

## 생물부착과 그 방지에 대한 연구동향

김 룡 길

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서는 나라의 경제발전과 인민생활향상에서 전망적으로 풀어야 할 문제들과 현실에서 제기되는 과학기술적문제들을 풀고 첨단을 돌파하여 지식경제건설의 지름길을 열어놓아야 합니다.》

생물부착과 그 방지에 대한 연구는 선박공업과 조수력발전소, 수리구조물 그리고 기타 수중시설물과 구조물 등의 건설과 설치에서 매우 중요한 의의를 가진다.

론문에서는 생물부착의 유형과 그 방지에 대한 연구동향에 대하여 논의하였다.

### 1. 생물부착의 유형

생물부착(biofouling) 또는 생물학적부착(biological fouling)은 미생물, 식물, 조류 그리고 동물 등이 물속에 있는 물체의 표면에 축적되는것을 말한다. 이러한 생물의 축적은 물속의 물체표면에서 생물유기체가 무리를 형성하면서 이루어지는데 기생과는 관련이 없다.[7, 9]

부착생물의 종류는 대략 1 700여종이상이다.[12] 생물부착은 미세생물부착과 거대생물부착으로 구분한다. 여기서 미세생물부착은 생물막형태의 세균부착을 말하며 거대생물부착은 커다란 유기체(실제로 딱개비류와 해조류)들의 련결부착을 말한다.

부착특성과 이주특성을 고려하여 생물체들을 굳은형부착생물과 연한형부착생물로 구분하기도 한다. 굳은형(탄산칼시움형)부착생물에는 딱개비류, 일부 이끼벌레류, 연체동물류, 다모환충류 그리고 관벌레류와 섭조개류 등이 포함된다. 연한형부착생물(비탄산칼시움형부착생물)로는 해조류,

조류 등을 들수 있다. 부착공동체를 형성하는 생물들도 있다.[7, 9] 딱개비류는 중요한 굳은형부착생물로서 세계적으로 널리 퍼져있고 많은 연구[26-28]가 진행되었다. 딱개비류의 한종인 흰줄무늬딱개비(*Balanus amphitrite*)의 간단한 생태적특성을 보면 이 종은 광염성, 광온성생물로서 생육에 유리한 물온도는 12~30℃이고 최적물온도는 25℃이며 사는 데 적합한 염도는 15~35‰이고 적당한 최대물흐름속도는 2~4m/s이다. 딱개비류의 생활사는 그림 1과 같다.

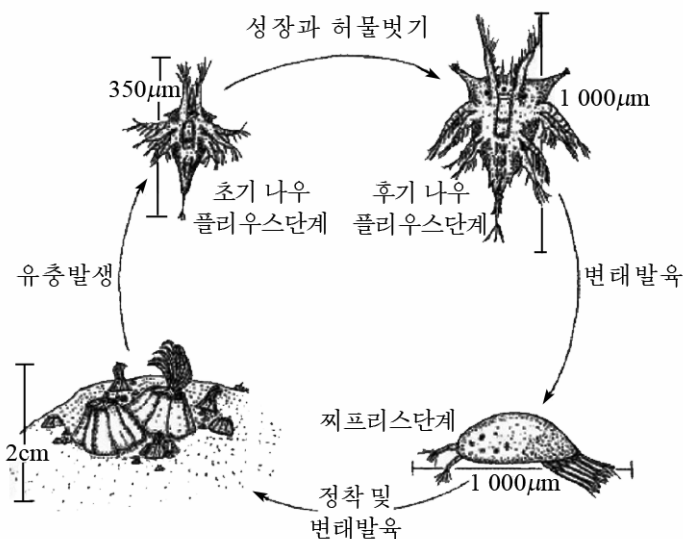


그림 1. 딱개비류의 생활사

딱개비의 성체에서 유생이 방출되어나온 다음 떠돌이유생인 초기나우플리우스단계(이 단계는 싸그쟁이류, 물벼룩류 등의 유생단계에서 나타남.)를 거쳐 허물벗기하면서 성장하여 후기나우플리우스단계로 된다. 다음 변태발육하여 바닥에 붙는 단계인 찌프리스단계(이 단계는 딱개비유생에서만 나타남.)로 되고 다시 변태발육하여 완전히 정착하여 생활하는 성체딱개비로 된다.[9, 10, 27, 28]

