

국내입항 국제운항선의 선체부착생물 관리에 대한 연구

박정경*† · 허철회** · 김한필*** · 조유경***

*, ** 한국조선해양기자재연구원 해양환경센터 책임연구원, *** 한국조선해양기자재연구원 해양환경센터 선임연구원

Study on the Biofouling Management of International Ships Entering South Korea

JeongKyeong Park*† · ChulHoi Hoe** · HanPil Kim*** · YuKyeong Cho***

*, ** Principal Researcher, Marine Environment Center, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 46744, Korea

*** Senior Researcher, Marine Environment Center, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 46744, Korea

요 약 : 선박을 통한 세계교역 증가에 따라 침입외래종(Invasive Alien Species, IAS)로 인한 해양생태계 파괴 및 사회경제적 피해가 지속적으로 증가하고 있다. 특히 선체표면과 틈새구역(Niche Area)에 부착된 해양생물의 이동은 외래종침입 문제뿐만 아니라 선박의 마찰저항을 증가시켜 운항효율감소 및 온실가스배출 증가를 유발한다. 국제해사기구(IMO)는 최근 선체부착생물 통제 및 관리에 대한 지침 개정작업에 착수하였고 뉴질랜드와 미국 캘리포니아는 이미 자국법으로 선체부착생물 관리를 규제하고 있다. 본 논문에서는 국내에 입항하는 국제운항선 5척을 대상으로 선체부착생물 관리현황과 생물부착현황을 조사하였고, 생물부착종과 피도(Coverage)를 분석하여 생물부착단계 등급(Level of Fouling, LoF rank)을 평가하였다. 모든 선박에서 대형부착생물(Macrofouling)이 관찰되었고 특히 선수 스러스터(Bow thruster), 빌지킬(Bilge keels) 및 해수 흡입구 격자(Sea-chest gratings)와 같은 틈새구역의 대형개체(Macro organisms) 부착이 심각한 수준으로 나타났다. 본 연구에서는 국내 선체부착생물 관리방안을 제시하고, 실선대상 생물부착단계등급 적용 및 검사(Inspection) 방법 개선방안을 제안하고자 하였다.

핵심용어 : 선체부착생물, 침입외래생물, 선박운항효율, 선체부착생물관리, 생물부착단계

Abstract : With the increase in world trade through ships, the destruction of the marine ecosystem and socioeconomic damage due to invasive alien species (IAS) are continuously increasing. In particular, marine organisms attached on the hull surface and niche area increase the friction resistance of ships as well as the invasion of non-indigenous species, and causes a decrease in operational efficiency and an increase in GHG (Green House Gas) emissions. The International Maritime Organization (IMO) has recently begun revising guidelines for the control and management of ship's biofouling, and New Zealand and California in the United States are already regulating biofouling management under their own laws. This study investigated the management status of the submerged surface of ships and marine organisms attachments on five international ships entering South Korea, and analyzed species group and coverage (%) of biofouling communities to evaluate the LoF (Level of Fouling) rank. Macrofouling was observed on all ships surveyed, and specially, the adhesion of macro organisms in niche areas such as bow thruster, bilge keels and sea-chest gratings appeared to be at a serious level. This study proposed the management direction our country should take with regard to ship's biofouling and the improvement measures for evaluation of LoF rank and inspection methods of hull and niche areas.

Key Words : Ship's biofouling, Invasive alien species, Ship energy efficiency, Biofouling control and management, Level of Fouling

1. 서 론

해양 비토착종(Non-Indigenous Species)은 전세계 연안의 생물다양성과 인체보건을 위협하는 위협요소이다(Carlton and Geller 1993; Cohen and Carlton 1998; Mack et al., 2000). 세계교

역의 증가에 따라 선박을 통한 비토착종의 가입, 정착 및 확산 또한 확대되고 있으며 선박평형수(Ballast water) 및 선체부착생물(Ship's biofouling)이 그 대표적인 원인으로 지목되고 있다(Suk, 2018). 국제해사기구(IMO)는 선박평형수를 통한 해양생물의 이동을 저감하기 위하여 2004년 선박평형수관리협약(The International Convention for the Control and Management

† Corresponding Author : jkpark@komeri.re.kr, 051-400-5413

of Ship's Ballast Water and Sediments)을 채택하였고, 2017년 9월 발효되어 선박평형수를 통한 해양생물의 유입을 관리하기 위한 국제기준이 마련되었다.

선체부착생물은 선박평형수보다 생물종 이동에 미치는 영향이 큰 것으로 보고되었다(Jackson et al., 2008; Hewitt et al., 2004; Ruiz et al., 2000; Sylvester et al., 2011). 해양생물이 부착되면 선박표면의 거칠기가 증가하여 마찰저항이 늘어나고 선속의 저하로 이어지며, 결과적으로 온실가스배출량도 증가하게 된다. 생물부착에 의한 선박의 연료소모는 최대 40%까지 증가하는 것으로 보고되었다(Champ, 2000).

IMO는 2011년 선체부착생물 통제 및 관리를 위한 지침(2011 Guideline for the control and management of ship's biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species)을 채택 하였으나 이는 결의서 형태의 권고이며 강제사항은 아니다(IMO.Res.MEPC.207(62), 2011). 그러나 IMO는 2018년부터 Glofouling partnerships 프로젝트를 시행하여 개발도상국을 대상으로 지침서 이행을 독려하고 있으며, 2020년부터 해양오염방지대응 전문위원회(PPR)에서 지침서 개정을 위하여 회원국들 간 상세내용을 협의 중이다. 뉴질랜드, 미국 등 일부 국가는 자국법으로 입항하는 선박의 선체부착생물 관리 규제를 시행하며 선도적 대응을 하고 있다.

