

# 물 제트를 이용한 소형선박제작 시편의 선체부착생물 제거에 관한 실험적 연구

서대원\* · 오정근\*\*†

\*, \*\* 군산대학교 조선해양공학과 교수

## Experimental Study on the Removal of Biofouling from Specimens of Small Ship Constructions Using Water Jet

Daewon Seo\* · Jungkeun Oh\*\*†

\*, \*\* Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National Maritime University, Gunsan, 54150, Korea

**요약** : 선박에 부착된 수중생물은 선체에서 성장하면서 선박의 저항을 크게 증가시킬 뿐만 아니라 부착생물이 배와 함께 이동하면서 지역의 해양 생태계 교란을 야기시키기도 한다. 이에 따라 국제해사기구에서는 선체부착생물의 이동을 막기 위해 선체부착생물 제거 및 청소성능 평가 논의를 시작해 오고 있다. 본 연구에서는 소형선박에 사용되는 FRP(Fiber Reinforced Plastic), HDPE(High Density Polyethylene), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 재료의 시편을 격포항(전라북도)에 약 80일간 양생시킨 후 물 제트 노즐을 이용하여 부착생물 제거 실험을 수행하였다. 그 결과 김과 같은 해조류는 노즐과 시편과의 거리가 1.8cm, 100bar 일 때 제거되었지만, 따개비의 경우 200 bar 이상은 되어야 청소가 되는 것을 확인하였다.

**핵심어** : 선체부착생물, 물 제트, 따개비, 해양생태계교란, 해조류

**Abstract** : Fouling organisms attached to a ship not only greatly increase the resistance of the ship as they grow on the hull but also cause disturbances in local marine ecosystems as they move with the ship. Accordingly, the International Maritime Organization has started discussing the removal of biofouling and evaluation of cleaning performance to prevent the migration of hull-fouling species. In this study, specimens of FRP(Fiber Reinforced Plastic), HDPE(High Density Polyethylene), and CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) materials used for small ship construction were cured in Gyeokpo Port (Jeonlakkbuk-do) for about 80 days. Then, attached organism removal experiments were performed using a water jet nozzle. The results show that seaweeds, such as laver, were removed when the distance between the nozzle and the specimen was 1.8 cm and the pressure was 100 bar. Furthermore, it was confirmed that the cleaning of barnacles was possible only when the pressure was 200 bar or more.

**Key Words** : Bio-fouling, Water jet, Barnacle, Disruption of the marine ecosystem, Seaweed

### 1. 서론

선박 평형수 배출로 인해 야기되는 토착 해양생물에 대한 생태계 교란 문제를 감소시키기 위해 국제해사기구(IMO)는 환경규제를 점진적으로 강화해 왔으며, 현재는 선박의 평형수를 살균하여 배출하도록 강제화되었다.

또한 최근 국제해사기구에서는 선체에 부착되어 다른 나

라 해역으로 이동하는 선체부착생물에 대한 관리 및 규정을 마련하기 위한 노력을 진행해 오고 있다.

선체부착생물이란 선체 외판에 붙어 자라게 되는 수초, 물이끼, 따개비등의 해양생물을 의미한다. 이러한 선체부착생물은 선박평형수와 마찬가지로 선박을 따라 이동하여 생태계 교란 문제를 일으키는 주원인으로 주목받고 있다.

이에 국제해사기구에서는 2011년 MEPC 62차에 회의에서 선박의 부착생물 통제 및 관리지침을 채택하였다. 그러나 본 지침은 현재까지 강제규정은 아니며, 권고 지침 수준에 머무르고 있다. 그러나 국제해사기구는 선박평형수 의무규정과

\* First Author : dwseo@kunsan.ac.kr, 063-469-1858

† Corresponding Author : Jungkeun@kunsan.ac.kr, 063-469-1857

마찬가지로 선체부착생물 통제 및 관리지침 등을 강제화하여, 전 세계 해양환경을 보호할 수 있도록 논의해 오고 있다.

2020년 3월 해양오염방지대응 전문위원회는 선체부착생물에 대한 지침 개정안을 합의하였으며, 통신작업반을 통해 지침의 핵심요소(평가 기준, 평가 구역, 평가 방법)를 검토해 오고 있다. 특히, 뉴질랜드는 이미 자국항만의 해양생태계 교란을 최소화하기 위해서 자국항만 입항 30일 이전에 선체 청소를 완료했다는 문서를 요구하고 있다. 미국 캘리포니아 주 역시 선체부착생물 관리계획을 수립하고 지속적인 관리 및 기록 유지를 의무화하고 있다.

선체부착생물은 생물의 이동으로 인해 발생하는 해양생태계 교란과 더불어 선박의 저항을 증가시켜 선박 연료 효율을 크게 감소시키는 문제가 있다. 대형상선의 부착되는 생물로 인해 최대 15%까지 선박의 마찰저항이 크게 증가된다는 보고가 있다(Jung, 2015; Oliveira et al., 2018). 따라서 선주는 선박의 정기 검사 시 배를 상가할 때, 선체 청소를 함께 진행하는 것이 일반적이다.

