

## 유속변화에 따른 선체구조용 알루미늄 합금에 부착된 해양생물 제거 효과

박일초<sup>1</sup> · 정광후<sup>2</sup> · 한민수<sup>3</sup> · 김성종<sup>†</sup>

(Received September 3, 2018 ; Revised November 1, 2018 ; Accepted November 8, 2018)

### Effect of flow rate on the removal of marine organisms attached to a ship's hull made of aluminum alloy

Il-Cho Park<sup>1</sup> · Kwang-Hu Jung<sup>2</sup> · Min-Su Han<sup>3</sup> · Seong-Jong Kim<sup>†</sup>

**요약:** 본 연구는 알루미늄 선체에 적용 가능한 표면처리기술을 확보하기 위해 알루미늄 합금, 방오도료, 우루시올 그리고 양극산화 후 비등수 실링처리된 시편에 대하여 천연해수에서 침적실험 및 유속실험을 실시하여 해양생물 부착 특성을 분석하였다. 침적실험 결과 방오도료를 제외한 모든 시편에서 해양생물이 번식하였으며, 알루미늄 합금과 우루시올 시편은 부식손상이 동반되었다. 한편 부착된 해양생물은 유속실험에 의해 효과적으로 제거되었다.

**주제어:** 방오, 천연해수, 침적실험, 유속실험, 알루미늄 합금

**Abstract:** This study was conducted to investigate the growth characteristics of marine organisms on aluminum alloy, antifouling paint, urushiol, and anodizing specimens sealed in boiling water under the conditions of a marine immersion test. Thereafter, flow rate tests were carried out in natural seawater. The immersion tests revealed that the marine organisms reproduced on all specimens except the antifouling paint and that their reproduction on the aluminum alloy and urushiol specimens was accompanied by corrosion damage. Furthermore, the attached marine organisms were effectively removed during the flow rate test.

**Keywords:** Antifouling, Natural seawater, Immersion test, Flow rate test, Aluminum alloy

## 1. 서론

선박과 해양구조물 등은 항상 수많은 해양 생물에 노출되어 있다. 그리하여 연안환경에서는 원치 않는 미생물이나 해조류, 저서생물 등이 해수에 잠긴 인공구조물 표면에 착생하고 성장하여 여러 가지 부정적인 영향을 미치게 된다 [1][2]. 특히, 선박용 알루미늄 합금 재료의 경우 해수에 침적되면 해양 유기생물에게 독성이 없는 알루미늄( $Al(OH)_3$ ) 금속염을 생성하기 때문에 방오효과가 없는 것으로 알려져 손쉽게 해양생물의 부착 및 성장이 가능하다. 그에 따라 알루미늄 선박에 해양생물이 부착하게 되면 마찰저항이 증가하고, 선속 저하 및 무게 증가로 인하여 연료 소비량 증가와 선체 표면 부식 상승효과와 같은 문제가 발생될 수 있다. 일부 연구에 따르면 해양생물 부착으로 인한 연료소모는 최대 40%까지 증가하는 것으로 보고되었다[3]. 따라서 선체의 해양생물 서식 방지를 위한 다양한 방오대책들이 최근까지도 꾸준히 연구되고 있는 실정이다. 일반적으로 선체에 부착된 해양생물을 제거하기 위해서는 해양생물과 선체 표면사이에

부착력 이상의 힘이 작용되어야 한다. 부착된 해양생물의 제거는 외부로부터 작용하는 물리적인 힘이나 스스로의 세정 작용(Self-cleaning)에 의해 이루어 질 수 있다. 자기 세정 작용은 정적 조건과 동적 조건에서 발생할 수 있는데, 정적 조건이라 함은 부착물의 자중에 의해 스스로 탈락하는 경우이며, 동적 조건은 항해 중 발생하는 유속에 의한 수동력학적인 힘(Hydrodynamic force)에 의해 강제적으로 탈락시키는 것을 의미한다. 수동력학적 자기 세정 작용은 유체의 양력(Lift force)과 항력(Drag force)의 함수로 표현할 수 있으며, 해양생물과 표면 간 부착력과 관련이 있다. 이와 관련하여 M. Schultz *et al.* [4]은 선체에 부착된 해양생물 제거에 필요한 수동력학적인 힘을 측정하였으며, 유속에 따른 수동력학적 힘의 모델 식을 제안하였다. 해당 모델을 적용하면 일정 선속에서 자기세정 작용을 유발할 수 있는 최대 전단 부착 강도(Shear barnacle adhesion strength)와 인장 부착강도(Tensile barnacle adhesion strength)를 예측할 수 있다. 그리고 R. Holland *et al.* [5]은 부착된 해양생물 제거에 필요한 전단응

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6356-3818>): Professor, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea, E-mail: [ksj@mmu.ac.kr](mailto:ksj@mmu.ac.kr), Tel: 061-240-7226

1 Researcher, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, E-mail: [ilchopark42@gmail.com](mailto:ilchopark42@gmail.com), Tel: 061-240-7200

2 Ph.D Candidate, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, E-mail: [jungkwanghu@gmail.com](mailto:jungkwanghu@gmail.com), Tel: 061-240-7200

3 Professor, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, E-mail: [mp949@mmu.ac.kr](mailto:mp949@mmu.ac.kr), Tel: 061-240-7230

