G. Delatorre, Eder Marlon Ramos, and Moisés Luiz Parucker, TiO<sub>2</sub> thin Films for Biofouling Applications, *Materials Research*, **20**, 426 (2017). Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1116>
36. Andrea Farkas, Nastia Degiuli, Ivana Martić, and Ivica Ančić, Energy savings potential of hull cleaning in a shipping industry, *Journal of Cleaner Production*, **374**, 134000 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134000>
37. Hua Liang, Xiaolong Shi, and Yanzhou Li, Technologies in Marine Antifouling and Anti-Corrosion Coatings: A Comprehensive Review, *Coatings*, **14**, 1487 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14121487>
38. C. P. Gardiner, and R. E. Melchers, Corrosion analysis of bulk carriers, Part I: Operational parameters influencing corrosion rates, *Marine Structures*, **16**, 547 (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(01\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(01)00026-0)
39. A. Zayed, Y. Garbatov, and C. Guedes Soares, Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions, *Ocean Engineering*, **163**, 299 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.047>
40. M. T. Gudzea, and R. E. Melchers, Operational based corrosion analysis in naval ships, *Corrosion Science*, **50**, 3296 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.048>
41. D. A. Shifler, Understanding material interactions in marine environments to promote extended structural life, *Corrosion Science*, **47**, 2335 (2005). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.09.027>
42. A. C. Viner, and D. R. Tozer, Influence of Corrosion on Ship Structural Performance, Hull New Construction Division No.85/29. Lloyd's Register of Shipping (1985).
43. Likun Xu, Yonglei Xin, Li Ma, Haibing Zhang, Zhifeng Lin, and Xiangbo Li, Challenges and solutions of cathodic protection for marine ships, *Corrosion Communications*, **2**, 33 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/>

- j.corcom.2021.08.003
44. Hua Liang, Xiaolong Shi, and Yanzhou Li, Technologies in Marine Antifouling and Anti-Corrosion Coatings: A Comprehensive Review, *Coatings*, **14**, 148 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14121487>
45. Mirko Faccini, Lorenzo Bautista, Laura Soldi, Ana M. Escobar, Manuela Altavilla, Martí Calvet, Anna Domènech, and Eva Domínguez, Environmentally Friendly Anticorrosive Polymeric Coatings, *Applied Science*, **11**, 3446 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/app11083446>
46. Si-Wei Wu, Quan-Tong Jiang, Shuai Yuan, Qing-Kun Zhao, Chang Liu, Heng Tang, Qiang Sun, Ji-Zhou Duan, and Bao-Rong Hou, Environmentally friendly expanded graphite-doped ZnO superhydrophobic coating with good corrosion resistance in marine environment, *Rare Metals*, **43**, 3075 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02359-0>
47. Tianxiang Sun, Kai Jin, Tong Wang, Wei Wang, Wen Li, Hui Gao, Lifang Sun, and Shougang Chen, Synergistic effect of graphene oxide and cathodic protection to enhance the long-term protective performance of organic coatings, *Journal of Materials Science*, **58**, 10853 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08701-2>
48. Ao Zhou, Hao Yu, Jun Tang, Biao Zhang, Fugang Qi, Yun Zhou, Nie Zhao, and Xiaoping Ouyang, N-PMI modified PAZ nanocomposite coatings with self-healing function for anticorrosion and antifouling applications, *Progress in Organic Coatings*, **180**, 107589 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107589>
49. Venkataramana Bonu, M. Jeevitha, V. Praveen Kumar, G. Srinivas, Siju, and Harish C. Barshilia, Solid particle erosion and corrosion resistance performance of nanolayered multilayered Ti/TiN and TiAl/TiAlN coatings deposited on Ti6Al4V substrates, *Surface and Coatings Technology*, **387**, 125531 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125531>
50. Bin Xia, Shengguo Zhou, Yongxin Wang, Hao Chen, Jingwen Zhang, and Bingdong Qi, Multilayer architecture design to enhance load-bearing capacity and tribological behavior of CrAlN coatings in seawater, *Ceramics International*, **47**, 27430 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.165>
51. Yunqing Xia, Lifan Tong, Xiaofang Feng, Shuai Zhang, Hubing Xiang, Yi He, and Xiaobo Liu, An investigation on the mechanical and corrosion protection properties of poly(arylene ether nitrile) reinforced epoxy coating, *Progress in Organic Coatings*, **192**, 108463 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108463>
52. Jingyu Ren, Xiangbin Dong, Yanjie Duan, Lin Lin, Xiaowei Xu, Jichao Shi, Runping Jia, Dandan Wu, and Xinyao He, Synthesis and self-healing investigation of waterborne polyurethane based on reversible covalent bond, *Journal of Applied Polymer Science*, **139**, 52144 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1002/app.52144>
53. Ao Zhou, Hao Yu, Jun Tang, Biao Zhang, Fugang Qi, Yun Zhou, Nie Zhao, and Xiaoping Ouyang, N-PMI modified PAZ nanocomposite coatings with self-healing function for anticorrosion and antifouling applications, *Progress in Organic Coatings*, **180**, 107589 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107589>
54. Qiufeng Mo, Gemei Qin, Kui Ling, Xiaoyu Lv, Nannan Wang, Weizhou Li, Layer-by-layer self-assembled polyurea layers onto MAO surface for enhancing corrosion protection to aluminum alloy 6063, *Surface and Coatings Technology*, **405**, 126653 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126653>
55. S Niyomsoan, W Grant, D.L Olson, and B Mishra, Variation of color in titanium and zirconium nitride decorative thin films, *Thin Solid Films*, **415**, 187 (2002)., Doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00530-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00530-8)
56. S. K. Chang, Enaluation of Atmospheric Corrosin for Metals, *Journal of Surface Science and Engineering*, **30**, 69 (1997). <https://koreascience.kr/article/JAKO199711920551682.pdf>
57. Jisoo Kim, and Chanyoung Jeong, A Study on the Surface Properties and Corrosion Behavior of Functional Aluminum 3003 Alloy using Anodization Method, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 290 (2022), Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.4.290>
58. Won Dong Park, Phil Jun Gook, Younho Cho, and Chi Bum Bahn, Wash interval optimization to prevent atmospheric corrosion of Korean aircrafts made of aluminum alloys, *Corrosion Science and Technology*, **15**, 189 (2016). Doi: <http://dx.doi.org/10.14773/cst.2016.15.4.189>
59. Kim, Young-Bok, and Kim, Seong-Jong, Effect of Flow Rate on Erosion Corrosion Damage and Damage Mechanism of Al5083-H321 Aluminum Alloy in Seawater Environment, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 115 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.3.115>
60. Klodian Xhanari, Matjaž Finšgar, Organic corrosion inhibitors for aluminum and its alloys in chloride and alkaline solutions: A review, *Arabian Journal of Chemistry*, **12**, 4646, (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2016.08.009>

61. S. D. Cramer, B. S. Covino, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, ASM International, USA (2003).  
Doi: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v13a.9781627081825>
62. Denny A. Jones, Principles and Prevention of CORROSION 2nd edition, Prentice-Hall, Inc., United States of America, pp. 200-220, 236-247, 262-263, 279-285, 307, 309-316, 322 (1995).
63. C. Vargel, Corrosion of Aluminum, 1st Edition, pp. 115 - 117, Elsevier, London (2004).