선체를 청소하는 도구에 따라 날카로운 끌 등을 이용하는 수동선체청소법, 모터 기반의 회전 브러시를 이용하는 방법, 물 제트를 이용하는 비접촉식 방법으로 나눌 수 있다(Song and Cui, 2020).

수동선체청소방법은 잠수부가 입수하여 선체를 세척솔로 청소하거나, 끌을 이용하여 선체부착생물을 제거하는 방법이다. 두 번째는 모터로 회전하는 브러시로 선체부착생물을 제거하는 방법이다. 본 방법은 어떠한 재질의 브러시를 사용하느냐에 따라 청소효율이 바뀔 수 있다. 선체에 부착되어 있는 생물이 부착력이 낮은 해조류 일 경우 나일론 소재의 브러쉬만으로 청소할 수 있으며, 부착력이 높은 따개비 형태의 생물일 경우에는 금속재질의 브러쉬를 사용하여 제거할 수 있다(Fig. 1). 그러나 단단한 금속재질의 브러쉬를 사용할 경우 따개비 뿐만 아니라 선체의 도장면도 크게 손상될 수 있으므로 선체부착생물중에 따라 알맞은 브러쉬 재질선택이 필요하다.

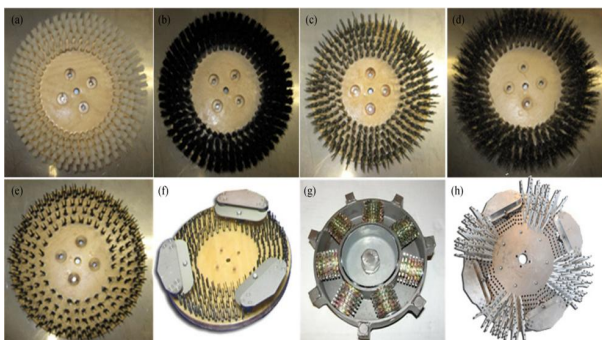


Fig. 1. Brushes of various materials (Song and Cui, 2020).

세 번째로 비접촉식 방법으로는 고압의 물 제트를 이용하는 방법(Fig. 2), 캐비테이팅 제트를 이용하는 방법, 초음파를 이용하는 방법, 레이저를 이용하는 방법 등이 있다. 비접촉식 방법의 장점은 따개비만 효과적으로 떼어내고, 선체 도장면을 최대한 보호할 수 있다는 점이다.

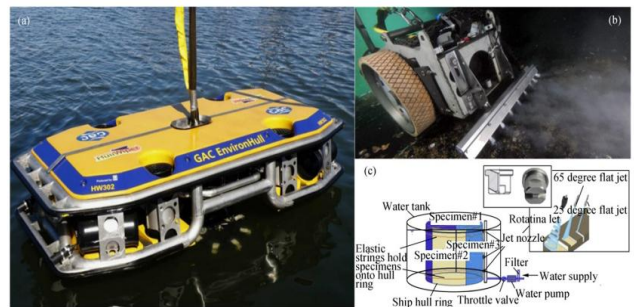


Fig. 2. Underwater cleaning robot using water jet, www.hullwiper.co.

최근 들어 선체를 청소하기 위한 로봇개발 연구가 활발히 진행되고 있으며, Table 1과 같이 다양한 형태의 선체청소로봇이 이미 개발되었다. 대부분 물 제트와 브러쉬 이용하여 청소하는 방법을 사용하고 있으며, 물속에서 초음파를 이용하여 청소하는 방법도 개발된 바 있다.

어떠한 청소법을 사용하는지도 중요하지만, 선체를 구석 구석 움직여가며 청소를 해야 하므로 선체표면에 잘 고정되어 효과적으로 이동해야 하는 것 또한 중요한 요소이다. 현재까지 대부분 자력을 이용하는 방법, 진공을 이용하는 방법, 스러스터를 이용하는 방법 등이 적용되어 오고 있다.

Table 1. Commercial underwater cleaning robot (Bertram, 2021)

Robot	Country	Adhesion method	Cleaning system
Collector	Norway		
Fleet cleaner	NL		
Magnetic hull Crawler	France	Magnetic	Waterjet
HullWiper	UAE	Vacuum	
Daewon robot	Korea	Thrusters	
Hullbot	Australia		Brush
HullSkater	Norway	Magnetic	
Itch	Norway	Ship flow field	
Hull bug	USA	Magnetic/Vacuum	Brush/Waterjet
Rovingbat	France	Vacuum	
Hull Cleaner	USA	Magnetic	Brush/Ultrasonic

본 연구에서는 서해안 지역에서 성장하는 선체부착생물을 조사하고, 부착생물을 제거하기 위한 노즐의 압력, 유량, 노즐과 선체와의 거리등을 다양하게 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

## 2. 선체부착 생물 양생

### 2.1 시편제작

선체부착생물의 양생을 위해 Fig. 3과 같이 시편을 높이 0.8 m, 폭 0.6 m로 제작하였다. 소형선박에 주로 사용되는 재료에 따른 부착생물 변화를 조사하기 위해서 유리섬유강화플라스틱(FRP: Fiber Reinforced Plastic) 시편을 제작하였다. 또한 향후 소형선박에 사용 가능한 고밀도 폴리에틸렌(HDPE : High Density Polyethylene) 시편, 탄소섬유를 이용한 탄소강화플라스틱(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastic) 시편을 준비하였다. 추가로 방오도료(Anti-Fouling paint, 모델명 A/F 3020)의 효과를 확인하기 위해서, 1/2영역에는 방오도료를 바르지 않았다.

