

실해역 환경에서 생물부착에 관한 기초실험 연구

정동호* · 김아리* · 문덕수* · 이승원* · 김현주* · 함윤호*

*한국해양연구원/해양시스템안전연구소

Preliminary Experimental Study on Biofouling in Real Sea Environment

Dong-Ho Jung*, Ah-Ree Kim*, Deok-Soo Moon*, Seung-Won Lee*, Hyeon-Ju Kim* and Yun-Ho Ham*

*Ocean Engineering Research Department, MOERI/KORDI, Goseong, Gangwon, Korea

KEY WORDS: Biofouling 생물부착, Real sea environment 실해역 환경, Deep and surface seawater 해양심층수와 표층수, Chlorophyll-a 클로로필-a

ABSTRACT: A flow and low temperature of deep seawater the biofouling properties in a seawater environment of different materials, such as a steel pipe, polyethylene pipe, and nylon net, used for ocean industries. Experiments in a real sea environment were performed to grasp the quantitative and qualitative biofouling from diatoms attached to materials by measuring the Chlorophyll-a density. Experimental samples were placed under five types of ocean environmental conditions and analyzed every month for five months. It is shown that the biofouling by diatoms was strongly affected by the seawater temperature for all of the experimental samples. It was found that diatoms mainly adhered to the nylon net, while crustaceans prefer polyethylene, under a high temperature condition. It is believed that the biofouling properties are strongly related to the surface roughness of a material. The biofouling under the low temperature condition of deep seawater was rare and stable for the experimental periods. The inside of a pipe conveying deep seawater can be presumed to remain clear without biofouling on the condition of a flow and low temperature of deep seawater.

1. 서 론

생물부착(유기물에 의한 부착)은 미생물, 박테리아, 그리고 해양생물 등에 의해 발생하는데, 해양공학적 관점에서 생물부착이란 해양생물 등이 구조체에 서식하는 현상을 의미한다. 미생물 혹은 해양생물 등이 해양구조물에 부착하면 구조물의 중량을 증가시켜 유효부력을 감소시키며, 구조물의 유효체적과 단면적을 증가시켜 유체력이 증가되는 현상이 발생한다. 유체력 증가는 구조물의 설계강도 초과로 인한 파괴 문제를 야기시킬 수 있으므로, 해양구조물에 발생하는 생물부착은 설계 과정에서 중요한 요소가 될 수 있다.

해양구조물 부재 내측 표면에 발생하는 생물부착도 중요한 설계인자가 될 수 있는데, 유체를 이송하는 파이프라인 내부에 발생하는 생물부착이 그 예가 될 수 있다. 내부에 발생하는 생물부착은 유체의 내부 유동 저항으로 작용하여 파이프라인의 기능을 저하시킨다. 파이프라인 내부에 생물이 부착할 수 있는 경우는 해양심층수 취수관, 온도차 발전 및 냉난방용 취수관 등이 있다. 온도차발전을 위해서는 대량의 해수를 취수해야 하는데, 취수용 파이프라인 내부와 열교환기 등에 발생하는 생물부착으로 인하여 발전효율이 감소되고 시설이 중단될 수도 있다. 특히 해양심층수를 취수하는 경우에는 해양심층수에 포함된 고영양염 성분

이 해조류 혹은 미세조류 성장을 촉진시킬 수 있기 때문에 생물부착 속도를 증진시킬 수도 있다. 따라서 해양환경에서 해양생물의 부착에 관한 정량적 및 정성적 평가가 필요하다.

해양구조물에 관한 생물부착이 중요한 설계 인자임에도 불구하고 이에 관한 연구는 크게 부족한 현실이다. 생물부착은 주로 발전소 인입구 혹은 해수냉난방 및 온도차 발전용 취수구 구조물에 관한 실험적 연구가 주를 이루고 있다. 이순길(1987)은 발전소 냉각계통 시스템이 동물저서생물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 발전소 냉각시스템에서 생물부착 실험을 수행하였다. 취수구, 배수구, 온배수 배출구역에 부착판을 설치하여 1년간 샘플 분석을 수행한 결과 해조류는 수온에 따라서 부착정도가 결정되었으며, 저서동물의 경우는 가을에 가장 많은 군집에 출현하였다. 반면에 Ciborowsky and Clifford(1984)에서는 여름철에 출현종수의 증가가 크게 나타나는 것으로 나타났다.