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

력 관찰을 위하여 3가지 종류의 규조류를 사용하여 연구하였다. 실험 결과 3가지 규조류 모두 전단 응력이 커짐에 따라 표면에서 제거된 양의 비율이 증가하였다. 즉, 높은 유속으로 인해 발생한 전단응력은 해양생물 부착을 제어하는데 사용될 수 있으며, 실제로 이탈리아 Vado Ligure에서는 발전소(1320 MW, 1400-1500 m 길이의 직경 2.2 m 배수구)의 냉각수 투입량을 6.5 노트로 유지했을 때 부착물이 발생하지 않았다[6][7]. 또한 M. Lemos *et al.* [8]은 *Bacillus cereus*(바실러스 세레우스, 식중독균) 제거하기 위해 일정 조건하에서 서로 다른 전단응력(0.02, 0.12 및 0.17 Pa)을 적용하여 연구하였다. 그 결과 유체역학적 조건이 해양생물 부착 특성에 영향을 미치고, 부착량을 감소시키는데 효과적임을 규명하였다. 또한 물리적 조건 또는 물리적·화학적 혼합 조건 모두 전단 응력이 커질수록 제거된 해양생물 양이 증가하는 것을 알 수 있다. 더불어 유속이 생물막(Biofilm) 박테리아의 역학적인 거동에 미치는 영향을 조사한 Y. P. Tsai[9]의 연구 결과에 따르면, 최대 생물막 생물량은 유속이 0.38~0.77 노트 범위에서는 변화가 없었으나 이후 유속이 1.16 노트까지 증가하면 상당한 영향을 미치게 된다. 그 이유는 유속에 의한 전단응력 증가로 생물막 내의 박테리아 농도가 상당히 감소하기 때문이다. 최근 E. Paul *et al.* [10]의 연구결과에 따르면 Low Shear Stress Reactor(LSSR) 실험장비를 활용하여 회전속도에 따른 전단응력 조절을 통해 생물막의 탈리(Detachment) 메커니즘을 분석하였다. 그 결과 유속 증가에 따라 전단응력과 압축압력 증가 시 생물막 제거가 용이함을 확인하였다. D. Rubio *et al.* [11]은 해수에 의해 냉각되는 복합 발전소 응축기의 유속에 따른 해양 생물 부착 특성을 연구하였다. 그 결과 1.38 m/s(2.68 노트)의 유속에서는 1.87 m/s(3.63 노트)에 비해 부착량이 211% 증가하였다. 반대로 2.17 m/s(4.22 노트)에서는 1.87 m/s(3.63 노트)에 비해 40% 감소하였다. 또한 실험 종료 후 가장 낮은 유속(1.38 m/s)에서 가장 큰 해양 생물 부착량의 최대 점근 값(Maximum asymptotic value of fouling layer, Rfmax)이, 그리고 가장 빠른 유속 (2.17 m/s)에서 가장 낮은 Rfmax가 나타났다. 이는 빠른 유속이 해양생물 부착을 방해하여 성장을 지연시킴을 의미한다. 결과적으로 유속 증가에 따라 부착된 해양생물은 현저히 감소하였으며, 냉각수 속도가 2.17 m/s에서 1.38 m/s로 감소하면 부착량은 3.5배로 증가하였다.

선체의 해양생물 부착에 관한 실증 연구는 정적인 해양 환경에 노출시키는 방식으로 진행되는 것이 일반적이다. 기존의 실험 방식은 선박 운항중의 동적 환경을 구현하지 못하므로 해양생물의 정적 또는 동적 착생, 성장 및 탈락과정을 이해하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 선박의 정박과 운항 사이클에 따른 영향을 반영하여 정적 조건과 동적 조건을 각각 구현하여 시편 종류에 따른 해양생물의 부착 및 탈락 과정을 비교 분석한다. 그리고 알루미늄 합금 선박에 대하여 방오도료를 대체할 새로운 표면처리기술의 적용 가능성을 판단하기 위한 일환으로 알루미늄

합금에 대하여 양극산화 후 다양한 표면처리를 적용하여 방오도료와 함께 침적실험 및 유속실험을 수행하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 선체구조용 5083 Al 합금에 대하여 해양생물의 부착 및 제거 실험을 위해 모재(5083 Al 합금), 방오도료 그리고 양극산화 후 다양한 실험처리를 실시하였다. 이때 5083 Al 합금의 화학성분 조성은 Table 1에 나타내었다. 방오도료는 JOTOUN사의 SEAQUANTUM X200-3 제품을 해당 사양서에 따라 도장 후 침적실험을 실시하였다. 5083 Al 합금의 양극산화 시편은 10℃의 10 Vol.% 황산 수용액 속에서 양극산화 처리하여 약 30  $\mu\text{m}$  두께의 산화피막을 형성하였다. 1차 침적실험을 위한 Ni 도금과 Ni 도금 + 2종류의 후처리된 시편의 경우 양극산화 표면처리 후 국내 M사의 Ni 도금액과 2종류 후처리제를 사용하여 전해 Ni 도금을 실시하여 제작하였다. 2차 침적실험을 위한 나노 세라믹 실험 시편은 국내 H사의 방오도료(AF)-프라이머와 AF-Clear 제품을 브러쉬로 도포하여 제작하였다. 그리고 Cu가 1%와 3% 포함된 Zn-Al 실험 시편은 국내 M사 개발 제품으로 그 성분비를 “Cu 함량 + Zn-Al 함량(100 - Cu 함량 - 희석제 함량) + 희석제 함량 = 100%”로 제작하였으며, 이때 희석제의 함량은 10%으로 고정하였다. Cu가 1%와 3% 포함된 Zn-Al 실험은 브러쉬 도포 후 2단계에 열처리를 실시하였다. 1차 열처리는 150℃에서 15분 그리고 2차 열처리는 250℃에서 30분 동안 실시하여 시편을 제작하였다. 3차 침적실험을 위한 우루시올 시편은 국내 K사의 상온 경화형 옥칠제품을 사용했으며, 해당 사양서에 따라 도장 후 침적실험을 실시하였다. 비등수(Boiling water) 실험 시편은 양극산화 처리 후 탈이온수 온도 95±1℃ 그리고 pH는 5.5-6으로 유지하면서 1시간 동안 침치하여 제작하였다.

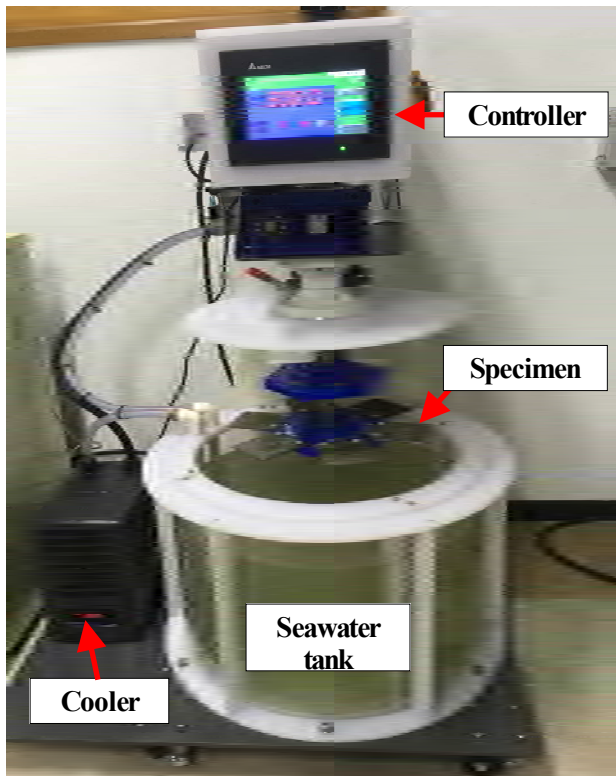
해양생물 부착을 위한 침적실험 장소는 목포 인근 연안에서 실시하였으며, 그 위치는 34°49′ 02.9″ N, 126°22′ 24.3″ E이다. 그리고 침적 시험편의 거치는 Figure 1에서와 같이 바다 위에 떠있는 인공 구조물에 거치하여 밀물과 썰물의 영향을 받지 않고 항상 약 1 m 가량이 해수 속에 침전되도록 설치하였다. 해양생물이 부착된 시험편의 유속실험은 Figure 2와 같이 자체 제작한 회전식 유속실험 장비를 사용하였다. 유속실험 시편은 침적실험 후 해양생물이 부착된 시편을 10 cm x 10 cm(가로 x 세로)의 크기로 절단 제작한 후 갈바니 부식손상을 고려하여 플라스틱 재질의 볼트와 너트를 활용하여 회전식 유속실험 장비에 장착하였다. 유속실험은 약 25℃의 천연해수 속에서 선속 9.5 노트에 상당하는 유속을 구현하여 실시하였다. 그리고 시험편은 유속실험 시 실험장비의 회전방향에 평행하도록 거치하여 실험하였다. 실험에 사용된 천연해수의 성분조성 및 그 특성은 Table 2에 나타났다. 그리고 해양생물의 부착 정도를 평가하기 위해 유속실험 시간 경과에 따른 시편 표면을 상호 비교분석하였다.