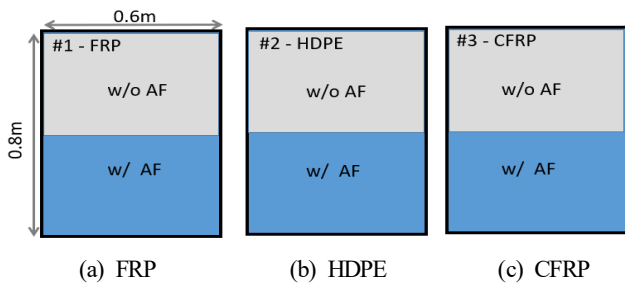


Fig. 3. Fouling specimen with and without AF.

### 2.2 선체부착생물 시편 설치

선체부착생물의 양생을 위해 제작된 시편을 전라북도 부안군 격포항에 80일간(21.09.23~21.12.10) 담귀두어 생물이 부착되도록 하였다. 시편을 넣을 당시 최고 수온은 대략 23.5°C였으며, 시편을 회수하는 당시는 수온이 점점 내려가 약 11.2°C로 차가웠다(Fig. 4).

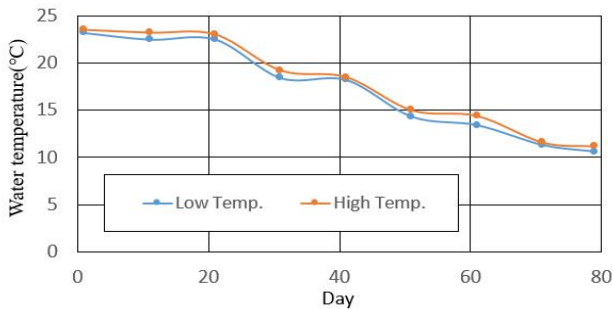


Fig. 4. Changes in water temperature in Gyeokpo Port.

격포항은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 방파제로 인해 항만 내부의 유동 변화가 크지 않으며, 시편 회수가 쉽고 실험장소(군산대학교)로의 이동에 많은 시간이 걸리지 않아, 표면에 양생된 부착생물의 신선도를 유지할 수 있는 장점이 있다. 제작된 시편은 Fig. 5의 표시된 붉은색 화살표 지점에 3가지 시편을 자유 수면으로부터 약 30 cm 아래에 위치하도록 설치하였다.

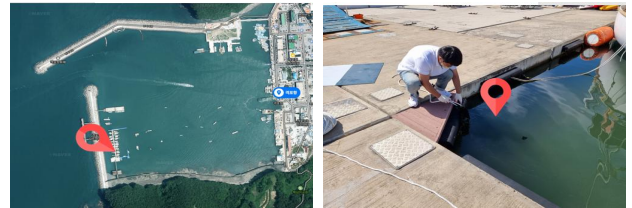


Fig. 5. Bio-fouling curing place in Gyeokpo port (Jeollabuk-do).

### 2.3 선체부착생물 양생

3가지 시편을 자연 그대로 바다에 담귀두고 80일 동안 양생시켰다. 기존 연구(Grzegorzczuk et al., 2018; Hayek et al., 2021)를 바탕으로 미뤄보아 Fig. 6과 같이 시편을 수심일 동안 수중에 담귀 뒀으므로, 박테리아와 같은 micro-fouling 단계를 넘어서 따개비 등과 같은 macro-fouling이 발생하였을 것으로 기대할 수 있다.

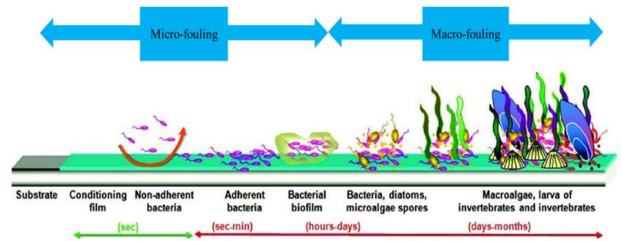


Fig. 6. Schematic representation of marine bio-fouling formation (Hayek et al., 2021).

80일이 지난 이후 시편에 부착된 생물의 상태를 Fig. 7~9에 보인다. Fig. 7(a)는 FRP 소재의 시편에 방오도료(AF: Anti Fouling paint)를 바르지 않은 상태에서 80일간 양생시킨 것이며, Fig. 7(b)는 FRP시편에 방오도료를 바르고 80일간 양생시킨 것이다. 방오도료 유무에 관계없이 육안으로 살펴볼 때, 선체부착생물은 거의 자라지 않은 것이 확인되었다.