위중환 등(2002)은 해양 구조의 부착과 성장을 분석하기 위하여 실내수조에서 파관을 이용하여 실험적 연구를 수행하였다. 그들은 20일 동안 구조의 부착과 성장을 관찰하면서 실험개시 10일까지는 천이과정이며, 20일이 경과하면서 안정적인 성장단계로 들어선다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 해양환경에서 생물부착의 특성을 파악하기 위하여 생물부착에 관한 실험적 실험을 수행한다. 대표적인 해양

교신저자 정동호: 강원도 고성군 죽왕면 오호리 245-7, 033-630-5010, dhjung@moeri.re.kr

본 연구는 2009년 창원에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

구조물 재질인 폴리에틸렌 파이프(Polyethylene pipe), 강재 파이프(Steel pipe) 그리고 나이론 그물(Nylon net)을 대상으로 실험을 수행하며, 생물성장의 중요한 환경인자인 수온에 따른 생물부착 특성을 살펴본다. 5개월간 심층수와 표층수 환경에서 실험 샘플을 설치하면서 1개월씩 변화를 관찰하여 재질 및 수온에 따른 생물부착 특성을 분석한다.

2. 실험 개요 및 분석 방법

2.1 클로로필-a 측정에 의한 생물부착 측정

식물플랑크톤은 수계에 존재하는 기초생산자로서, 다양한 생리활성물질을 함유하고 있을 뿐만 아니라 CO₂를 고정하는 등 해양생태계에서 주요한 역할을 수행하고 있다. 그러나 식물플랑크톤의 일종인 부착규조류 및 해조류는 해양구조물에 부착된다면 전술한 바와 같이 외력증가 및 부식속도 증가 등과 같이 역효과를 일으킨다.

해양구조물에 부착되는 생물의 정성적/정량적 측정방법은 부착생물의 종류에 따라 다른데, 가장 지배적인 부착생물인 해조류의 생물부착을 측정하기 위해서는 클로로필-a를 측정하는 방법이 있다. 클로로필-a는 모든 식물플랑크톤에 포함되어 있으므로 그 양을 측정함으로써 식물플랑크톤의 생체량을 가장 잘 평가할 수 있다(국토해양부 고시, 2008). 이를 통해 부착 규조류 및 그 외의 부착 식물플랑크톤의 밀도를 유추할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해양구조물 재료에 부착된 해조류 등의 측정을 위하여 클로로필-a 농도를 측정하여 부착성 식물플랑크톤의 농도를 유추하고자 한다. 실험 시편을 해양환경에 설치한 후 월별 클로로필-a의 변화를 관찰 및 분석하였다.

2.2 실험방법

실험은 2008년 8월 14일부터 2009년 1월 22일까지 약 5개월 간에 걸쳐 수행되어졌다. 실험에 이용된 시료는 (A) 폴리에틸렌 파이프, (B) 강재 파이프 그리고, (C) 나이론 그물로서, 각 시료별 생물부착 특성을 파악하고자 하였다. 또한 해양환경 특성에 따른 부착 특성을 파악하고자 각 시료를 서로 다른 5개의 해양 환경에 설치하여 월별 변화를 관찰하였다. 실험환경은 크게 해양심층수와 표층수 환경으로 나누어서 수온의 변화에 따른 생물부착의 정도를 살펴보고자 하였다(Table 1).