**Table 1:** Chemical compositions of 5083 Al alloy (wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0.40	0.15	0.18	0.18	6.42
Cr	Zn	Ti	Al	
0.12	0.04	0.01	Bal.	



**Figure 1:** Photograph of marine immersion test



**Figure 2:** Rotating type flow rate equipment

**Table 2:** Main chemical composition and properties of natural seawater

Main chemical composition (mg/L)					
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
pH		Dissolved oxygen (mg/L)		Electric conductivity (mS/cm)	
7.9		10.2		49.7	

### 3. 실험 결과

#### 3.1 정적 환경에서의 해양생물 부착

**Figure 3**은 정적 환경에서의 해양생물 부착을 위한 1차 침적실험 결과로 방오도료, Ni 도금, 그리고 Ni 도금 후 2가지 종류의 후처리를 적용한 시편을 침적 경과시간에 따라 촬영한 사진이다. 방오도료는 침적실험 전 기간 동안 해양생물의 서식 및 성장이 전혀 발견되지 않았다. 반면 Ni 도금의 경우 침적기간 단 0.5개월 만에 국부적인 부식 손상이 심각하게 나타났으며, 이후 침적기간 경과에 따라 부식손상부에서 해양생물이 서식 및 성장하는 것으로 관찰되었다. 한편 Ni 도금 후 2가지 종류의 후처리를 실시한 경우 침적실험 기간 0.5개월 후 Ni 도금 층이 국부적으로 부풀어 오르는 결함이 나타났으며, 침적실험 기간 경과에 따라 그 크기가 점점 커지고 해양생물의 서식과 성장이 동반되는 양상을 보였다. 따라서 본 연구에서 적용된 Ni 도금 및 Ni 도금 후 2가지 종류의 후처리를 실시한 표면 처리는 도금 층의 결함에 의해 실질적으로 선체 적용이 불가한 것으로 판단하였다.

**Figure 4**는 정적 환경에서의 해양생물 부착을 위한 2차 침적실험 결과로 방오도료, 나노 세라믹 실링 그리고 Cu가 1%와 3% 포함된 Zn-Al 실링 처리된 시편을 침적 경과시간에 따라 촬영한 사진이다. 나노 세라믹 실링 시편은 약 3.5개월 후 해양생물이 표면을 완전히 뒤덮었다. 반면 방오도료와 Cu가 1%와 3% 포함된 Zn-Al 실링 시편은 표면에 국부적으로 동물성 해양생물의 성장이 관찰되어 유사한 방오성능이 확인되었다. 특히 Cu 함량이 증가함에 따라 해양생물의 점유 면적이 상대적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 Cu가 포함된 Zn-Al 실링의 경우 시공작업 시 열처리과정을 거쳐야하기 때문에 실질적으로 대면적의 선체 외판에 적용하는데 한계가 있다. 따라서 Cu가 포함된 Zn-Al 실링은 선체 적용을 위한 지속적인 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. 결과적으로 1-2차 침적 시편들은 모두 실질적으로 선체 적용에 어려움이 있어 유속 실험에서 제외하였다.

**Figure 5**는 정적 환경에서의 해양생물 부착을 위한 침적 실험 결과로 알루미늄 모재, 우루시울, 방오도료, 그리고 양극산화 후 비등수 실링한 시편을 침적 경과시간에 따라 촬영한 사진이다. 방오도료는 침적실험 기간 약 3개월 동안 해양생물의 성장이 전혀 관찰되지 않았고 건전한 표면 상태를 유지하였다. 반면 알루미늄 모재는 약 0.5개월부터 흰색 반점의 부식 생성물들이 표면 전반에 걸쳐 관찰되었으며, 침적시간 경과에 따라 그 양이 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로 알루미늄 합금은 대기 중에서는 표면에 자연적으로 생성된 산화피막에 의해 그 내식성이 우수하나 해양환경 하에서는 해수 속에 포함된 염소이온에 의해 산화피막이 파괴되어 부식손상이 유발되는 것으로 판단된다. 2개월부터는 검은 반점으로 보이는 조개, 따개비류 등의