Fig. 8(a)는 HDPE(고밀도 폴리에틸렌)소재의 시편에 방오도료를 바르지 않은 상태에서 80일간 양생시킨 것이며, Fig. 8(b)는 HDPE시편에 방오도료를 바르고 80일간 양생시킨 것이다. 방오도료를 바른 Fig. 8(b)가 방오도료를 바르지 않은 Fig. 8(a)에 비해 상대적으로 부착생물이 많이 성장하지 않은 것으로 확인된다.



마지막으로 Fig. 9(a)는 CFRP(탄소강화플라스틱)소재의 시편에 방오도료를 바르지 않은 상태에서 80일간 양생시킨 것이며, Fig. 9(b)는 CFRP시편에 방오도료를 바르고 80일간 양생시킨 것이다. 방오도료를 바르지 않은 Fig. 9(a) 시편에서는 김과 같은 해조류 형태의 부착생물이 상당히 많이 붙어 있는 것으로 확인되었다. 반면 방오도료를 바른 CFRP시편 (Fig. 9(b))는 상대적으로 오염이 덜 된 것으로 확인 되었다. 즉 방오도료의 역할이 상당히 큰 것으로 나타났다.

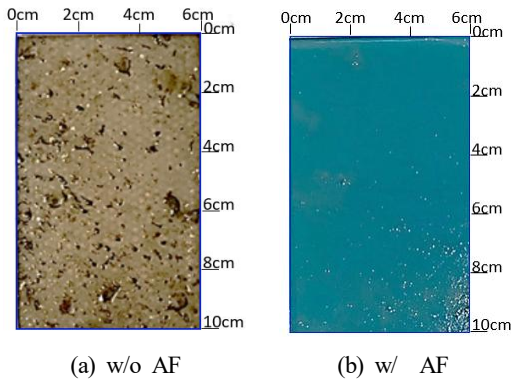


Fig. 7. FRP specimens cured for 80 days.

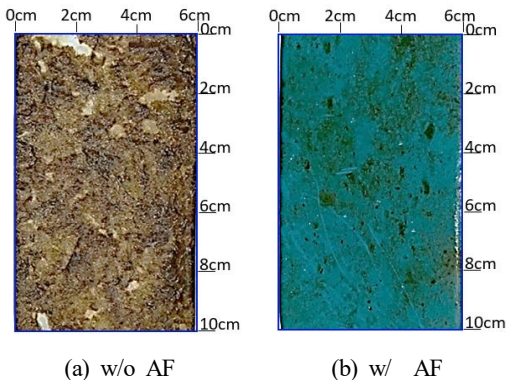


Fig. 8. HDPE specimens cured for 80 days.

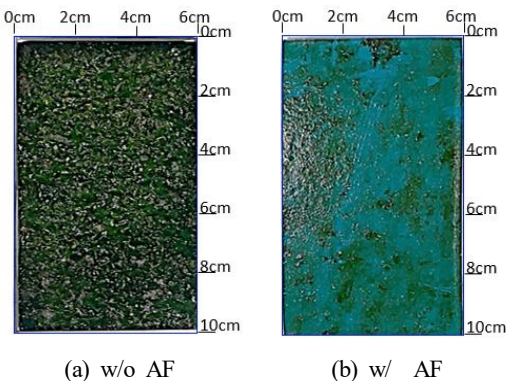


Fig. 9. CFRP specimens cured for 80 days.

### 3. 물 제트를 이용한 부착생물 제거실험

#### 3.1 실험 셋업

물 제트를 이용한 부착생물 제거실험은 군산대학교 조과 시험동에서 수행하였다. 실험에 사용된 물 제트 펌프는 Fig. 10과 같이 최대압력 300 bar, 15 L/min를 분사할 수 있는 고압 이동식 펌프이다. 본 펌프는 휘발유를 이용하는 내연기관으로 바퀴등이 있어 이동이 편리하도록 제작되어 있다. 실험에 설치한 노즐은 25° 간격을 갖고 분사할 수 있는 어댑터를 이용하여 실험을 수행하였다. 또한, 시편은 수면으로부터 하방(d)으로 0.2 m 위치에 놓이게 하였으며, 수중에서 시편과 노즐 끝단의 거리(H)를 조정해 가며 부착생물 제거실험을 수행하였다.

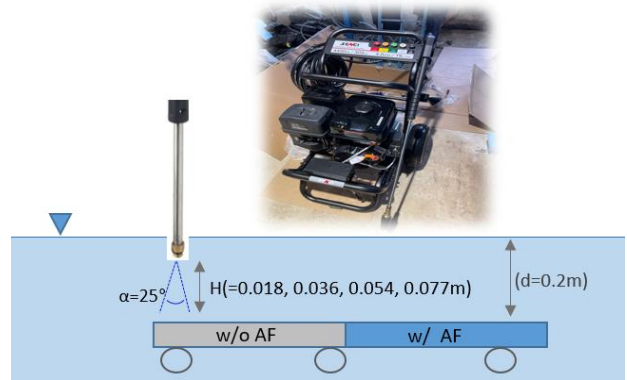


Fig. 10. Setup of cleaning test.