## 2. 생물부착의 단계

바다생물의 부착은 일반적으로 4단계로 특징지어진다. 첫 단계(몇 min 정도)에서는 반 데르 발스호상작용에 의하여 물속의 물체표면에 막이 덮인다. 두번째 단계(24h 정도)에서는 그 층위에 규조류와 세균들(실제로 *Vibrio* 군, 알긴용해균, *Pseudomonas* 부패균 등)이 부착하여 생물피복이 형성되기 시작한다. 세번째 단계(1~7일)에서는 생물피복에 의하여 영양물이 많아지고 안정하게 부착할수 있는 조건이 이루어진 조건에서 여기에 거대조류의 종자와 원생동물(실제로 종벌레류) 그리고 편형동물류가 부착한다. 네번째 단계(2~3주)에서는 피낭동물류, 연체동물류, 고착형자포동물류 그리고 갑각류 등이 부착한다.[13]

한 연구자는 생물부착의 유형과 단계 그리고 정착하는 기간에 따라 생물의 부착단계를 그림 2와 같이 도식화하였다.[9]

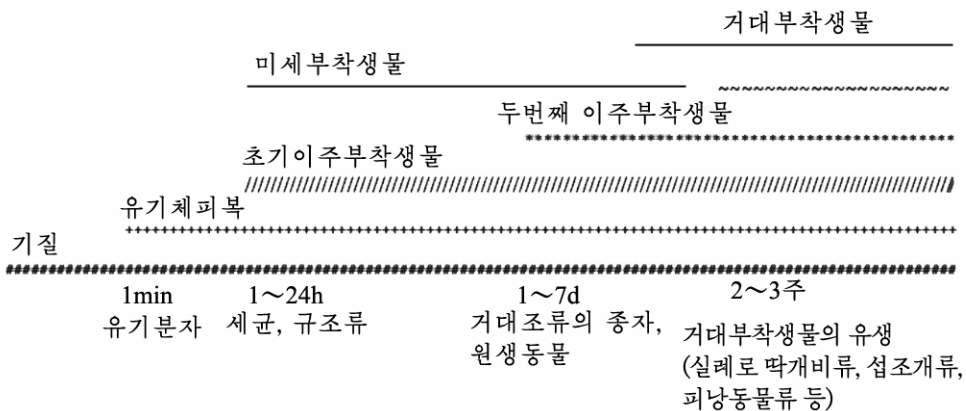


그림 2. 생물의 부착단계와 그 시기에 대한 도식

## 3. 생물부착의 영향

세계적으로 바다생물의 부착을 방지하는데 해마다 막대한 자금이 지출되고있다. 생물부착은 도처에서 발생하는데 경제적으로 볼 때 선박공업에서 가장 피해가 심하다. 선박에 생물이 부착하면 운행저항이 상당한 정도로 증가되어 선박의 종합적인 수력학적효율이 낮아진다.[12-14]

생물부착은 또한 물이 기본으로 되는 거의 모든 액체환경에서 나타난다. 생물부착은 바다가양어와 양식에 지속적으로 영향을 미치며 막계통, 펌프수순환체계와 발전설비에 영향을 미친다. 또한 제지업과 팔프공업의 설비, 수중구조물, 화재방지계통의 물관 그리고 분무계통의 노즐에도 영향을 미친다. 그리고 땅속샘물줄기에 생물이 부착하면 물흐름이 잘 이루어지지 않는다.[10] 실제로 생물부착에 의하여 25년동안에 조수력발전계통에서 총적인 효율이 10%이상 감소되었으며 정박바줄의 작업수명은 대략 20% 감소되었다.[8]

력사적으로 볼 때 생물부착의 영향에 대하여 주목을 돌리게 된것은 생물부착에 의하여 배의 속도가 상당히 떨어지기때문이었다. 특히 배의 외피구조물과 추진계통이 피해를 받았다.[11]

생물부착을 방지하는데 드는 비용은 바다수송비용의 절반이상을 차지한다. 생물부착은 바다양어와 양식에도 영향을 준다.[14] 생물부착에 의하여 조개주위에서 물흐름이 저해되고 먹이와 산소의 흡수가 방해되며 조가비판의 여닫기가 어려워진다.[15] 결과 조개류의 성장, 생존률이 떨어져 생산성이 낮아진다.[16]