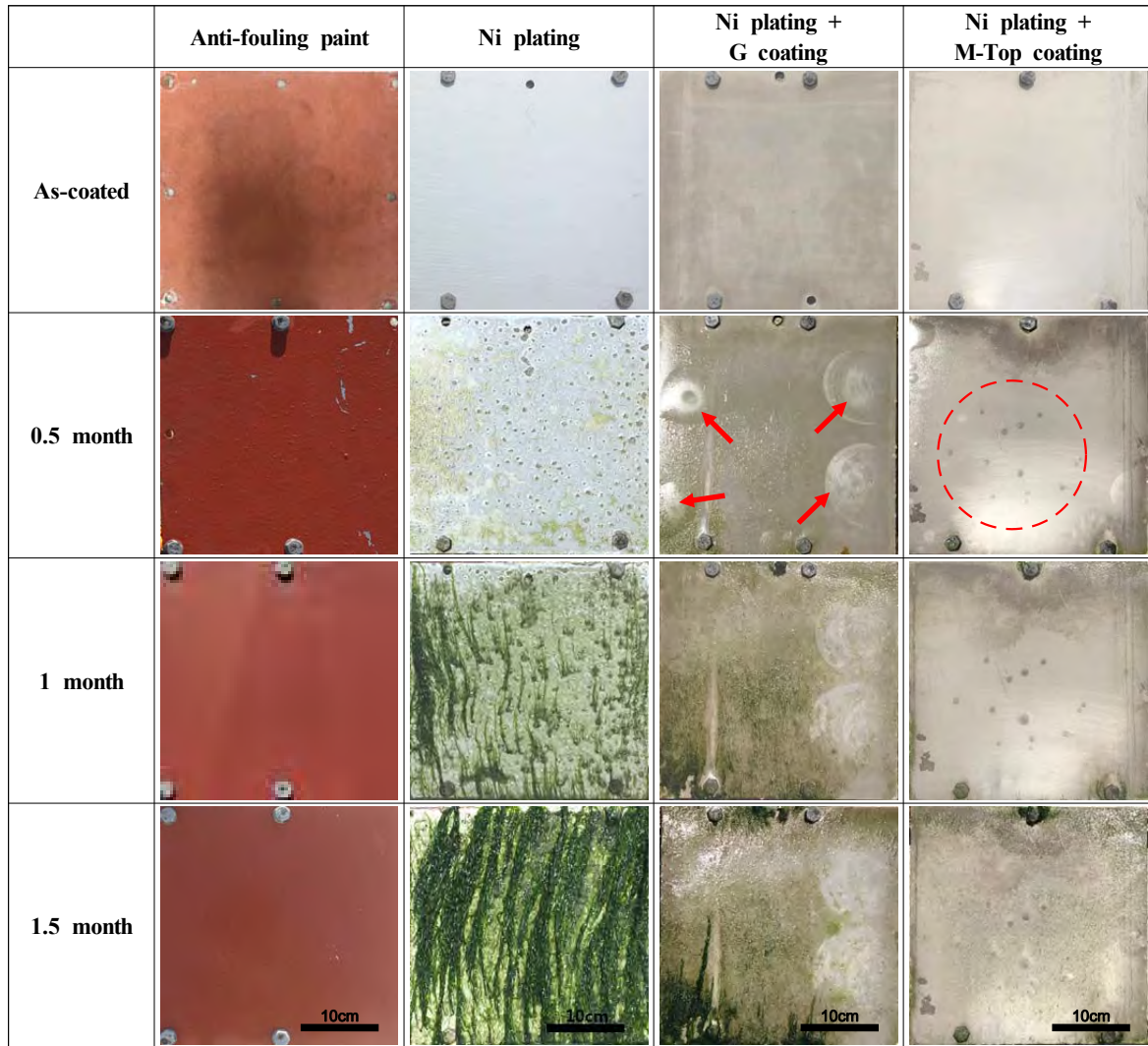


Figure 3: Results of 1st marine immersion test for anti-fouling paint and Ni plating specimens

동물성 해양생물 번식이 동반되었으며, 결국 3개월경과 후에는 부식 생성물과 동물성 해양생물로 표면 전반이 뒤덮였다. 한편, 우루시올 시편은 침적 1개월까지는 주로 해조류와 같은 식물성 해양생물이 번식하였으나 2개월경과 후에는 식물성과 동물성 해양생물이 함께 번식하여 표면을 뒤덮었다. 그리고 3개월경과 후에는 해양생물 이외에도 국부적으로 부식손상이 발생하여 흰색의 부식 생성물들이 관찰되었다. 우루시올의 경우 옷나무에 추출된 옷의 주요 성분으로써 J. C. Kim *et al.* [12]의 연구와 같이 강력한 항균성이 밝혀져 효과적으로 생물막의 생성을 막을 수 있을 것으로 기대되었으나 본 연구에서는 방오성능이 명확하게 확인되지 않았다. 마지막으로 양극산화 후 비등수 실링 시편은 1개월경과 시까지는 주로 식물성 해양생물이 서식하였으며, 2개월경과 시부터 식물성과 동물성 해양생물이 함께 번식하여 성장하는 경향이 관찰되었다. 결국 3개월경과 시에는 표면 전반에 걸쳐 해양생물이 서식 및 성장하였으나 알루미늄 합금 모재와 우루시올 시편과 달리 부식 손상은 관찰되지 않았다. 이는 알루미늄 합금 표면이 양극산화 공

정에서 생성된 다공성의 비정질 알루미늄(Amorphous alumina,  $Al_2O_3$ ) 산화피막 층이 비등수 실링처리를 통해 보헤마이트(Boehmite,  $\gamma-Al(OH)_3$ )로 상변화하여 두 상간의 밀도차에 의해 산화피막의 체적이 증가하여 기공 직경을 감소시키기 때문이다[13]. 그 결과 알루미늄 합금으로의 해수 침투가 억제되어 내식성이 향상된 결과로 판단된다. 결과적으로 정적 환경에서 실시한 해양생물 부착 침적실험 결과, 알루미늄 합금 모재, 우루시올 그리고 양극산화 후 비등수 실링 시편의 방오성능이 방오도료 대비 열악한 특성을 나타냈다.

### 3.2. 유속이 해양생물 제거에 미치는 영향

정적 환경에서의 해양생물 부착 침적실험 결과, 알루미늄 합금 선체에 적용이 가능하면서 해양생물 부착 방지를 위한 효과적인 표면처리 방법을 찾을 수 없었다. 따라서 그 대안으로 정적 환경에서 해양생물 부착 침적실험 후 방오도료와 해양생물이 부착된 알루미늄 합금 모재, 우루시올 그리고 양극산화 후 비등수 실링 시편에 대하여 회전식 유속