사용된 노즐은 Fig. 11과 같이 단면은 타원형으로 단축이 1 mm이고, 장축이 1.2 mm인이며, 끝단부에 1 mm의 슬릿 형태를 가진다. 장단축의 길이를 조정하여 분사각도의 크기를 정하는 것을 미뤄 짐작할 수 있다.



Fig. 11. Nozzle adapter for spraying with 25°.

#### 3.2 실험 조건

노즐의 끝단과 시편과의 거리(H)는 1.8 cm, 3.6 cm, 5.4 cm, 7.7 cm인 경우에 대해서 각 100 bar의 동일한 압력하에서 실험을 수행하였다. 또한 H가 일정하게 고정된 상태에서 시편

의 이동속도는 약 0.2 m/s로 Table 2와 같이 다양한 반복시험을 수행하였다.

Table 2. Model test conditions

	H(cm)	P(bar)	Vtip(m/s)
FRP w/o AF	1.8	100	165
	3.6		
	5.4		
	7.7		
FRP w/ AF	1.8	100	165
	3.6		
	5.4		
	7.7		
HDPE w/o AF	1.8	100	165
	3.6		
	5.4		
	7.7		
HDPE w/ AF	1.8	100	165
	3.6		
	5.4		
	7.7		
CFRP w/o AF	1.8	100	165
	3.6		
	5.4		
	7.7		
FRP w/ AF	1.8	100	165
	3.6		
	5.4		
CFRP w/o AF (Back side)	1.8	100	165
		200	220
		275	260

3.3 부착생물 시편에 대한 물제트 청소 후 결과

Fig. 12~17은 FRP판, HDPE판, CFRP판에 방오도료를 바르지 않은 시편과 방오도료를 바른 시편에 대해서 압력을 100 bar로 고정하고 시편과 노즐사이의 거리(H)를 다양하게 변경해가며 실험한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 12는 방오도료를 바르지 않은 FRP 시편으로 한 두개 정도의 작은 따개비들이 관찰되기도 하였지만, AF를 바른 시편(Fig. 13)에서는 보이지 않았다. 두 시편 모두 노즐간의 거리(H)에 가까울수록 청소 효과가 육안으로 구별될 수 있을 만큼 확연한 차이를 보였다. 특히 Fig. 13(a)와 Fig. 13(d)를 비교할 때, 100 bar 조건에서 노즐과 시편의 거리가 7.7 cm인 경우 청소가 거의 되지 않다가 1.8 cm 정도 가까이 와서야 청소가 된 것으로 보인다. 이러한 경향은 HDPE, CFRP 시편에서도 비슷한 경향을 보임에 따라 향후 청소에 필요한 최적 압력을 선정할 때 이를 고려해야 할 필요가 있을 것으로 판단하였다.

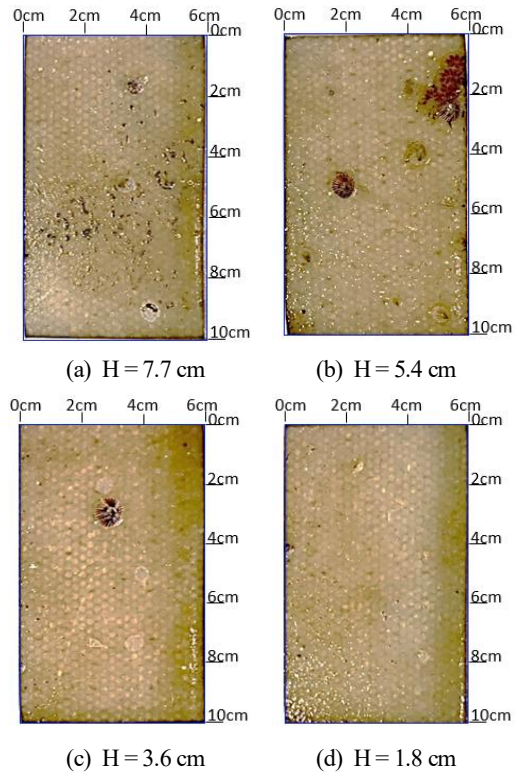


Fig. 12. Specimens after cleaning (FRP w/o AF, 100 bar).