#### 4. 생물부착의 방지(방오)

생물의 부착방지는 기질에 부착생물이 축적되는것을 막는 과정이다. 생물부착을 방지하기 위한 여러가지 재료들과 방법들이 개발이용되고있다.[1, 2, 6, 7, 29, 30]

##### 1) 생물부착방지를 위한 재료

생물부착을 방지하는 재료에는 살생물질, 양극성이온재료와 칠감, 미끄러짐재료와 칠감 그리고 상어와 고래의 피부를 모방한 나노비늘표면의 재료와 칠감과 같은 여러가지 칠감들과 조개부착단백질 등이 포함된다.[7]

##### ① 살생물질(biocide)

생물들을 죽이는 방식으로 생물부착을 막는 화학물질이다. 초기생물피막을 형성하는 미생물들 특히 세균을 목표로 하여 작용하는 10여종의 살생물질들이 알려졌다.[13] 다른 살생물질은 비교적 큰 유기체들인 진균류와 조류와 같은 생물들의 부착을 저해한다. 일반적으로 많이 리용되는 살생물질 또는 생물부착방지제로 트리부틸틴(tributyltin: TBT)을 들수 있다. 이 물질은 미생물들과 거대물살이생물들에서 독성을 나타낸다. TBT와 석을 기본으로 하는 부착방지칠감은 환경에 나쁜 영향을 주는데 특히 굴류와 연체동물을 해한다. 실험으로 20ng/L의 TBT농도에서 참굴(*Crassostrea gigas*)의 성장이 억제되고 1ng/L의 농도에서 주름강달소라의 한종인 *Nucella lapillus*의 암컷생식선발육이 변화된다. 동화합물도 칠감으로 리용되는데 동아연합금(아연 40%, 동 60%를 합금한 놋쇠의 한가지)을 실험으로 들수 있다.[18]

세계적으로 생물부착을 억제하면서도 환경에 안전한 부착방지에 대한 연구가 널리 진행되고있다.[13]

##### ② 무독성칠감(non-toxic coating)

살생물질이 들어있지 않으면서 미생물의 부착을 막는 칠감을 말한다. 이 칠감은 항균활성과 같은 보조적인 기능이 첨부된 유기중합물로 되어있다.[19]

무독성부착방지칠감에는 크게 두가지 부류가 있다. 첫번째 부류는 마찰과 표면에너지를 작게 하는 소수성칠감인데 가장 많고 널리 리용된다. 이런 부류의 칠감은 미생물들의 부착을 방해하는 매끈한 표면을 가진다. 실험으로 불소수지와 규소칠감을 들수 있다.[19] 이러한 칠감들은 생태학적으로 불활성이지만 력학적특성과 안정성기간과 같은 문제점들을 가지고있다. 특수한 생물피복(점액)은 미생물들을 부착시키지만 화학적활성을 억제한다.[13] 현재 널리 리용되는 무독성부착방지칠감으로 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane: PDMS)을 들수 있다.[20]

무독성부착방지칠감의 두번째 부류는 친수성칠감이다. 그러한 칠감으로는 글리신베타인(glycine betaine)과 술포베타인(sulfobetaine)을 들수 있는데 이것들은 수화능이 큰 양극성이온을 가진다. 이러한 칠감들은 환경적으로 안전한 생물모방형칠감들이다.[21]

### ③ 조개부착단백질(mussel adhesive protein)

조개부착단백질은 물체의 표면에서 중합체사슬을 증대시키는 물질이다. 실례로 폴리에틸렌글리콜(polyethylene glycol: PEG)을 들수 있다.[22] PEG사슬들은 물환경에서 특수하게 성장할수 있는 기능화된 표면을 형성한다.