이와 같은 선박의 생물부착을 관리하기 위하여 방지 및 제거 등의 다양한 방법이 적용되고 있다. 가장 일반적으로 사용되는 방법은 선저면에 구리(Copper), 이르가롤(Irgarol 1051) 등의 유기화합물 및 중금속이 용출되어 해양생물 부착을 방지하는 방오도료(Anti-fouling coating)를 도장하는 것이다. 선박의 틈새구역은 방오도료 적용이 제한되어 대형부착생물까지 성장하기 좋은 조건으로 외래종의 유입의 핵심부분이 되며 전기분해, 초음파, 스팀분사 등의 다양한 방지시스템이 적용되고 있다.

선체부착생물을 관리하기 위한 또 다른 방법은 부착된 생물을 직접 제거하는 방법이다. 선박의 중간 및 정기검사 시상가(dry-docking)하여 워터젯 및 스크래퍼를 이용하여 직접 제거하기도 하고 수중에서 다이버 및 선체청소로봇을 이용하여 제거하기도 한다.

그러나 이러한 선체부착생물의 관리방법은 해양환경오염 및 비용부담 등의 한계점을 가진다. 대부분의 방오도료에 포함된 중금속 및 유기화합물은 해양환경에 대한 위해가능성이 높다. 또한 방오도료는 해수와의 가수분해 반응으로 외곽층부터 순차적으로 벗겨지는 자기마모형(Self-Polishing Copolymer)으로 일정기간이 경과하면 방오의 효과가 감소되며, MGPS(Marine Growth Prevention System)와 같은 배관 내 방지 시스템도 완벽히 부착을 방지하지 못한다. 선박을 상가하여 제거하는 방법은 많은 비용이 소요될 뿐 아니라 운

항일정에도 영향을 미치므로 주기적인 선체관리방법으로의 한계점이 있다. 비용 및 운항일정을 고려하여 가장 효율적인 제거 방법은 수중에서 직접 부착생물을 제거하는 것이다. 그러나 다이버를 이용한 작업은 안전에 대한 위험부담이 크며, 제거된 생물 및 도료파편이 그대로 바다에 비산되어 외래종의 유입 및 해양환경 오염을 유발한다. 수중로봇을 이용한 제거방법은 해양에 비산되지 않도록 포집하는 기술이 개발되고 있지만, 선수 스러스터, 빌지킬 및 해수 흡입구 격자와 같은 틈새구역은 수중로봇을 이용한 제거가 불가능한 한계점을 가진다.

이와 같이 선체부착생물에 대한 국제규제가 점차 강화되는 분위기 속에서 친환경적이고 효율적인 선박관리방법이 요구되고 있다. 국내에서도 수중청소로봇 개발 및 틈새구역 부착방지 기술개발 등이 활발하게 진행되고 있으나 선체부착생물에 대한 국내 대응방안은 마련되어 있지 않다. 특히, 실제 국내에 입항하는 선박에 부착된 생물 현황 및 선박관리에 대한 정보는 전무한 상황이다.

본 연구에서는 국제운항 선박을 대상으로 선체부착생물 관리현황을 조사하고, 선체 및 틈새구역을 대상으로 뉴질랜드의 생물부착단계(LoF, Level of Fouling)평가방법을 적용하여 국내 유입 생물종과 부착특성을 파악하고자 하였다. 이를 통해 국내 연안환경 보호를 위한 선체부착생물 관리방안을 제시하고, 실선대상 생물부착단계등급 적용의 유효성 및 선체부착생물 검사(Inspection) 방법 개선방안을 제안하고자 하였다.

2. 선체부착생물 관리현황 조사 및 평가법

2.1 선박정보 및 선체부착생물 관리현황 조사

선박의 선체부착생물 관리현황을 조사하기 위하여 중간검사 및 선박수리를 위해 수리조선소에 상가(dry-docking)하는 국제운항 선박 5척(A-E선박)을 대상으로 선체부착생물 관리현황을 조사하였다. 선박 조사는 2021년 6월부터 11월까지 수행하였고, 선박관리에 대한 정보는 선주사 및 선주감독관으로부터 직접 획득하였으며 추가적인 운항 정보는 선박운항정보사이트(www.myshiptracking.com)로 부터 확보하였다. 조사대상 선박의 선종, 선박크기, 주요 운항경로, 평균 선속, 신규 도장시기, 도장종류, 선박건조일 및 선저부 관리방법을 조사하였다. 4척의 선박조사는 전라남도 영암군 수리조선소에서 수행하였고 1척은 경상남도 통영시 수리조선소에서 수행하였다.

2.2 선체 및 틈새구역 생물부착현황 조사

2.1과 동일한 선박을 대상으로 선체 및 틈새구역에 부착

되어 있는 생물의 생물부착단계등급 현황을 조사하였다. 부착생물의 육상 노출을 최소화하기 위하여 플로팅도크에서 배수가 완료되는 즉시 도크내부로 진입하여 신속하게 조사를 수행하였다(Fig. 1). 선박구역은 선체, 선저 및 틈새구역(선수 스러스터, 빌지킬, 해수 흡입구 격자, 방향타(Rudder), 선미관(Stern tube) 및 외부전원식 음극방식장치(ICCP)을 Fig. 2와 같이 구분하여 조사하였다. 선체와 선저 구간은 1m×1m 크기의 방형구에 자석을 부착하여 선체에 밀착시킨 후, 카메라(GoPro hero8)를 이용하여 영상으로 기록한 후 생물부착단계등급을 평가하였고 각 구역에서 최소 5장 이상의 사진을 확보하였다. 틈새구역의 조사는 각 부위의 생물부착상태를 기록하고 촬영된 사진으로 생물부착단계등급을 평가하였고 선체 및 선저와 동일하게 각 구역별 최소 5장 이상의 영상을 촬영하였다.



Fig. 1. Survey of ship's biofouling in floating dock.

B, C, D 선박을 대상으로 대형부착생물의 피도를 평가하기 위하여 방형구로 촬영된 사진에 100개 이상의 구역을 분할하여 대형부착생물이 분포하는 피도를 분석하였으며, 방형구 사용이 불가능한 틈새구역의 경우 촬영된 영상 및 사진에서 구역면적 중 대형부착생물의 분포를 평가하여 산정하였다.