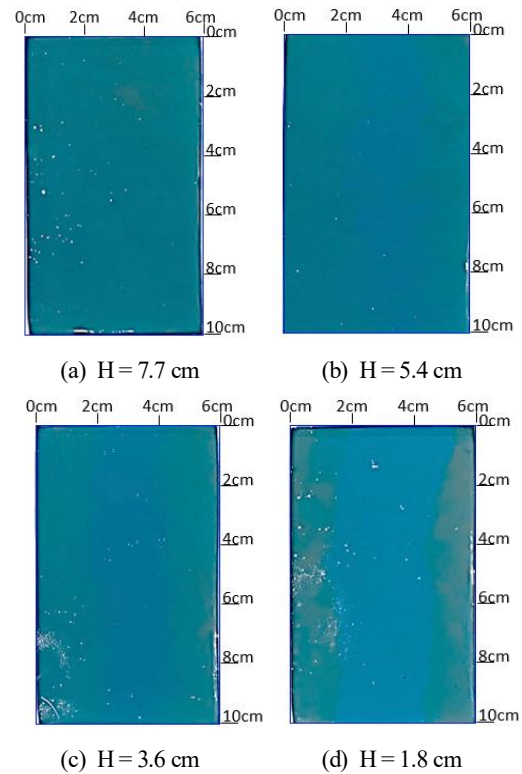
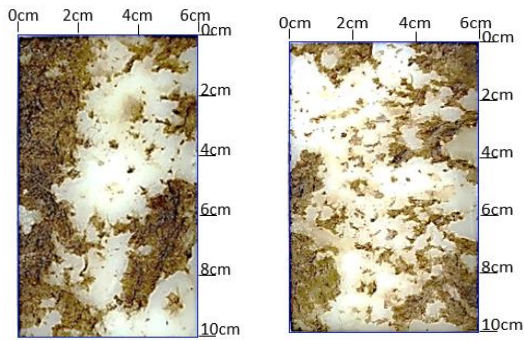


Fig. 13. Specimens after cleaning (FRP w/ AF, 100 bar).

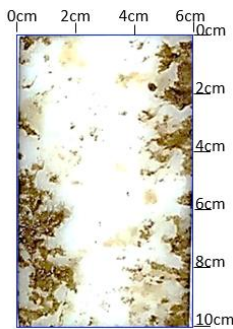


물 제트를 이용한 소형선박제작 시편의 선체부착생물 제거에 관한 실험적 연구

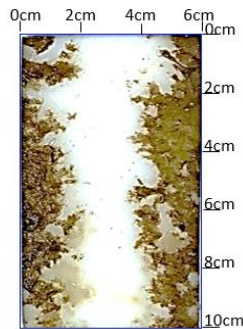


(a) H = 7.7 cm

(b) H = 5.4 cm

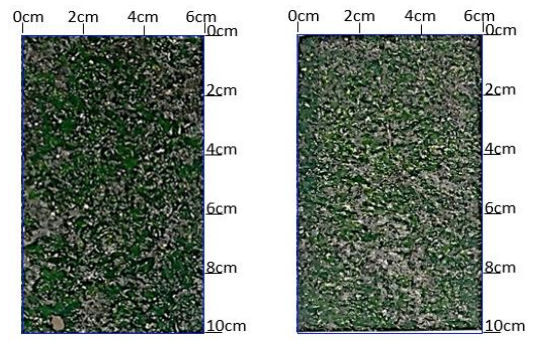


(c) H = 3.6 cm



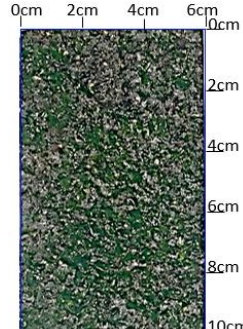
(d) H = 1.8 cm

Fig. 14. Specimens after cleaning (HDPE w/o AF, 100 bar).

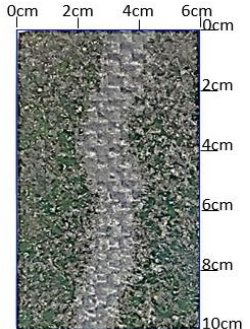


(a) H=7.7cm

(b) H=5.4cm

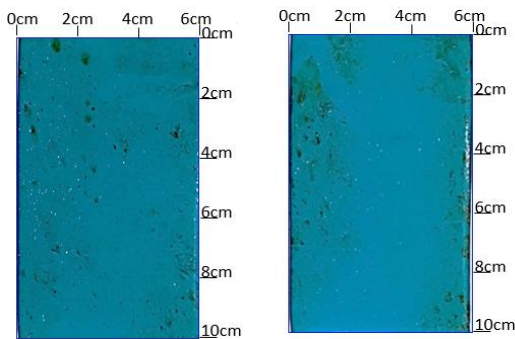


(c) H = 3.6 cm



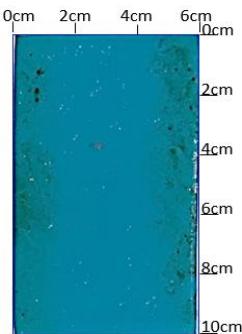
(d) H = 1.8 cm

Fig. 16. Specimens after cleaning (CFRP w/o AF, 100 bar).