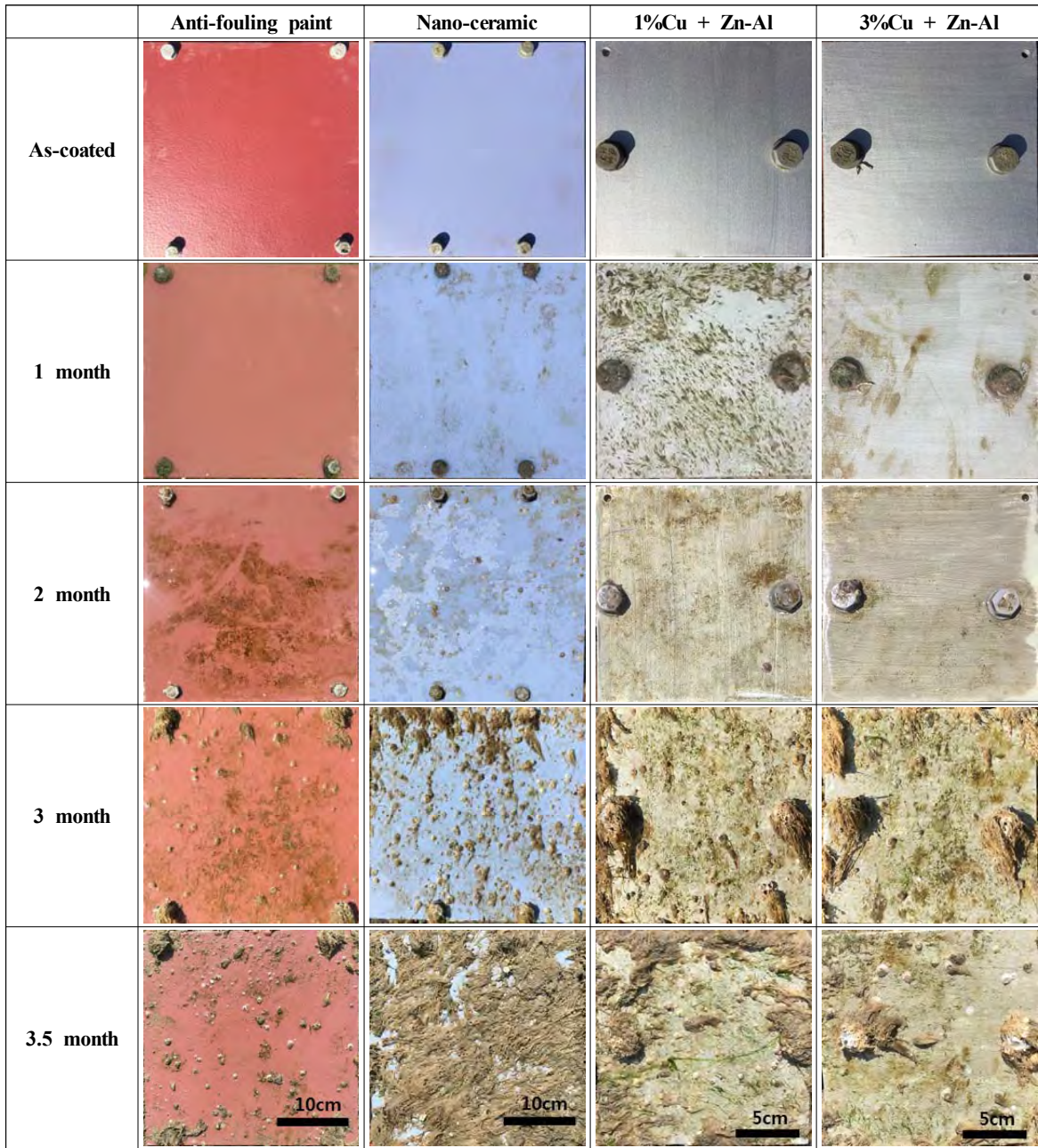


Figure 4: Results of 2nd marine immersion test for anti-fouling paint, nano-ceramic, 1%Cu + Zn-Al and 3%Cu + Zn-Al specimens

실험장비로 운항중인 선박의 동적 환경을 구현함으로써 유속이 부착된 해양생물에 미치는 영향을 조사하였다. Figure 6은 실험시간 경과에 따른 유속에 의한 해양생물 부착 정도를 분석하기 위해 시편 표면을 관찰한 것이다. 먼저 방오도료의 경우 부착된 해양생물이 없었으며, 실험종료 시까지 표면 변화 없이 건전한 상태를 유지하였다. 따라서 방오도료는 정적-동적실험 기간 동안 내식성, 내구성 그리고 방오성능이 우수하게 평가되었다. 반면 유속실험 전 해양생물이 부착된 시편은 알루미늄 합금 모재와 우루시올에 비해 양극산화 후 비등수 실링 시편이 상대적으로 해양생물 개체수가 적게 관찰되었다. 실험시간 1시간 경과 시 3종류 시편 모두 실험 전 표면에 묻어 있던 진흙과 함께 상대적

으로 크기가 큰 동물성 해양생물들이 상당부분 탈리되고 남은 원형의 흰색 흔적들이 표면 전반에서 관찰되었다. 따라서 유속실험 1시간 경과 시 부착된 해양생물이 상당수 제거됨에 따라 유속이 부착된 해양생물에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 이후 실험시간이 경과함에 따라 녹색의 식물성 해양생물 역시 점진적으로 제거되어 실험종료 시점에서는 확연하게 그 분포영역이 감소하였으며, 동물성 해양생물의 개체수 역시 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 유속실험 종료 후 해양생물의 부착 정도를 명확하게 관찰하기 위해 Figure 7에 118시간 실험 후 각 시편들의 확대 사진을 나타내었다. Figure 7 (a)의 방오도료는 역시 건전한 표면 상태가 확인되었다. 반면 유속실험 중