생물부착단계등급 평가는 Floerl et al.(2005)와 Davison et al.(2019)의 방법을 적용하였다(Table 1). 생물부착단계등급은 부착된 생물의 단계를 크게 생체막층(Slime layer)과 대형부착생물의 부착여부에 따라 구분하고 다시 대형부착생물의 부착범위를 세부적으로 소형패치(Small patch) 분포, 다수의(Considerable) 대형개체 부착, 대규모의(Extensive) 대형개체 부착 및 심각 수준의(Heavy) 대형개체 부착 총 6개의 단계로 구분하고 있다. 대형부착생물이 나타나는 생물부착단계등급 2부터는 대형부착생물의 피도를 1-5%, 6-15%, 16-40% 및 41-100%로 구분하여 최종 부착단계를 평가하였다.

Table 1. Level of Fouling ranking to assess the extent of fouling on survey target area

LoF rank	Estimate of macrofouling cover	Description
0	zero	No slime layer. No macrofouling. only clean surfaces.
1	zero	slime layer on some or all surfaces. No macrofouling.
2	1-5 % of visible surface	Macrofouling present in small patches or a few isolated individuals or small colonies.
3	6-15 % of visible surface	Considerable macrofouling on surfaces.
4	16-40 % of visible surface	Extensive macrofouling present but more than half of surfaces without biofouling.
5	41-100 % of visible surface	Very heavy macrofouling present covering substantial portions of visible surfaces.

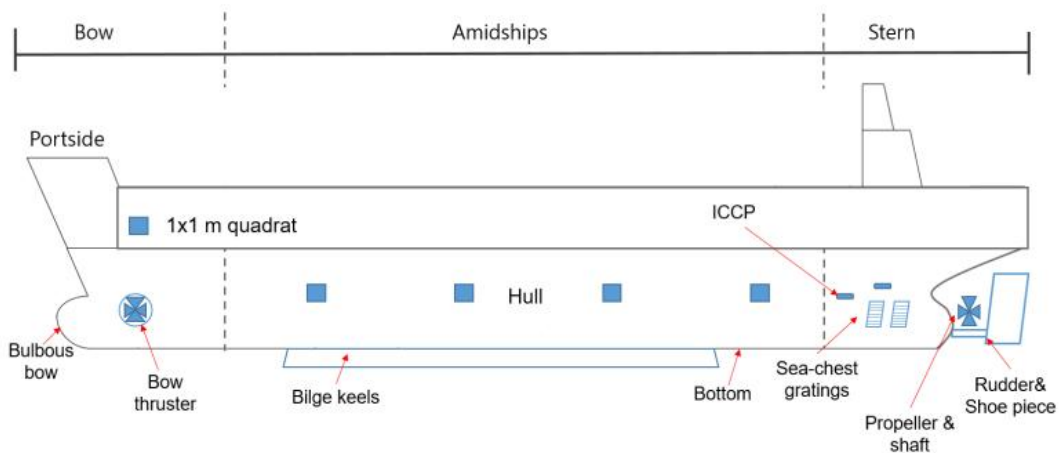


Fig. 2. Biofouling survey location of vessel hull and niche area.

3. 결과 및 고찰

3.1 선박정보 및 선체부착생물 관리현황

선박명은 A부터 E까지 6월부터 조사한 순서대로 표기하였고 조사일 외 상세정보는 Table 2에 나타내었다. A선박은 작은 보트를 탑재하고 있는 참치조업 어선이었으며, B, C, D 선박은 석유화학 운반선(Oil chemical tanker), E선박은 LNG 탱커였다. 선령은 1998년부터 2013년까지 다양하였고 선종에 따라 평균 운항속도는 6-16.6 노트로 조사되었다. 대부분의 선박이 배관 내 MGPS를 설치하여 생물부착을 방지하고 있었고, C선박만이 선속이 느려지면 선체표면에 부착된 생물을 다이버를 이용하여 수중에서 제거하는 것으로 조사되었다. 나머지 선박들은 운항 중 부착생물을 전혀 제거하지 않고 있으며, 중간(Intermediate survey) 혹은 정기검사(Renewal survey) 시 상가하여 육상에서 제거하는 것으로 나타났다. 발틱국제해사협회의회(BIMCO, Baltic International Maritime Council)에서 실시한 ‘Biofouling 관리지침 인식수준조사’에 따르면 선사는 IMO biofouling 관리지침의 이해 및 인식 수준이 높으며, 지침에 따라 자발적으로 선저면을 관리하고 있다고 보고하였다(IMO, 2019). 그러나 본 조사대상 선박은 C선박을 제외한 모든 선박이 운항 중 선체부착에 대한 검사(Inspection)나 수중제거작업을 전혀 수행하지 않는 것으로 조사되었다. 2021년 9월 28일 개최된 ‘산업계의 선체부착생물 관리현황 및 국제규제 대응 전략 논의’ 워크숍(한국선급 주재)에서도 국내 대형선사를 제외한 중소형 선사에서는 비용 및 운항일정 등의 이유로 운항 중 부착생물에 대한 관리를 하지 못하

고 있는 것으로 확인되어 대형선사와 중소형선사 간 선체부착생물관리에 대한 차이를 나타냈다.

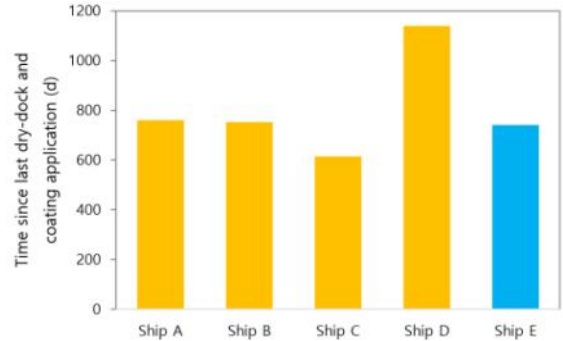


Fig. 3. Duration since last dry-dock and new coating application for biofouling. The color of each ships represents that anti-fouling coating only (yellow) and foul-release coating only (blue).