강원도 고성군에 위치한 한국해양연구원 해양심층수연구센터에서는 수심 300m와 500m에서 해양심층수를 취수하고 있으며, 이를 이용하여 저온환경을 구축하였다(St. 1~St. 3). 또한 해양심

Table 1 Experiment condition

St. No	Water depth	Condition
St. 1	Deep seawater of 300m	No light
St. 2	Deep seawater of 500m	No light
St. 3	Deep seawater of 300m	On light
St. 4	Surface seawater	At Lab.
St. 5	Surface seawater	At port

Table 2 Monthly temperature variation (°C)

	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.
St. 1	5-8	5-8	5-7	5-6	4-5
St. 2	5-8	5-8	5-7	5-6	4-5
St. 3	6-9	6-9	6-8	6-7	5-6
St. 4	19-22	15-21	11-16	9-13	9-13
St. 5 (Assumption)	21-23	16-21	11-16	10-14	11-13

층수연구센터 전방에서 표층수를 취수에서 실험실 내에서 표층수 환경을 조성하였으며(St. 4), 인근 오호항 수심 1m지점 실험역에 시료를 설치하여 표층수 환경을 구축하였다(St. 5). 심층수를 취수한 후에는 암냉 저수조에 보관하기 때문에 빛이 투과되지 않는 환경을 만들었으며(St. 1~St. 2), 더불어 저온성을 갖는 해양심층수 내에서 빛의 유무를 통한 식물플랑크톤 증식을 알아보기 위해 수심 300m 해양심층수에 인공 빛을 투과하는 실험구(St. 3)를 두었다.

Table 2에서는 실험 기간 동안 측정된 평균 수온을 나타내고 있다. 해양심층수는 수심 200m 아래에서 평균 2도 이하를 유지하고 있지만, 이송 및 저장 과정에서 수온이 상승하여 평균 5~8도의 수온을 유지하였다. St. 4는 실험실 내에서 직접 측정하여 수온을 알 수 있었지만, St. 5는 실험역에서 연속적으로 측정하는 것이 불가하여 고성군 오호리 외해역 수심 500m 지점에 설치된 표층부이 자료를 참고하였다.

2.3 분석 방법

클로로필-a 농도 측정은 식물플랑크톤의 밀도를 파악하기 위한 것으로서, 한 달에 한번 각각의 환경에서 시료 하나씩을 채취하여 해양환경공정시험법(국토해양부 고시, 2008)을 응용하여 측정하였다. 각 시료는 초음파로 식물플랑크톤 등을 분리하였으며, 분리된 물질은 GF/F 여지에 여과한 후 90% 아세톤(Acetone)에 20시간 추출하였다. 추출된 시료는 원심분리기를 이용하여 불순물을 제거하고 상층액만 분리하여 분광광도계를 이용하여 750nm, 665nm, 645 및 630nm를 측정하였다. 측정값은 아래의 식에 적용하여 클로로필-a 농도를 알아보았다(국토해양부 고시, 2008).

$$\text{클로로필-a} = 11.6 \times A_{665} - 1.31 \times A_{645} - 0.14 \times A_{630} \quad (1)$$

(Parson's and Strickland's method)

3. 결과 및 분석

시료에 따른 월별 클로로필-a 농도 변화는 Fig. 2~4에 나타내었다. 모든 재질에서 해양심층수 조건에서는 실험 기간 경과에 상관없이 클로로필-a 농도가 크게 변하지 않는 반면에, 표층수 조건에서는 계절에 따라 변동이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 클로로필-a 농도가 수온에 밀접하게 관계하며, 해조류 부착 또한 수온에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. Fig. 1에서는 4개월이 지난 후 각 시료에서 생물이 부착된 실제 사진을 보여주고 있다.

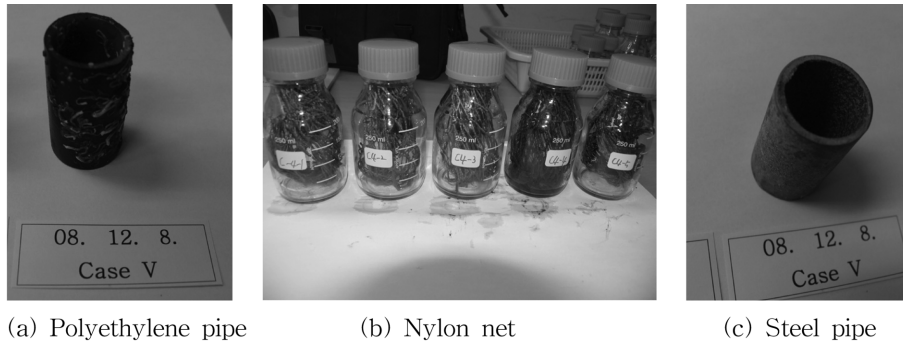


Fig. 1 4th samples (Oct.)