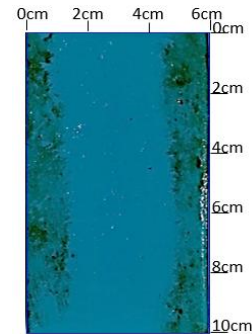


(a) H = 7.7 cm

(b) H = 5.4 cm

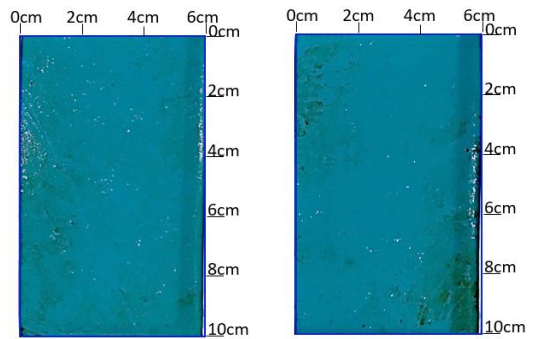


(c) H = 3.6 cm



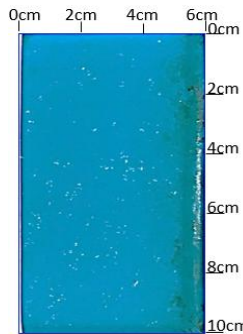
(d) H = 1.8 cm

Fig. 15. Specimens after cleaning (HDPE w/ AF, 100 bar).

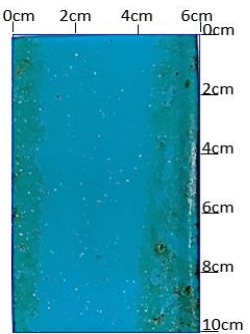


(a) H = 7.7 cm

(b) H = 5.4 cm



(c) H = 3.6 cm



(d) H = 1.8 cm

Fig. 17. Specimens after cleaning (CFRP w/ AF, 100 bar).

Fig 14, 15는 방오도료 유무에 따른 HDPE 시편으로 FRP보다 상대적으로 높은 밀도로 생물이 부착되어있는 것을 알 수 있다. 노즐과 시편의 거리가 상대적으로 먼 7.7 cm인 경우의 Fig 14(a), Fig 15(a) 조건에서 물 제트 노즐에 의해 완벽하지는 않지만 일정부분 청소가 된 것을 알 수 있다.

또한, Fig 14(d), Fig 15(d)에서 볼 수 있듯이 노즐의 각도가 25°이기 때문에 노즐과 시편 사이의 거리가 가까워질수록 물 제트가 시편에 부딪히는 면적 작아지지만, 정체압력이 증가하여 좁은 면적을 더욱 깨끗하게 청소하는 것으로 보인다.

Fig. 16과 Fig. 17은 CFRP 시편이며, 방오도료 유무에 따른 청소 효과를 보인다. 특히 방오도료가 칠해지지 않은 Fig. 16에서는 김과 같은 해조류가 시편에 빼곡히 부착되어 있는 것을 알 수 있다. 따개비를 양생했던 부안 및 서해안 지역은 보통 김 양식을 많이 하는 것으로 유명한 지역이기에 김 포자 등이 양생된 것으로 보인다. 방오도료가 칠해지지 않은 Fig. 16에서는 압력이 100 bar, 시편과 노즐 간의 거리(H)가 1.8 cm 정도는 되어야 Fig. 16(d)처럼 김 등의 해조류가 떨어져 나가 청소가 되는 것으로 나타났다. 다만 Fig. 16(d)에서 청소패스가 일정치 않은 이유는 시편의 고정 지그등의 문제가 있어 직선으로 일정치는 않으나, 청소효과에 대한 경향은 뚜렷이 나타났다. 그러나, 방오도료가 칠해진 시편에서는 Fig. 17과 같이 육안으로 볼 때 해조류 성장이 거의 없는 것은 micro fouling 수준임을 알 수 있다.

Fig. 18은 방오도료가 칠해지지 않은 CFRP 시편으로 앞면에는 Fig. 9(a)와 같이 김 등의 해조류가 양생된 반면 뒷면에는 Fig. 18과 같은 따개비류가 양생된 것을 확인하였다. 앞면과 뒷면의 선체 생물 부착 차이로는 햇볕 노출이 가장 클 것으로 보인다. 앞면의 경우 햇볕에 노출된 반면 뒷면은 햇볕에 노출이 되지 않아 직경 5 mm 이상의 따개비등이 성장한 것으로 보인다. 즉 선체부착생물의 성장은 해역별로, 구역별로, 계절별로 크게 다를 수 있음을 미뤄짐작 할 수 있다.

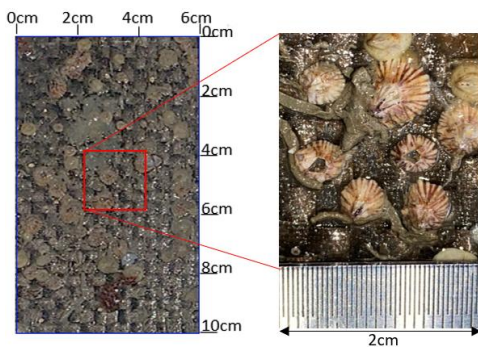


Fig. 18. Banacles before cleaning on the back side of CFRP.

물 제트를 이용하여 직경 5 mm 정도의 따개비의 청소성능을 확인하기 위해 시편과 노즐간의 거리를 1.8 cm로 고정시킨 후 압력을 100 bar, 200 bar, 275 bar로 높여가며 추가시험을 수행하였다.