조사를 기준으로 각 선박의 신규도장일은 최소 615일에 서 최대 1139일이 경과한 것으로 조사되었고(Fig. 3), A~D선박은 방오도료로 선저면을 도장하였고 E선박은 Foul-release 도료를 사용한 것으로 나타났다. 방오도료는 대부분 구리 및 아연과 같은 중금속 성분을 포함하고 있으며 적용된 도료의 구성성분은 Table 2에 표기하였다.

IUCN 18 생물권역(Bioregions)을 기준으로 각 선박의 운항 경로를 조사한 결과 A선박은 참치조업을 위하여 주로 남태평양에서 운항하였고, B, D 선박은 대한민국 대산, 인천, 중

Table 2. Summary information of the vessels surveyed in this study

Vessel name	Survey date	Vessel type	Vessel size ^a (m)	Ship build	Average speed (kn)	Management of biofouling (No/hull clean)	Date of last AFS application (d)	Type of WSA ^b coating (active ingredients)	Voyage history (Operational routes) ^c
A	2021. 6.30	Fishing motor ship	79.56 ×14.5	2013	6	No	761	Anti-fouling (copper, zinc)	North and South Pacific, North West Pacific
B	2021. 8.15	Oil chemical tanker	127.21 ×20.4	2006	10.5	No	752	Anti-fouling (dicopper oxide, xylene, zinc)	North West Pacific
C	2021. 9.10	Oil chemical tanker	124 ×20	2006	10.5	Hull cleaning by diver	615	Anti-fouling (dicopper oxide, xylene)	North West Pacific, Arabian Seas
D	2021. 10.5	Oil chemical tanker	101 ×16	2008	11	No	1139	Anti-fouling (dicopper oxide, xylene)	North West Pacific
E	2021. 11.6	LNG tanker	280 ×43	1998	16.6	No	741	Foul-release (xylene, ethylbenzene)	Arabian Seas, Central Indian Ocean, North and South Pacific, North West

a Length×Beam, b Wetted Surface Area, c Based on IUCN bioregions presented in Kelleher et al.(1995).

국 창저우, 대만 카오슝 등 주로 북서태평양을 운항하는 비정기선으로 조사되었다. C 선박은 대한민국 대산, 태국 방콕, 아랍에미레이트 등 북서태평양과 아라비아해를 운항하는 비정기선이며, E선박은 평택과 오만 길합(Qalhat)을 운항하는 선박으로 조사되었다. 조사 대상 선박은 크게 남태평양, 북서태평양, 아라비아해를 운항하였고, 이중 북서태평양을 운항하는 B, C, D 선박에서 5 이상의 높은 생물부착단계 등급을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 조사대상 선박수가 적어 운항경로와 생물부착의 상관관계 파악이 어려웠으며, 추가적인 선박조사와 선박정박 위치, 시기 등 세부적인 정보수집이 필요한 것으로 사료된다.

3.2 선체 및 틈새구역의 생물부착단계등급 평가

3.2.1 선박별 부착생물 분포와 생물부착단계등급 평가

5척의 선박을 조사하는 동안 50개의 선체, 선저, 틈새구역을 기록 및 평가하여 생물부착단계등급을 산정하였다. 방형구를 이용한 선체부착생물의 피도는 B, C, D 선박을 대상으로 수행하였고 나머지 선박에서는 촬영된 사진 및 영상을 기반으로 평가하였다. 조사한 5척의 모든 선박에서 대형부착생물이 관찰되었고 선박에 따라 생물부착단계등급과 피도는 차이를 나타냈다(Table 3). E선박을 제외한 모든 선박의 선수는 얇은 생체막(Light slime)이 부착되어 있거나 생물이 부착되어 있지 않았다. 모든 선박의 선수에서 앵커에 의한 도장손상이 확인되었으며, 특히 B, C, E 선박 선수에서 도료의 훼손이 높은 것으로 나타났다. 선체의 생물부착단계등급은 선박에 따라 1에서 5까지 다양하게 조사되었고, 특히 B, C, D 선박에서 대형부착생물의 피도와 생물부착단계등급이 높게 나타났다(Fig. 6). 틈새구역에서도 대형개체가 관찰되었고 특히 모든 선박의 선수 스텔러스터에서 심각한 수준의 대형부착생물이 나타났다. A, C, D 선박의 해수 흡입구 격자에서도 심각한 수준의 대형부착생물이 관찰되었다.

A선박은 주로 남태평양 투발루 인근에서 참치를 어획하는 선박으로 선저에서 심각수준의 생체막(Heavy slime), 해조류 및 따개비 등 총 4종이 출현하였다. 선박의 선수에서는 생체막층과 해조류의 부착이 관찰되었고 선체중앙부(amidship)의 선체와 선저에서는 심각수준의 소형부착생물(microfouling)과 대형부착생물이 함께 관찰되었으며, 특히 선저부에서 조개삿갓(Goose barnacle)이 다양한 크기로 관찰되었다(Fig. 4). 선미(Stern)에서도 심각수준의 소형부착생물과 대형부착생물이 함께 관찰되었다. 선체와 선저의 생물부착단계등급은 3으로 평가되었고 틈새구역인 선수 스텔러스터, 해수 흡입구 격자 및 방향타의 생물부착단계등급은 각각 4, 5 및 3으로 해수 흡입구 격자의 생물부착단계등급이 가장 높게 나타났다. 본 선박은 소형 참치어획 시 이용하는 소형 보트가 본선에 탑

재되어 있었으며 보트 선저면에서 심각수준의 소형부착생물이 관찰되었다. 보트는 본선 선미부분에 탑재되어 비조업 시에는 선저부가 항상 수중에 잠겨있게 되며 이로 인한 생물부착이 발생하는 것으로 판단된다.