보라섬조개(*Mytilus edulis*)는 바다물속의 고체표면에 조개부착단백질(mussel adhesive proteins: MAP)을 리용하여 부착한다. MAP는 알라닌-리진-프롤린-세린-티로신-트란스-2,3-디히드록시프롤린(DHP)-히드록시프롤린-트레오닌-3,4-디히드록시페닐알라닌(DOPA)-리진이 반복된 구조로 되어있다.[23] 이것을 리용한 생물부착방지중합체는 일정한 금속표면에서 흡착작용을 할수 있다.[22]

PEG의 부착방지특성은 잘 증명되었으나 바다물속의 금속이온에 의해 칠감이 변화되고 물작용분해되면서 농도가 낮아지는것과 관련하여 수명이 짧다. 즉 그 수명은 180일정도이다.[22, 24]

## 2) 생물부착방지방법

우선 여러가지 물리, 화학적에너지를 리용하여 생물부착을 막는 방법이 있다. 임폴스레이자복사는 보통 부착조류에 리용된다. 그리고 임폴스전기자극은 보라섬조개에 대한 효과적인 부착방지방법이다. 물속에서 높은 전압을 수 $\mu$ s정도 걸어주면 유기체들의 활동이 정지되거나 죽게 된다. 또한 초음파를 리용하여 조류와 다른 미생물들을 죽이거나 변성시키는 방법도 제기되었다. 고에너지의 임폴스음파를 도관우에 짧게 주면 거대조류에서 매우 강한 효과가 나타난다.[25]

다음으로 고온물처리방법과 더운물처리방법이 있다. 실례로 121℃의 물을 15~20min 동안 처리하는 방법과 40℃의 물을 30min동안 처리하는 방법으로 랭각계통에서 조개류를 효과적으로 제거하였다.[25, 27]

생물부착방지방법에는 또한 염소처리방법이 있다.[6] 이밖에 화학세척과 로출 등 여러가지 방법이 있다.[7]

2016년에 심층수중UVC복사기를 리용하여 비접촉, 비화학적방법으로 생물부착을 방지하기 위한 연구가 진행되었다. UVC복사는 미생물들의 DNA를 파괴하는 방식으로 생물피막을 형성하는 생물들이 부착되지 못하게 한다. 피막형성생물들이 부착되지 못함으로써 보다 큰 생물체들이 부착되지 못하였다.[17]

우리 나라에서도 생물부착을 방지하기 위한 연구가 진행되고있다.

웅진만 간석지에서 양식구조물(태장, 닻줄 기타)에 부착되는 생물들을 조사한데 의하면 보라섬조개가 주요생물부착종이었다.[5] 이 수역에서 보라섬조개의 봄씨받이적기는 물온도가 12~14℃인 4월 하순부터 5월 상순까지이며 가을씨받이적기는 물온도가 19~15℃로 내려가는 10월 초순부터 11월 초순까지이다.

섬조개류는 주로 바위나 바닥기질에 잘 붙는데 알에서 까난 유생은 떠돌이생활을 하다가 점차 변태발육하여 가라앉으면서 기질에 붙는다.[3](표) 서해안에서 살고있는 조개류도 이와 유사하지만 알출이시기가 차이난다.[4]

화력발전소랭각수도관에 부착된 민물섬조개를 없애기 위한 연구에서는 더운물과 공기뿔물을 리용하여 랭각수도관에 번식한 민물섬조개를 죽임으로써 도관내경이 좁아지는데 따르는 저항을 줄였다.[1] 화력발전소의 공기뿔물(35~40℃, 산소함량 1~2mg/L), 더운물(34~40℃, 산소함량 2~3mg/L), 퇴수(30~40℃, 산소함량 4~5mg/L)를 도관에 채워넣고 물흐름을 정지시킨 결과 4h만에 공기뿔물과 더운물에서 민물섬조개의 100%가 죽고 퇴수에서는 갖

난 섭조개들이 죽었다.

표. 주요조개류의 알쓸이시기와 유생의 발육단계별크기

종류*	알쓸이시기 /월	물온도 /°C	유생발육단계별크기/ $\mu\text{m}$		
			D형유생	각정기유생	부착기유생
보라섭조개	4~5, 10~11	8~19	100~160	181~280	241~280
대합	7~10	18~21	90~120	140~160	180~200
바스레기	7~8	22~25	157~167	190~200	200~230
함박조개	7~10	22~25	70~100	120~150	180~200
참굴	6~9	20~22	80~90	151~220	271이상

\* 조개류는 동해안에서 살고있는것들임.