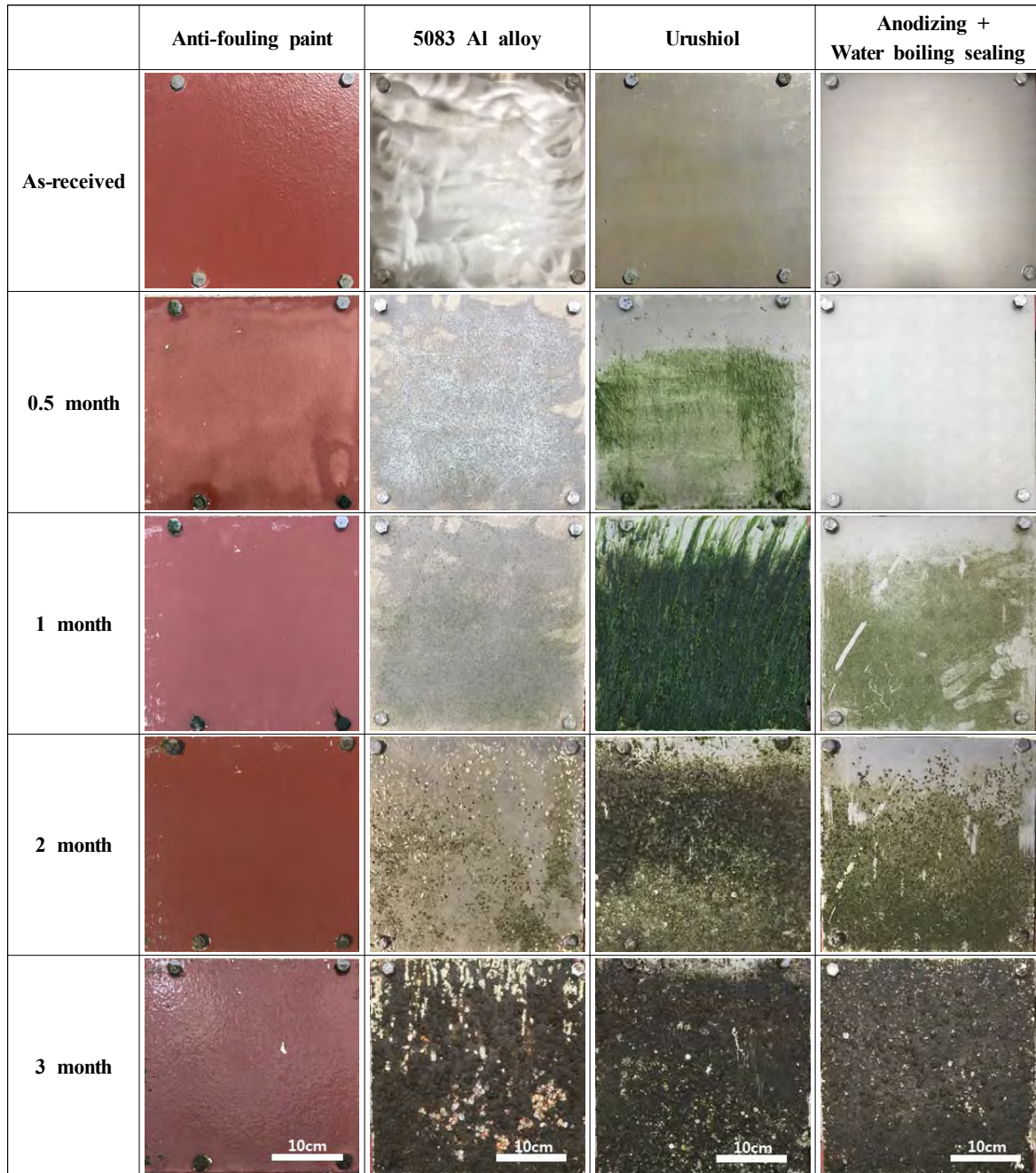


Figure 5: Results of 3rd marine immersion test for anti-fouling paint, 5083 Al alloy, urushiol and anodizing + water boiling sealing

료 후 알루미늄 합금 모재(Figure 7 (b))와 우루시올(Figure 7 (c))의 경우 상대적으로 크기가 큰 동물성 해양생물들은 대부분 제거되었으나 여전히 빨간색 원형으로 표시한 바와 같이 상대적으로 크기가 작은 동물성 해양생물들의 서식이 관찰되었다. 특히 알루미늄 합금 모재 보다 우루시올의 경우 동물성 해양생물의 개체수가 더 많아 오히려 방오성능은 저하되는 것으로 확인되었다. 반면 비등수 실링 시편은 식물성과 동물성 해양생물 모두 거의 완전히 제거되었으며, 다만 동물성 해양생물 탈리된 후 남은 흰색 흔적들이 관찰되었다. 또한 동물성 해양생물이 서식했다가 탈리된 흰색 흔적의 내부 또는 그 주변부 모두 부식손상 흔적은

관찰되지 않았다. 결과적으로 정적 환경에서 해양생물이 부착된 시편에 대하여 유속실험을 통해 해양생물의 제거 정도를 조사한 결과, 유속실험 초기 단 1시간만 실시하여도 상대적으로 크기가 큰 동물성 해양생물이 대부분 탈리되어 매우 효과적으로 부착된 해양생물들을 제거할 수 있었다. 그리고 유속실험 시간 경과에 따라 식물성과 동물성 해양생물 모두 점진적으로 제거되는 양상이 나타났다. 특히 양극산화 후 비등수 실링 시편의 경우 정적 환경 조건에서 상대적으로 가장 적은 개체수의 해양생물이 번식하였으며, 유속실험 시 가장 효과적으로 해양생물이 제거되어 실험 종료 시에는 해양생물의 서식 흔적만 남고 모두 제거되었다.