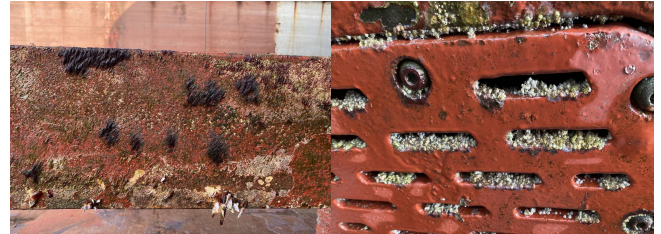


Fig. 4. Examples of biofouling cover on shoe piece and sea-chest grating on the ship A. Left: filamentous algae and goose barnacle growing on the stern. Right: Heavy macrofouling (small size barnacle) on sea-chest grating.



Fig. 5. Examples of biofouling cover on hull and bow thruster rim on the ship B, C, D and E. (a) Heavy macrofouling on bow thruster rim, (b) barnacle on the bottom, (c) macroalgae on the hull and (d) barnacle on the propeller.

B선박은 주로 대한민국 대산, 중국 창저우, 대만 카오슝, 베트남 등 남·동 중국해를 운항하는 비정기 선박으로 선체 및 틈새구역에서 생체막과 대형부착생물 등 총 3종이 출현하였다. 특히 빌지킬의 안쪽면과 선수 스텔러스터 입구(Gate), 터널(Tunnel) 및 프로펠러(Propeller)에서 심각 수준의 대형부착생물이 관찰되었으며 선체에서도 해조류와 대형부착생물인 따개비와 이매패류(Bivalve)가 관찰되었다(Fig. 5). B선박의 선저부에서는 생체막과 대형부착생물이 관찰되었고, 해

국내입항 국제운항선의 선체부착생물 관리에 대한 연구

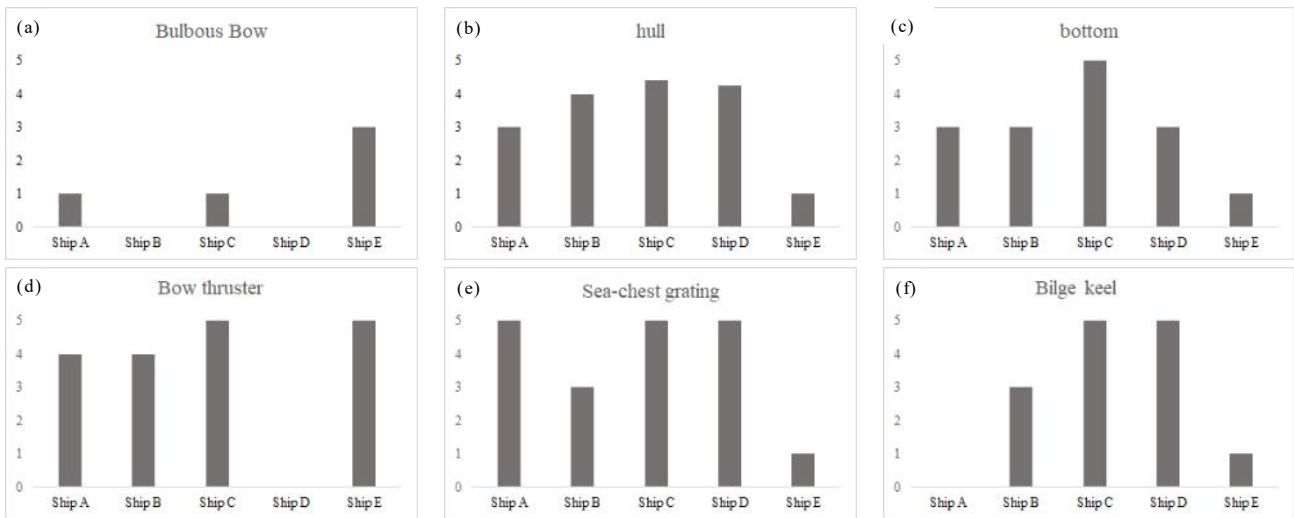


Fig. 6. Average of Level of Fouling recorded on ship surface. An absence ship indicates that (a): LoF rank was 0 on the bulbous bow (d), (f): bow thruster (ship D) and bilge keels (ship A) was not installed on the ship.

수 흡입구 격자에서는 소형패치의 따개비가 관찰되었다. 방향타는 페인트 손상이 관찰되었으나 생물부착은 나타나지 않았고, 구상선수(Bulbous bow)를 포함한 선수면은 생물이 부착되어 있지 않았다. 선체의 생물부착단계등급은 최소 1에서 5까지 방향구 설치 위치에 따라 다양하게 평가되었고, 선수 스텐더, 해수 흡입구 격자, 빌지킬 및 방향타의 생물부착단계등급은 각각 4, 3, 3 및 1로 평가되었다.

C선박은 대한민국 대산, 태국 방콕, 대만 카오슝 등의 동중국해와 아라비아해를 운항하는 선박으로 사상성 녹조류(Filamentous green algae)와 대형부착생물 등 총 4종이 관찰되었다. 선저부에서 약 4m 높이까지 선체 대부분이 녹조류(Green algae)로 뒤덮여 있었고 고랑따개비(Acorn barnacle)와 석회관 갯지렁이(Tubeworm) 개체도 관찰되었다(Fig. 5). 틈새구역에서도 대형부착생물의 관찰되었으며 특히 선미관의 부착율이 높게 나타났다. C선박은 조사대상 선박 중 신규도장 기간이 가장 짧았으나 가장 높은 생물부착단계등급을 나타냈다. 선수의 생물부착단계등급은 1로 소형부착생물이 관찰되었고 선체의 부착단계등급은 4에서 5의 범위로 관찰되었다. 특히 방향타를 제외한 틈새구역의 부착단계등급이 매우 높게 평가되었는데 선수 스텐더, 해수 흡입구 격자 및 빌지킬 모두 rank 5로 나타났다. 방향타는 부분적으로 녹조류와 대형부착생물이 관찰되었으나 다른 틈새구역 보다 낮은 rank 2로 평가되었다.