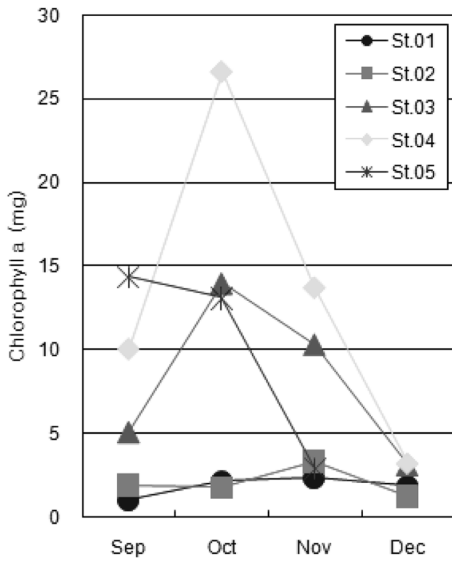


Fig. 2 Chlorophyll-a on steel pipe

강재 파이프의 경우 해양심층수 실험구인 St. 1과 St. 2에서는 클로로필-a의 농도가 3.29mg 이하로 관찰되었다(Fig. 2). 이것은 영양염류가 풍부한 해양심층수일지라도 식물플랑크톤의 성장요인인 수온이 낮은 조건에서는 식물플랑크톤의 세포 증식이 어렵기 때문이다. 반면, St. 1과 St. 2의 경우 빛이 없는 조건에서도 클로로필-a의 농도가 낮지만 일정하게 측정된 이유는 해양심층수에 존재하는 식물플랑크톤 중 광합성 대신 화학합성을 하는 종이 있는 것으로 추정된다. St. 3 조건에서는 St. 1과 St. 2 조건에 비하여 클로로필-a 농도가 비교적 높게 나타나고 계절별 변화가 나타나는 현상을 확인할 수 있다. 이것은 빛에 의한 광합성에 영향으로 판단된다.

표층수 조건에서는 실험개시 1개월 후부터 높은 클로로필-a 농도가 나타났다. St. 4의 경우에는 2개월이 지나면서 클로로필-a 농도가 약 3배 정도 증가하였으나, 3개월이 지나면서 다시 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 클로로필-a 농도가 감소하는 것은 수온 저하로 인하여 식물플랑크톤 및 해조류 증식이 감소되기 때문인 것으로 사료된다. 반면에 실해역에서 측정된 St. 5의 결과를 살펴보면 시간이 경과되어 2개월이 지난 시점에서도 클로로필-a 농도가 약간 감소한 후, 계속 감소하는 현상을 볼

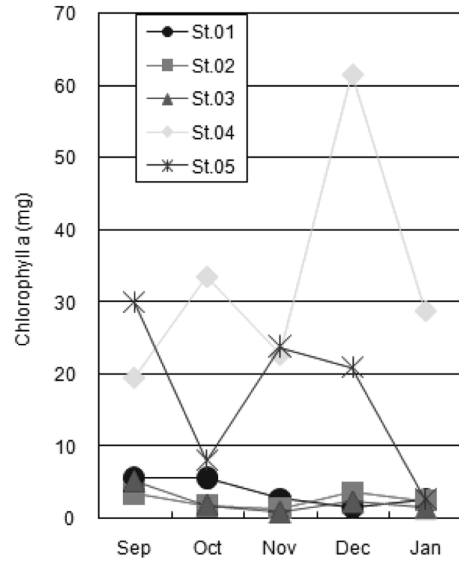


Fig. 3 Chlorophyll-a on PE pipe

수 있다. 이것은 St. 4 결과와 약간 상이한 것인데, 실해역에 설치한 지점에 관한 정확한 수온자료가 없어서 정확한 분석이 불가능하였다. 향후 자세한 자료에 기초하여 추가적인 실험이 요구된다.