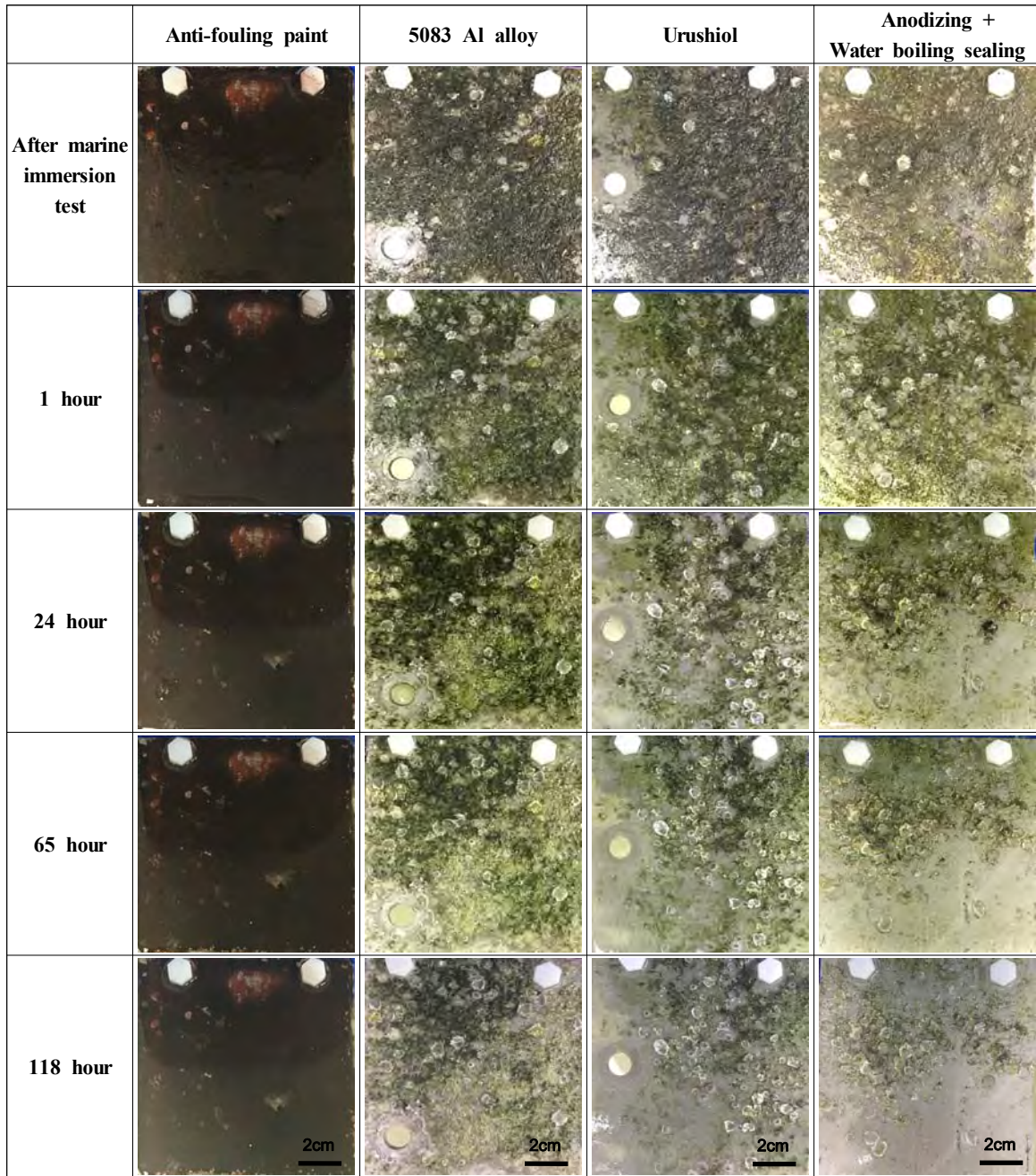
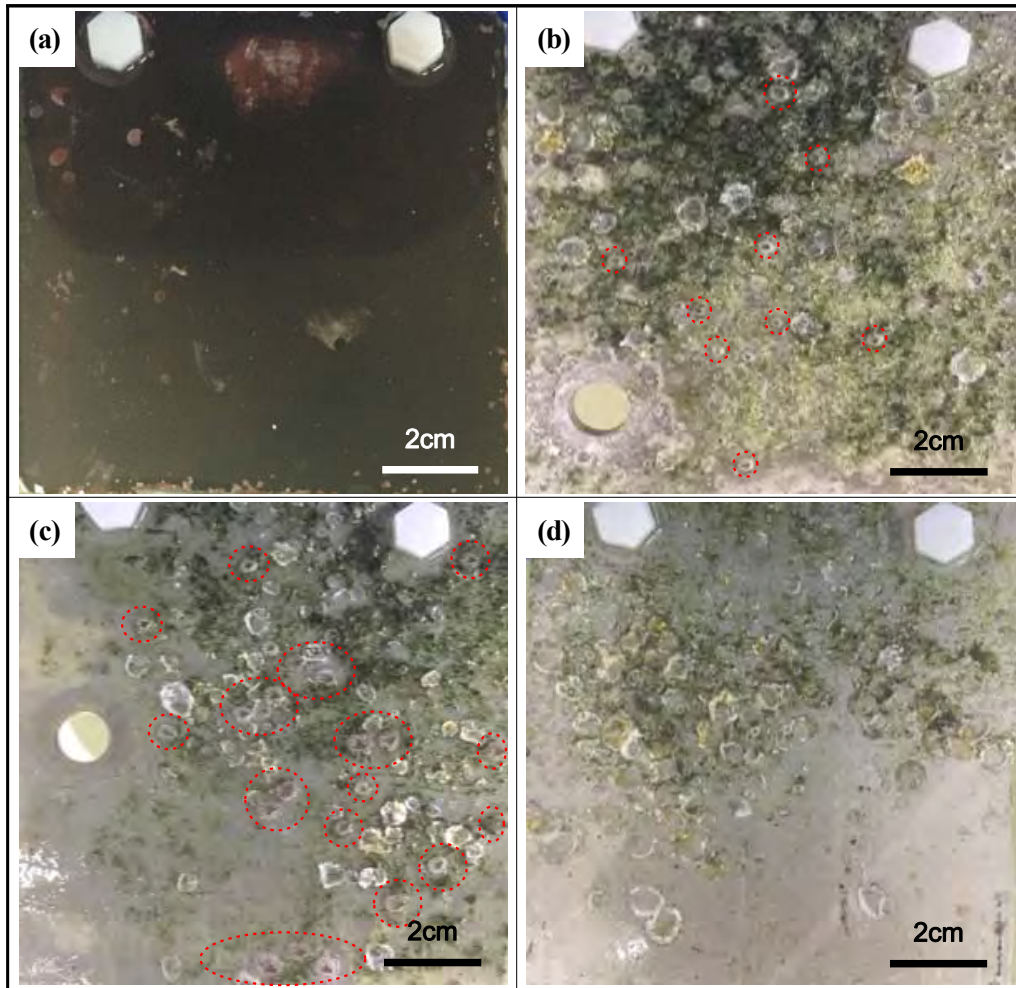


Figure 6: Results of flow rate test for marine organism removal

더불어 부식손상 역시 관찰되지 않았다. 이와 같이 유속변화에 따른 부착된 해양생물의 제거는 타 연구자들의 연구 결과에서도 유사하게 확인된 바 있다. F. Casse *et al.* [14]은 정적 및 동적 조건에서 해수에 침지된 선박의 해양생물 부착특성을 연구하였다. 이들은 정적인 조건은 정박 조건을 모사하고자 60일간 실험역에 침적하였으며, 60일간의 정적인 시험 후 동일 시험편에 대해 동적 시험을 실시하였다. 그 결과 60일 동안 정적인 조건에서 침적 후에는 모든 시험편에서 해양생물이 80% 이상의 점유면적비율을 나타냈으나, 4~5 m/s 유속 조건이 포함된 정적-동적 조건에서는 점유면적비율이 모두 감소하는 경향이 관찰되었다. 그

리고 A. D. M. Coutts *et al.* [15]-[17]은 6m급 알루미늄 경주용 보트의 선저 용골(keel)에 시험편을 설치하여 다양한 속도에서 해양생물의 부착 여부를 비교하였다. 이 연구를 통해 항해 속도 증가(Slow : 5, Medium : 10, Fast : 18노트)와 해양생물 부착물의 제거 사이에 상관관계가 있음을 확인하였다. 즉, 항해 속도가 증가함에 따라 부착된 종의 수, 즉 종 풍부도(Species richness)와 해양생물의 점유면적비율(Percentage cover)의 수치가 감소하는 경향을 보였다. 한편 A. D. M. Coutts *et al.* [18]은 4.0~21.5 노트 범위의 선박 속도에서 해양생물 부착 특성 연구 결과, 선체 위치에 따른 큰 차이는 없으나, 속도가 빠를수록 해양생물 부착이 현저히 감소



**Figure 7:** Surface observation after flow rate test during 118 hours for marine organism removal; (a) Anti-fouling paint, (b) 5083 Al alloy, (c) Urushiol, and (d) Anodizing + Water boiling sealing