D선박은 대한민국 대산, 대만 카오슝 등 동중국해를 운항하는 비정기선으로 생체막, 해조류 및 대형부착생물 등 총 9종 관찰되었다. 선체에는 부분적으로 해조류와 석회관 갯지렁이, 따개비, 이때패류가 관찰되었다(Fig. 5). 특히 방향타

엣지(Rudder edge)와 선미관에서 심각한 수준의 대형부착생물이 나타났으며 선수 스텐더는 선박에 설치되어 있지 않았다. D선박은 약 150일 가량 장기간 운항하지 않고 정박한 것으로 조사되었으며 조사선박 중 체도장 시기가 가장 오래 경과된 선박이었다. 선체의 생물부착등급은 최소 4에서 5단계로 평가되었고, 해수 흡입구 격자, 빌지킬 및 방향타의 생물부착등급은 각각 5, 5 및 4로 높게 평가되었다.

Table 3. The list of species group (broader taxonomic group) on the ships and evaluating surface LoF scores of hull and niche areas

	Ship				
	A	B	C	D	E
Species group					
Slime	*	*	*	*	*
Macro algae	*	-	*	*	*
Barnacle	*	*	*	*	*
Bivalve	-	*	-	*	-
Tubeworm	-	-	*	*	-
LoF rank					
Bulbous bow	1	0	1	0	3
Hull ^a	3	1-5	4-5	4-5	1
Bottom	3	3	5	3	1
Bow thruster	4	4	5	-	5
Bilge keels	-	3	5	5	1
Sea-chest grating	5	3	5	5	1
Rudder	3	1	2	4	4

^a a minimum-maximum rank.

E선박은 대한민국 대산과 오만을 운항하는 LNG 탱커로 생체막, 해조류 및 대형부착생물 등 3종이 관찰되었다. 특히 적으로, 선체와 빌지킬에서 얇은 소형부착생물만 관찰되었고 대형부착생물은 관찰되지 않아 A-D선박의 모든 선체와 빌지킬에서 대형부착생물이 관찰된 것과 차이를 나타냈다. 구상선수, 선수 스텔러 및 방향타에서는 대형부착생물이 관찰되었으며 해수 흡입구 격자에서는 대형부착생물 부착이 없었다(Fig. 5). E선박은 A-D 선박 선저에 도장된 방오도료 타입이 아닌 foul-release 타입으로 신규도장 이후 2년이 경과 되었으나 선수와 선미부분을 제외한 선체 및 빌지킬에서는 대형부착생물이 전혀 관찰되지 않았다. E선박의 생물부착단계등급은 선체, 빌지킬, 해수 흡입구 격자에서 1, 방향타는 4로 평가되었다.

생물부착단계등급 평가를 위하여 B, C, D 선박의 선체과 틈새구역의 대형부착생물 피도를 조사한 결과 선체는 최소 0%부터 최대 99%(average 48.4%, S.D. 40.4%)까지 대형부착생물이 관찰되었고, 틈새구역은 최소 11%부터 최대 97%(average 49.6%, S.D. 37.1%)까지 관찰되었다. 생물부착단계등급이 증가할수록 대형부착생물의 피도도 함께 상승하는 경향을 나타냈으며 선체, 해수 흡입구 격자 및 선수 스텔러에서 높은 생물부착단계등급과 피도를 나타냈다(Fig. 7). 미국 Los Angeles와 Long Beach port에 입항하는 선박을 대상으로 선체부착생물현황을 조사한 연구에서는 생물부착단계등급과 피도가 63%가 일치하는 것으로 나타났다(Davison et al., 2014).

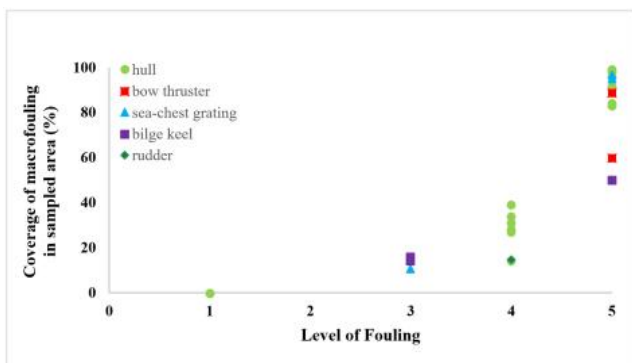


Fig. 7. Evaluations of LoF rank and coverage of macrofouling on the ship surface.

3.2.2 선령, 신규도장 경과시간과 생물부착단계등급 비교

5척의 선령은 최소 8년에서 최대 23년까지로 다양하였다. 선령이 가장 오래된 E선박의 생물부착단계등급이 가장 낮게 평가되어 선령의 증가가 생물부착에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 조사선박 중 E선박만이 실리콘타입 도료로 도

장하였고, 유일하게 선체, 선저 및 빌지킬에서 대형개체가 관찰되지 않았다. 신규도장 후 운항시기가 비슷한 A, B선박은 E선박에 비하여 생물부착단계등급이 매우 높게 평가되어 실리콘 소재의 foul-release 도료가 방오도료 보다 생물부착에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.

D선박을 제외한 대부분의 선박은 평균 2년이 경과하면 새로운 도료를 도장하는 것으로 조사되었는데 4척의 선박이 방오도료를 사용하고 있었다. 선박은 해양생물의 부착을 방지하기 위하여 트리부틸틴(Tributyltin), 구리 등의 독성유기화합물이 함유된 도료를 사용하여 왔다(Champ and Seligman, 1996). 2008년 IMO는 해양생물의 내분비계 교란을 야기하는 트리부틸틴 사용을 금지하였고(IMO, 2005), 2019년 사이부트린(Cybutryne) 사용을 추가적으로 금지하였으며 향후 구리를 포함한 독성유기화합물의 사용도 점차 제한 될 가능성이 매우 높다. 본 연구에서 독성물질을 포함하지 않는 실리콘 도료가 생물부착을 방지하는데 효과적인 것으로 나타났으나, 실리콘 도료는 재료 및 도장장비의 비용부담이 높아 현재까지는 선저면에 방오도료를 적용하는 선박의 비율이 높다.