그 결과 압력이 100 bar인 경우 Fig. 19(a)에서와 같이 따개비가 거의 떨어져 나가지 않았으며, 200 bar로 분사한 Fig. 19(b)에서 따개비가 떨어져 나갔다. Fig. 19(b)의 흰색영역이 따개비가 부착되었던 영역으로 따개비의 부착물질은 청소가 되지 않고 남아 있다. 그러나 275 bar로 더욱 강력하게 분사한 경우 Fig. 19(c)와 같이 따개비의 부착물질까지 청소가 되었음을 알 수 있다. 이를 통해 수중에서 따개비를 제거하기 위해서는 200 bar 이상의 고압 물 제트가 필요하다는 걸 확인할 수 있다.

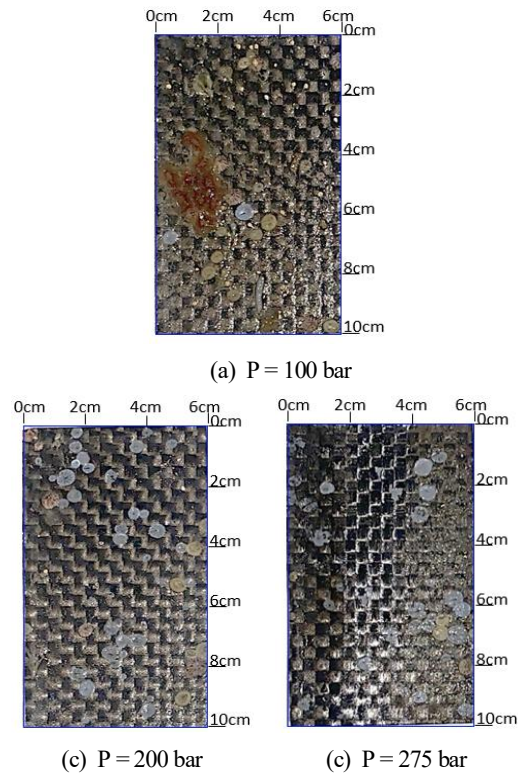


Fig. 19. Cleaning performance according to pressure of water jet, back side of CFRP specimens w/o AF (H = 1.8 cm).

#### 4. 결론

본 연구에서는 소형선박에 부착하는 생물을 제거하기 위한 실험적 연구로 실제 해상에서 시편에 선체부착생물을 양생시키고, 물 제트를 이용하여 부착생물 제거실험을 수행하였다. 그 결과 80일 정도 양생시킨 시편을 보면 방오도료가 있는 시편은 확연히 선체부착생물이 자라지 않은 것을 확인

하였다. 또한 FRP, HDPE, CFRP 등 다양한 시편 별로 선체부착생물의 부착 및 성장이 다름을 확인하였다. 더욱이 시편의 앞면과 뒷면에 따라 성장하는 부착생물의 종도 변화함을 알 수 있었다.

물 제트를 이용하여 시편의 선체부착생물을 제거할 때, 80일 정도 자란 김과 같은 해조류를 제거하기 위해서는 100 bar 이상의 고압 및 시편과 노즐의 거리를 1.8 cm 이하로 선정할 필요가 있었으며, 따개비와 같은 조개류의 경우에는 200 bar 이상의 고압 물 제트가 필요하였다.

청소압력과 시편과 노즐의 거리(H)는 부착생물 중별로 최적의 값이 있을 것으로 보이며, 이를 통해 시편과 노즐간의 거리를 적절히 조절한다면 청소면적이 커져 청소시간도 개선시킬 수 있을 것으로 보인다.

향후 철 구조물로 제작된 대형선박에 사용되는 시편을 바탕으로 일련의 실험을 통해 물제트 청소실험 방법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 군산대학교의 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

## References

- [1] Bertram, V.(2021), Robotic Hull Cleaning - Past, Present and Prospects, 20th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, 8-9 August, 2021, Mulheim, Germany, pp. 16-23.
- [2] Grzegorzczuk, M., S. J. Pogorzelski, A. Pospiech, and K. Boniewicz-Szmyt(2018), Monitoring of Marine Biofilm Formation Dynamics at Submerged Solid Surfaces with Multitechnique Sensors, *Frontiers in Marine Science*, 5, 363, pp. 1-16.
- [3] Hayek, M., M. Salgues, J. C. Souche, E. Cunge, C. Ciraudel, and O. Paireau(2021), Influence of the Intrinsic Characteristics of Cementitious Materials on Biofouling in the Marine Environment, *Sustainability*, 13, 2625, pp. 1-24.
- [4] Jung, K. -S.(2015), Influences of the Surface Pollution Cause by the Marine Growth on Ship Hulls on Engine Performance and Output, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 39, No. 4, pp. 399-404.
- [5] Oliverira, D., A. I. Larsson, and L. Granhag(2018), Effect of ship hull form on the resistance penalty from biofouling, *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, Vol. 34, No. 3, pp. 262-272.
- [6] Song, C. and W. Cui(2020), Review of Underwater Ship Hull Cleaning Technologies, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 19, pp. 415-429.

Received : 2022. 09. 05.

Revised : 2022. 10. 11.

Accepted : 2022. 10. 28.