**Table 3:** Summary of percentage biofouling cover of various antifouling coatings with flow rate

Reference	Immersion		Flow rate	Removal effect of marine organism
	Static	Dynamic		
Casse <i>et al.</i> [14]	60 day	15 day	7.8~9.7 knots (4-5 m/s)	Coating 1: 3% decrease
				Coating 2&3: 80% decrease
				Coating 4: 47% decrease
Coutts <i>et al.</i> [16]	70 day	7 day	5 knots(2.57 m/s)	11% decrease
			10 knots(5.14 m/s)	24% decrease
			18 knots(9.26 m/s)	85% decrease
This work	66 day	4.9 day	9.5 knots(4.9 m/s)	Almost removed (without corrosion damage)

하였다. 따라서 선박의 항해 속도는 해양생물 부착 여부를 위한 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 상기 내용들을 토대로 **Table 3**에는 본 연구와 유사한 환경에서 진행된 타 연구자들의 연구결과와 본 연구에서 적용한 비등수 실링 시편의 유속실험 결과를 정리하였다. 그 결과, 정적 환경에서 본 연구에서 적용한 양극산화 후 비등수 실링처리된 알루미늄 합금 표면에 해양생물이 부착되더라도 유속이 가해지는 동적 환경이 조성되면 서식하고 있는 해양생물을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

선체 구조용 알루미늄 합금에 대하여 방오성능을 확인하기 위해 방오도료 및 다양하게 표면처리된 알루미늄 합금 시편에 대하여 정적인 침적실험과 동적인 유속실험을 통해 해양생물 부착 특성을 평가하였다. 그 결과, 방오도료가 정적인 환경과 동적인 환경 모두에서 가장 우수한 내식성과 방오성능을 나타낸 반면, 알루미늄 합금 모재, 우루시올, 나노 세라믹 실링 그리고 Ni 도금 및 그 후처리된 시편의 경우 해양생물의 성장과 더불어 부식손상이 동반되어 그 특



성이 열악하게 확인되었다. Cu가 포함된 Zn-Al 실링 시편의 경우 다른 표면처리에 비해 상대적으로 우수한 방오성능을 보였으나 선체 적용을 위한 추가 연구가 필요한 것으로 판단되었다. 한편 비등수 실링 시편의 경우 정적인 침적 실험에서 해양생물 서식이 관찰되었으나 9.5 knot 유속 조건에서 118시간 경과 시 부착된 해양생성물의 제거를 기대할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(무도장, 유지보수 프리 친환경 알루미늄 선박 건조와 100ft급 대형요트 설계·건조 기술개발 및 시제선 건조).

## References

- [1] K. Y. Chung, K. S. Rhyu, and H. R. Lee, "A study on the diagnostic technology for fouling occurred in heat exchanger," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 502-508, 2005 (in Korean).
- [2] J. S. Oh, J. H. Kwak, S. Y. Bae, S. Y. Jung, and J. Y. Lee, "Generation characteristic of WEC for buoy," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, no. 8, pp. 1123-1128, 2008 (in Korean).
- [3] M. A. Champ, "A review of organotin regulatory strategies, pending actions, related costs and benefits," *Science of the Total Environment*, vol. 258, no. 1-2, pp. 21-71, 2000.
- [4] M. Schultz, C. Kavanagh, and G. Swain, "Hydrodynamic forces on barnacles: Implications on detachment from fouling-release surfaces," *Biofouling*, vol. 13, no. 4, pp. 323-335, 1999.
- [5] R. Holland, T. M. Dugdale, R. Wetherbee, A. B. Brennan, J. A. Finlay, J. A. Callow, and M. E. Callow, "Adhesion and motility of fouling diatoms on a silicone elastomer," *Biofouling*, vol. 20, no. 6, pp. 323-329, 2004.
- [6] J. W. Whitehouse, M. Khalanski, M. G. Sargolia, and H. A. Jenner, "The control of biofouling in marine & estuarine power stations," A collaborative report by CEGB, EDF, ENEL & KEMA, NW/R 19, 1985.
- [7] K. K. Satpathy, A. K. Mohanty, G. Sahu, S. Biswas, and M. Selvanayagam, *Biofouling and Its Control in Seawater Cooled Power Plant Cooling Water System - A Review*, Nuclear Power, Pavel Tsvetkov (Eds), London: IntechOpen, 2010.
- [8] M. Lemos, F. Mergulhao, L. Melo, and M. Simoes, "The effect of shear stress on the formation and removal of *Bacillus cereus* biofilms," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 93, pp. 242-248, 2015.
- [9] Y. P. Tsai, "Impact of flow velocity on the dynamic behaviour of biofilm bacteria," *Biofouling*, vol. 21, no. 5-6, pp. 267-277, 2005.
- [10] E. Paul, J. C. Ochoa, Y. Pechaud, Y. Liu, and A. Line, "Effect of shear stress and growth conditions on detachment and physical properties of biofilms," *Water Research*, vol. 46, no. 17, pp. 5499-5508, 2012.
- [11] D. Rubio, C. Lopez-Galindo, J. F. Casanueva, and E. Nebot, "Monitoring and assessment of an industrial antifouling treatment. Seasonal effects and influence of water velocity in an open once-through seawater cooling system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, no. 1-2, pp. 378-387, 2014.
- [12] J. C. Kim, J. K. Ahn, S. Y. Ko, Y. H. Choi, D. H. Kim, and T. Y. Lee, "Antimicrobial activities of urushiol and urushiol derivatives," *Clean Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 22-27, 2007 (in Korean).
- [13] J. A. Gonzalez, V. Lopez, E. Otero, and A. Bautista, "Postsealing changes in porous aluminum oxide films obtained in sulfuric acid solutions," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 147, no. 3, pp. 984-990, 2000.
- [14] F. Casse and G. W. Swain, "The development of microfouling on four commercial antifouling coatings under static and dynamic immersion," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 57, no. 3, pp. 179-185, 2006.
- [15] A. D. M. Coutts, "Hull fouling as a modern vector for marine biological invasions: investigation of merchant vessels visiting northern Tasmania," Australian Maritime College, Faculty of Fisheries and Marine Environment, 1999.
- [16] A. D. M. Coutts, R. F. Piola, C. L. Hewitt, S. D. Connell, and J. P. A. Gardner, "Effects of vessel voyage speed on survival of biofouling organisms: implications for translocation of non-indigenous marine species," *Biofouling*, vol. 26, no. 1, pp. 1-13, 2010.
- [17] A. D. M. Coutts and M. D. Taylor, "A preliminary investigation biosecurity risks associated with biofouling on merchant vessels in New Zealand," *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, vol. 38, no. 2, pp. 215-229, 2004.
- [18] A. D. M. Coutts, R. F. Piola, M. D. Taylor, C. L. Hewitt, and J. P. A. Gardner, "The effect of vessel speed on the survivorship of biofouling organisms at different hull locations," *Biofouling*, vol. 26, no. 5, pp. 539-553, 2010.