신규도장 경과기간은 C선박이 615일로 가장 짧았으나 선체, 선저 및 틈새구역의 생물부착단계등급이 가장 높아 신규도장 경과기간 증가가 생물부착단계등급에 직접적인 영향을 미치는 요인은 아닌 것으로 조사되었다.

B, C, D 선박은 주로 동중국해를 운항하는 비정기선으로 모두 heavy 대형부착생물이 관찰되었고 신규도장 경과기간이 1139일로 가장 길었던 D선박에서 가장 큰 크기의 고랑따개비 개체가 출현하였다.

3.3 국내 선체부착생물 관리 대응방안

IMO에서는 지금까지 선박에 의한 외래종침입 대책으로 선박평형수 관리협약에 중점을 두었고 선체부착생물은 지침서형태의 권고사항이므로 실질적인 관리 및 대응방안이 마련되어 있지 않았다(Suk, 2018). 그러나 PPR7부터 지침서 개정을 통한 세부적인 관리방안이 논의되고 있으며 해양환경보호에 선도적 규제를 시행하는 뉴질랜드, 미국 및 발틱해 주변 유럽국은 선형 연구를 기반으로 개정작업을 주도하고 있다.

본 연구에서는 국내로 입항하는 국제운항선에서 심각한 수준의 대형부착생물이 관찰되었고, IMO의 선체부착생물관리 지침을 이행하고 있지 않아 선체부착생물로 인한 국내 연안 오염 잠재성을 시사하였다. 2010년~2020년까지 국내 주요 항에 입항한 선박은 인천항 177,663척, 부산항 597,552척, 광양항 261,818척, 울산항 263,242척(국가물류통합정보센터, www.nlic.go.kr)으로 해운산업이 활발한 국내무역항은 선박에 의한 외래종유입 잠재성이 매우 높다. 그러나 현재 우리나라

라는 선박평형수 관리에 대한 국내법만 시행하고 있고 선체부착생물에 관리에 대한 대응과 이에 대한 연구는 전무한 상황이다.

그러므로 국내 주요 무역항별 선체부착생물 유입현황 조사가 우선적으로 수행되어야 하며, 외래종의 유입, 정착 및 확산의 가능성에 대한 위해성평가(Risk Assessment)를 수행하여 위험성이 높은 외래종을 식별하고 이에 대한 대응절차 수립이 필요하다. 뉴질랜드는 2018년 이후 부착생물이 관리된 “Clean hull”의 상태의 선박이 입항하도록 규제하고 있다. 입항선박을 대상으로 부착현황을 조사하여 중별 위해성평가를 수행하였으며, 이를 바탕으로 21일 이상 정박하는 입항선박에 대하여 생체막과 거북목따개비(Gooseneck barnacle)의 부착은 허용하지만 그 외 고랑따개비와 대형동물(Bryozoans) 및 굴(Oyster)의 부착은 허용하지 않도록 규정하고 있다. 국가별로 입항하는 선박의 척수, 주요 운항경로 등이 상이하므로 외래종의 국내 유입현황 및 위험성 파악이 우선적으로 수행되어야 하며, 이를 근거로 입항선박에 대한 관리 및 규제 절차를 수립해야 할 것이다.

선체부착생물 현황파악과 함께 관리방법에 대한 대응도 필요하다. 일반적으로 상가된 선박은 고압세척기와 스크래퍼를 이용하여 부착된 생물을 제거하고 작업 중 방오도료의 독성물질과 제거된 생물이 세척수와 함께 제거되어 연안으로 배출된다. 수중에서 다이버나 수중청소로봇을 이용하여 제거하는 경우에도 제거된 생물과 도료성분이 용출되면서 수중 내 비산이 발생하여 2차오염을 야기한다. 그러므로 유해생물 및 독성물질의 배출로 인한 해양환경오염 방지를 위하여, 생물 제거 작업에 대한 관리방안이 마련되어야 한다. 뉴질랜드의 경우 제거작업 전문업체 및 제거설비에 대한 승인제도를 운영하여 관리하고 있다. 우리나라에서도 제거시설 및 장비에 대하여 작업 안전성과 환경 위해성을 고려한 제거시설 관리기준, 수중작업 시 제거물질의 포집율, 포집된 물질의 여과살균 성능 및 최종 배출수 기준 등에 대한 인증체계 구축이 필요할 것으로 사료된다.

3.4 생물부착단계등급 평가 적용 및 선체부착생물 검사 (inspection) 방법 개선방안

IMO의 선체부착생물관리 지침서에는 선박 운항 시 부착된 생물에 대한 적절한 관리를 위하여 관리계획을 수립하고 그 내용을 기록하도록 하고 있다. 선박의 생물부착관리를 위해서는 부착현황을 확인하는 선체검사가 요구되며 검사 방법은 뉴질랜드의 생물부착단계등급 평가방법을 기반으로 세부 평가단계가 지침개정작업에서 논의되고 있다. 생물부착단계등급 평가결과에 따라 선박의 입출항 규제가 발생할 수 있으므로 표준화된 검사방법이 필요하다.

본 연구에서는 선체 및 선저에 부착된 생물이 균일하게 분포하지 않아 방형구 설치 위치에 따라 동일한 선체에서도 다른 생물부착단계등급이 평가되었다. 또한 뉴질랜드 정부는 방형구 내 부착생물의 피도를 1%부터 75%까지 구분하여 그림으로 제시하였으나 선박마다 부착된 생물의 종과 개체의 크기 및 부착형태가 상이하어 본 연구에 적용하는 것이 불가능하였다. 선박운항 중 수중에서 선체검사를 수행할 경우 우리나라 해안의 높은 탁도와 빠른 조류 등의 영향을 받을 수 있으므로 다양한 환경조건에서도 대표성을 확보할 수 있는 검사방법의 표준화가 필요할 것으로 사료 된다.