폴리에틸렌 파이프의 월별 클로로필-a 농도 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 폴리에틸렌 파이프의 경우 해양심층수 실험구인 St. 1~3 조건에서는 클로로필-a 농도가 5.66mg 이하로 안정된 상태로 유지되는 것으로 관찰되었다. 표층수 조건인 St. 4의 결과를 살펴보면, 2개월 경과 때까지 클로로필-a 농도가 증가하다가 3개월이 경과되면서 다시 감소한다. 그러나 4개월째 다시 약 2배 이상 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 폴리에틸렌 파이프의 경우도 클로로필-a 농도는 수온에 직접적으로 영향을 받기 때문에, 해조류 부착도 수온에 직접적으로 영향을 받을 것을 예상할 수 있다. 그러나 이 결과는 강재 파이프 및 나일론 그물과는 약간 다른 경향을 나타내었다. 즉, 강재파이프와 나일론 그물에 비하여 생물부착이 발생하는 시간까지 보다 오랜 시간이 소요되었는데, 폴리에틸렌 파이프의 표면조도가 강재파이프와 나일론 그물에 비하여 낮기 때문인 것으로 사료된다. 폴리에틸렌 파이프의 표면조도가 낮고 매끄럽기 때문에 해조류가 부착

하는데 오랜 시간이 소요된 것으로 판단된다. 실험 개시 후 5개월이 경과된 후에는 클로로필-a 농도가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 실험역 조건인 St. 5 결과는 강제 파이프 결과와 마찬가지로 2개월이 경과된 후 자료는 오류가 발생하는 것으로 판단된다. 3개월 후에는 다른 재질과 유사한 패턴을 보였다.

폴리에틸렌 파이프는 실험역 조건인 St. 5에서 3개월이 경과되면서 석회질 물질이 부착된 것이 발견되었는데, 강관에서 미소하게 발견되었던 현상으로 정량적/정성적 분석을 수행하였다. 파이프 내부에 부착된 물질은 자포동물군에 속하는 석회관갯지렁이와 해면동물이었으며, 석회관갯지렁이가 주를 이루었다. 석회관갯지렁이는 석회질 물질로 주거처를 형성하여 그 내부에서 서식하는 것으로, 국내에서 흔히 볼 수 있는 부착생물 중의 하나이다. 석회관갯지렁이가 부착되면 파이프의 외경을 증가시키기 때문에 중량과 외경이 증가된다. 파이프 내·외부 단면적의 약 30% 이상 면적에 석회관갯지렁이가 부착된 것을 알 수 있었다. 직경 증가를 정량적으로 측정하기 위하여 파이프 원형 단면을 8등분 한 후 45도씩 회전하면서 버어니악리퍼스를 이용하여 외경을 측정하였다. 원주방향으로 8회 측정하였으며, 파이프 길이 방향으로 3회(상단, 중앙단, 하단) 측정하여 평균값을 취하여 생물부착에 의한 직경 증가량을 측정하였다. Table 3에서는 직경 증가량 및 증가율을 계산한 결과를 보여준다. 전체 평균을 고려하면 실험이 시작된 후 4개월 후에는 약 2%의 직경 증가가 발생한 것을 알 수 있다. 석회관갯지렁이의 생물부착은 실험기간이 증가하면 보다 큰 값이 될 것으로 추정

되며, 직경 증가에 의하여 설계외력보다 큰 외력이 유발될 수 있음을 예측할 수 있다.