오만디는 섭조개붙임줄에 부착하므로 새끼섭조개양식에 불리한 조건을 형성한다. 대기로출방법으로 오만디를 간단히 제거할수 있는데 빛조건이 좋을 때는 2일, 습도가 높을 때에는 3일동안 섭조개붙임줄을 대기중에 로출시켰다.[2] 태장줄과 닻줄에 붙어있는 자루우렁성이는 석회수자극과 대기로출의 방법으로 제거하였다. 자루우렁성이는 10% 석회수에서 30min동안 처리하면 5일후에 전부 죽었으며 30%에서 10min동안 처리하면 5일후에 전부 죽었다.[2]

이처럼 생물부착의 방지방법은 대상과 조건, 환경에 따라 각이하고 다양하므로 그에 따르는 연구를 심화시켜야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 박일종 등; 기술혁신, 4, 19, 1994.
- [2] 김룡만; 조선수산, 2, 12, 1994.
- [3] 변승인 등; 조선수산, 11, 2, 1993.
- [4] 계기홍; 조선수산, 2, 23, 1992.
- [5] 리범숙; 조선수산, 5, 24, 1995.
- [6] A. S. Kommeren; Structured Antifouling Coatings for The Marine Environment, Eindhoven University of Technology, 132~156, 2019.
- [7] C. M. Kirschner et al.; Biofouling, 22, 12, 1, 2018.
- [8] S. Yang et al.; Applied Ocean Research, 65, 166, 2017.
- [9] H. Claire et al.; Advances in Marine Antifouling Coating and Technologies, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC., 103~130, 2009.
- [10] T. Vladkova; Marine and Industrial Biofouling, 4, 1, 135, 2009.
- [11] L. D. Chambers et al.; Surface and Coatings Technology, 6, 4, 3642, 2006.
- [12] E. Almeida et al.; Progress in Organic Coatings, 59, 1, 2, 2007.
- [13] D. M. Yebra et al.; Progress in Organic Coatings, 50, 2, 75, 2004.
- [14] I. Fitridge et al.; Biofouling, 28, 7, 649, 2012.
- [15] J. H. Pit et al.; Aquaculture International, 11, 6, 545, 2003.
- [16] M. Sievers et al.; Biofouling, 29, 1, 97, 2012.
- [17] H. Venugopalan; Laser Focus World, 52, 7, 28, 2016.
- [18] S. M. Evans et al.; Marine Pollution Bulletin, 30, 1, 14, 1995.

- [19] R. F. Brady; Journal of Coatings Technology, 7, 2, 44, 2000.
- [20] S. Krishnan; Journal of Materials Chemistry, 12, 29, 3405, 2008.
- [21] S. Jiang et al.; Advanced Materials, 22, 9, 920, 2010.
- [22] J. Dalsin et al.; Materials Today, 8, 9, 38, 2005.
- [23] S. Taylor et al.; J. Am. Chem. Soc., 116, 23, 10803, 1994.
- [24] A. Statz et al.; J. Am. Chem. Soc., 127, 22, 7972, 2005.
- [25] T. J. Lee et al.; Environ. Technol., 22, 4, 383, 2001.
- [26] Francis Kerckhof et al.; Bioinvasions Records, 7, 1, 21, 2018.
- [27] Melissa A. Frey et al.; Management of Biological Invasions, 5, 1, 21, 2014.
- [28] Murtada D. Naser et al.; Bioinvasions Records, 4, 3, 205, 2015.
- [29] R. Rajamohem et al.; Indian Journal of Geomarine Sciences, 45, 12, 1638, 2016.
- [30] V. V. Lakshmi et al.; International Journal of Scientific & Engineering Research, 6, 2, 2015.

주제 109(2020)년 7월 5일 원고접수

## **Trend of Study on Biofouling and Antifouling**

*Kim Ryong Gil*

Biofouling is divided into microfouling(biofilm formation and bacterial adhesion) and macrofouling(attachment of larger organisms). Biofouling has negative impacts on shipping industries, cooling water cycles system, underwater instrument and aquaculture. The biocide and biomimetic antifouling coating, no-toxic coatings, mussel adhesive proteins and energy methods are commonly used for antifouling.

Keywords: biofouling, antifouling, fouling