방형구를 이용한 생물부착 피도 평가는 대체로 평면인 선체와 선저에서는 가능하지만 다양한 형상의 틈새구역에 적용하는데 한계점을 나타냈다. 특히 주로 심각 수준의 대형부착생물이 발생하는 선수 스티스터, 빌지킬, 해수흡입 격자는 입체적인 구조로 방형구 이용이 어려우며, 각 구역의 형상에 적합한 평가방법 개발이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 입항하는 국제운항선박을 대상으로 해양생물 부착 및 관리현황을 조사하였다. 총 5척 선박의 선체, 선저, 선수 스티스터, 해수 흡입구 격자, 빌지킬 및 방향타의 출현종 및 피도를 분석하여 생물부착단계등급을 평가하였다. 선박 및 구역에 따라 다양한 생물부착단계등급이 산정되었으나 모든 선박에서 생물부착단계등급 5 이상의 대형부착생물이 관찰되었고 특히 틈새구역의 선수 스티스터, 해수 흡입구 격자 및 빌지킬에서 대형개체의 부착이 심각한 수준으로 나타났다. 조사된 대부분의 선박이 운항 중 선체부착생물을 검사, 제거 등 자발적인 관리를 하고 있지 않은 것으로 파악되었다. 국내에 입항하는 선박의 관리 및 운항 정보와 해양생물부착의 상관관계를 파악하기 위하여 추가적인 선박조사가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 해양수산부 [선체부착생물 처리(제거·수거·처리) 기술개발] 의하여 연구되었음.

References

- [1] Carlton, J. T. and J. B. Geller(1993), Ecological Roulette: The global Transport of Nonindigenous Marine Organisms, Science, Vol. 261, pp. 78-82.

- [2] Champ, M. A.(2000), A Review of Organotin Regulatory Strategies, Pending Actions, Related Costs and Benefits, *Science*, Vol. 258(1-2), pp. 21-71.
- [3] Champ, M. A. and P. F. Seligman(1996), Organotin. Environmental fate and effects. Vol. 29, p. 623. London: Chapman and Hall.
- [4] Cohen, A. and J. T. Carlton(1998), Accelerating Invasion Rate in a Highly Invaded Estuary, *Science*, Vol. 279, pp. 555-558.
- [5] Davison, I., C. Scianni, L. Ceballos, C. Zabin, G. Ashton, and G. Ruiz(2014), Evaluating Ship Biofouling and Emerging Management Tools for Reducing Biofouling-mediated Species Incursions. Report to the Marine Invasive Species Program of the California State Lands Commission, Sacramento, California. p. 36.
- [6] Davison, I., O. Floerl, L. Fletcher, and P. Cahill(2019), Level of Fouling rank scale - an updated guideline, Prepared for Auckland Council, Auckland, New Zealand. p. 14.
- [7] Floerl, O., G. J. Inglis, and B. J. Hayden(2005), A Risk-Based Predictive Tool to Prevent Accidental Introductions of Nonindigenous Marine species, *Environmental Management*, Vol. 35, No. 6, pp. 765-778.
- [8] Hewitt, C. L., M. L. Campbell, R. E. Thresher, R. B. Martin, S. Boyd, B. F. Cohen, D. R. Currie, M. F. Gomon, M. J. Keough, J. A. Lewis, M. M. Lockett, N. Mays, M. A. McArthur, T. D. O'Hara, G. C. B. Poore, D. J. Ross, M. J. Storey, J. E. Watson, and R. S. Wilson(2004), Introduced and cryptogenic species in Port Phillip, *Marine Biology*, Vol. 144, pp. 183-202.
- [9] IMO(2005), International Convention on the Control of Harmful Antifouling Systems (AFS) on Ship, 2005 Edition, IMO, London, p. 69.
- [10] IMO(2011), Guidelines for the Control and Management of Ship's Biofouling to Minimize the Transfer of Invasive Aquatic Species. Marine Environment Protection Committee, Annex 26, Resolution MECP.207(62), London, UK.
- [11] IMO(2019), Review of the 2011 Guidelines for the Control and Management of Ship's Biofouling to Minimize the Transfer of Invasive Aquatic Species. Biofouling Management Survey Submitted by BIMCO, 5 November 2019, PPR7/7/1.
- [12] Jackson, L., UNEP's Regional Seas Programme, Global Invasive Species Programme(2008), Marine Biofouling and Invasive Species: Guidelines for Prevention and Management.
- [13] Kelleher, G., C. Bleakley, and S. Wells(1995), A Global Representative System of Marine Protected Areas. Great Barrier Reef Marine Park Authority, The World Bank, and IUCN, Washington D.C., Vol. 4, p. 5.
- [14] Mack, R. N., D. Simberloff, W. M. Lonsdale, H. Evans, M. Clout, and F. A. Bazzaz(2000), Biotic Invasions: Causes, Epidemiology, Global Consequences, and Control, *Ecological Applications*, Vol. 10, pp. 689-710.
- [15] Ruiz, G. M., P. W. Fofonoff, J. T. Carlton, M. J. Wonham, and A. H. Hines(2000), Invasion of Coastal Marine Communities in North America: Apparent Patterns, Processes, and Biases, *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 31, pp. 481-531.
- [16] Suk, J. H.(2018), A study on the Regulatory Framework Related to Ship's Biofouling, *The Korea Institute of Maritime Law*, Vol. 30, No. 1, pp. 139-174.
- [17] Sylvester, F., O. Kalaci, B. Leung, A. Lacoursiere-Roussel, C. C. Murray, F. M. Choi, M. A. Bravo, T. W. Therriault, and H. J. MacIsaac(2011), Hull Fouling as an Invasion Vector: Can Dimple Models Explain a Complex Problem?, *Journal of Applied Ecology*, Vol. 48, pp. 415-423.

Received : 2021. 12. 09.

Revised : 2021. 12. 30.

Accepted : 2022. 02. 25.