나일론 그물의 월별 클로로필-a 농도의 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 나일론 그물의 경우, 다른 재질에 비하여 표층수 실험구와 해양심층수 실험구 간의 경향적인 차이가 확연하게 나타났다. St. 1~St. 3의 경우 7.48mg 이하로 클로로필-a 농도가 월간 큰 변화 없이 일정한 경향을 보였으나, St. 4의 경우 10월에 최대 1498.58mg, 1월에 최저 11.39mg으로 큰 폭의 변화를 보였다. St. 5 역시 10월에 최대 259.49mg, 12월에 최저 29.46mg으로 나타났다. St. 5의 경우 파도 및 외부 요인으로 인해 12월분 이후로 샘플이 유실되어 측정하지 못하였다. 나일론 그물의 경우 실험 기간에 따른 클로로필-a 농도 변화는 강관 파이프의 변화 유형과 유사하게 나타났다. 나일론 그물은 강제 파이프 및 폴리에틸렌 파이프에서 발견되었던 갑각류 해양생물은 발견되지 않았다. 그러나 St. 4와 St. 5 조건에서 대형 규조류가 그물에 부착되는 것을 목측으로 확인할 수 있었으며, 3개월이 지나면서 실험역에 설치한 St. 5에서 해조류(다시마)의 성장을 목측으로 확인할 수 있었다.

Fig. 5에서는 나일론 그물을 초음파 분리 후 건조시켜서 중량을 측정한 결과를 보여준다. Fig. 4의 결과에 의하면 클로로필-a 농도는 10월이 지나면서 감소하는 반면에, 건조량은 대부분의 실험군에서 11월까지 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 다시마 등의 해조류가 부착하여 성장하거나 혹은 기타 해양생물들이 부착하여 서식하였다는 것을 의미한다. 즉, 클로로필-a 농도로 측정이 되지 않는 않지만, 목측으로 확인할 만큼의 생물이 부착하였음을 의미한다.

각 재질별 생물부착 특징을 분석해보면 강제 파이프와 폴리에틸렌 파이프에서는 석회관갯지렁이와 해면동물로 추정되는 해양생물이 부착되었으며, 특히 폴리에틸렌 파이프에서 부착된 양이 매우 높게 나타났다. 나일론 그물에서는 석회관갯지렁이 등의 해양생물은 부착되지 않지만 규조류와 해조류가 많이 부

Table 3 Outer dia. increasement on a polyethylene pipe

Time	Outer diameter, cm (Increase ratio)		
	Top	Middle	Bottom
Initial	27.62	27.73	27.69
Nov.	27.76	27.83	27.80
Dec.	28.07 (1.6%)	28.53 (2.9%)	28.07 (1.4%)

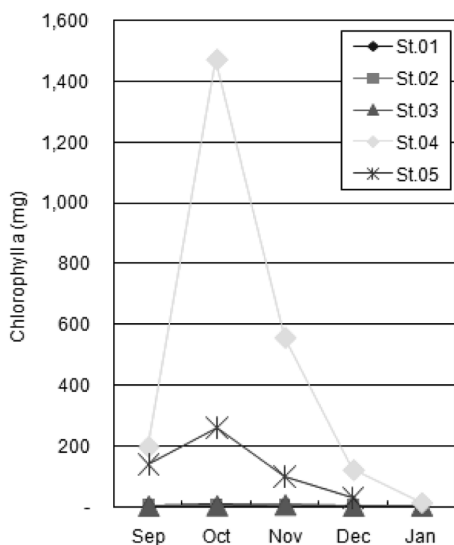


Fig. 4 Chlorophyll-a on nylon net

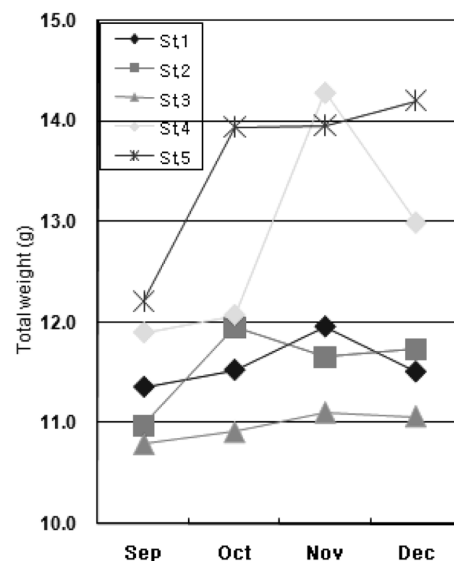


Fig. 5 Dry weight of nylon net

착되는 것을 알 수 있었다. 이것은 재질별 표면조도에 기인하는데, 표면조도가 가장 큰 나일론 그물에서는 규조 및 해조류가 부착하기 용이하다는 것을 알 수 있다. 반면 석회관갯지렁이와 해면동물은 일정 이상의 표면적을 가지면서 표면조도가 낮은 물질에 잘 부착하는 것을 알 수 있다. 따라서 해양구조물 재질별 부착생물 및 부착경향은 명백하게 다르게 나타난다는 사실을 발견할 수 있었다.

본 실험은 늦여름에 시작하여 겨울까지 수행되어졌는데, 향후 사계절에 걸친 실험을 수행하여 재질과 해양환경 특성에 따라서 생물부착의 특성을 정량적/정성적으로 분석할 계획이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대표적인 해양구조물 재질인 강재 파이프, 폴리에틸렌 파이프, 그리고 나일론 그물에 대한 생물 부착 특성을 파악하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 각 실험 샘플은 수온 및 해양환경에 따라서 어떤 생물부착 특성이 나타나는지를 파악하기 위하여 해양심층수와 표층수 환경에 설치하였다. 생물부착 분석은 월별 클로로필-a 농도 변화를 통하여 간접적 분석으로 이루어졌으며, 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 해양환경에서 해조류의 부착특성은 수온에 크게 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 저수온 조건인 해양심층수 환경에 비하여 비교적 고수온 조건인 표층수 환경에서 생물부착현상은 활발하게 일어났다.

(2) 각 재질별 생물부착 특성을 살펴본 결과, 강재파이프와 폴리에틸렌 파이프에는 석회관갯지렁이와 해면동물이 부착되며, 특히 폴리에틸렌 재질에 잘 부착한다는 사실을 알 수 있었다. 반면에 나일론 그물에는 규조류와 해조류가 잘 부착한다는 사실을 발견할 수 있었다. 재질별 생물부착 특징은 재질의 표면조도와 깊이 관계하는 것으로 사료된다.

(3) 해양심층수 환경에서는 영양염이 풍부할지라도 식물플랑

크톤의 성장요인인 수온 저하로 인하여 클로로필-a의 농도가 낮으며, 비록 낮은 농도이지만 화학합성에 의하여 클로로필-a 농도가 발견되었다. 이를 통하여 해양심층수 취수관 내부에는 일정 유속 및 수온이 유지된다면 생물부착은 발생하지 않는다는 사실을 추정할 수 있었다.

본 연구 결과는 해양구조물 설계에서 중요한 요소가 되는 생물부착 특성 분석에 관한 기초적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대되는 바이며, 향후 재실험 및 정량적/정성적 분석을 통하여 자료를 확보할 계획이다.

후 기

본 연구는 '해양심층수 다목적 이용 개발' 및 '해역 기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승시스템 핵심기술 연구' 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

이순길 (1987). "화력발전소 냉각계통이 해양생물에 미치는 영향", 한국수산학회, 제20권, 제5호, pp 391-407.
 위중환, 김형신, 이승주, 정민민, 김태익, 김병학, 허영백 (2002). "실내 수조에 설치한 파판에서의 해양 부착 규조의 다년간 천이 및 출현중", 대한수산학회, 제35권, 제5호, pp 476-479.
 국토해양부 고시 (2008). 해양환경공정시험법.
 Ciborowsky, J.J.H. and Clifford, H.F. (1984). "Short-term Colonization Pattern of Lotic Macroinvertebrates", J. Fish. Aqual. Sci., Vol 41, pp 1626-1633.

2009년 6월 18일 원고 접수

2009년 10월 20일 심사 완료

2009년 12월 21일 게재 확정