

Study on the control of marine biofouling developed on the surface of porous ceramics

Jimin Kang, Seunggu Kang[†] and YooTack Kim

Department of Advanced Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received September 25, 2015)

(Revised October 12, 2015)

(Accepted October 14, 2015)

Abstract Recently, removing methods of red tide has been attempted by filtering the organisms using the ceramic porous bodies. However, the marine biofouling could be developed on the surfaces of porous ceramic body after use for more than one month, and it might decrease the function of the specimen. In this paper, a method of inhibiting marine biofouling by changing the physical properties or surface-modification of ceramic porous body was studied. After experiment with six different ceramic porous bodies, it was found that the specimen of lower porosity and water absorption showed the least amount of biofouling. In addition, by increasing the surface roughness with silica particles bonded to the surface of specimen, the amount of biofouling caused by large marine life such as barnacle and mussel could be decreased. On the other hand, when the surface of specimen was coated and fused by glass powder, the amount of biofouling was rather increased. This might be due to eluted inorganic ions from the glass which can promote the growth of the microorganism. In conclusion, the environmental-friendly methods to reduce the amount of marine biofouling, such as controlling the physical properties and the surface roughness of the porous ceramics, can be possible without the use of dangerous substances. So it is expected for the results obtained to be applicable to a marine structure.

Key words Marine, Biofouling, Microorganism, Porous ceramics, Porosity, Water absorption, Surface roughness, Glass coating

세라믹 다공체 표면에 발생하는 해양 생물 오손 억제에 관한 연구

강지민, 강승구[†], 김유택

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2015년 9월 25일 접수)

(2015년 10월 12일 심사완료)

(2015년 10월 14일 게재확정)

요 약 최근 세라믹 다공체를 이용하여 적조 생물을 여과, 제거하려는 연구가 시도되고 있다. 하지만 해양 환경에서 1 개월 이상이 경과하면 다공체 표면에 해양 생물 오손(biofouling)이 발생하여 기능이 저하되는 문제가 나타난다. 본 논문에서는 세라믹 다공체의 특성 변화 또는 표면 개질을 통하여 해양 생물 오손을 억제하는 방법에 대하여 연구하였다. 6 종류의 세라믹 다공체를 시험한 결과, 기공율과 흡수율이 낮을수록 생물 오손량이 낮게 나타났다. 또한 다공체 표면에 실리카 입자를 결합시켜 표면 거칠기를 증가시키면, 따개비 등의 대형 해양 생물로 인한 오손량을 감소시킬 수 있었다. 한편 세라믹 다공체 표면에 유리분말을 용착 코팅시키면 오히려 생물 오손량이 증가하였는데, 이는 유리에서 용출되어 나오는 무기질 성분 이온들이 미생물의 생육을 촉진했기 때문이다. 본 연구로부터 세라믹 다공체의 물리적 성질 및 표면 거칠기를 제어하면 위험 물질을 사용하지 않고도 친환경적으로 해양 생물 오손량을 줄일 수 있음을 확인하였으며, 따라서 본 결과를 향후 해양 구조물 등에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

[†]Corresponding author

Tel: +82-31-249-9767

Fax: +82-31-244-8241

E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

1. 서 론

해마다 여름철이 되면 우리나라 연해에 적조가 발생하여 해양 가두리 양식장의 어류들이 폐사하면서 어민들이 큰 피해를 입고 있다[1-3]. 이러한 피해를 방지하기 위해 해양 가두리 양식장의 테두리에 세라믹 다공체가 채워진 멤브레인을 설치하고, 적조 생물을 여과, 제거하려는 연구가 최근 시도되고 있다[4, 5]. 하지만 세라믹 다공체 멤브레인은 물론 대부분의 인공 설치물들은 해양 환경에서 1개월 이상 노출되면 그 표면에 해양 생물 오손(biofouling)이 발생한다. 생물 오손이란 선박의 밑부분이나 발전소 터빈과 같은 해양 구조물 등에 미생물이 부착되면 이를 먹이로 하여 다양한 생물종이 연속적으로 부착됨으로서 구조물에 영향을 주는 현상을 뜻한다.

해양 생물 오손의 발생 초기에는 미생물과 구조물이 부착되고 이후 시간이 경과함에 따라 따개비, 담치류, 다모류 등 대형 해조류가 부착되면서 점차 생물 오손량이 증가하게 된다[6, 7]. 생물 오손은 해양 구조물의 중량을 증가시켜 유효부력을 감소시킬 뿐 아니라, 구조물의 체적을 증가시켜 이에 작용하는 유체의 힘이 커지게 된다. 구조물에 작용하는 유체의 힘이 그 설계 강도를 초과하면 파괴 등의 문제를 야기하게 되므로, 생물 오손은 해양 구조물 설계 과정에서 중요한 고려 인자 중의 하나이다[8].

해양에서 생물 오손 발생을 방지하기 위한 방법으로 유기 주석 화합물 등 다양한 물질들이 함유된 방오(anti-biofouling) 도료가 개발 및 사용되어 왔으나, 유기 주석 화합물의 경우 1ppt(part per trillion, 10^{-12}) 이하의 농도에서도 각종 해양생물에 치명적인 독성을 미치기 때문에 현재는 세계적으로 사용이 금지되어 있는 실정이다[9].

이에 따라 해양 생물 오손을 억제하기 위한 친환경적인 방법들이 꾸준히 연구되어 왔다. Liu[10] 등은 고분자 표면을 개질하거나 또는 표면 전하를 제어하여 미생물의 부착을 억제시키는 연구를 수행하였다. Cho[11] 등은 알루미늄 기관 표면을 소수성으로 변화시키면 초기 단계의 생물 오손 방지에 확연한 효과가 있음을 밝혔다. 또한 Dineshran[12] 등은 나노미터 크기의 TiO_2 와 Nb_2O_5 의 광촉매 작용을 통하여 생물 오손을 억제하는 연구를 수행하였다. Wehing[13]은 여과막으로 사용되는 지르코니아 튜브에 생물 오손이 발생되는 것을 방지하기 위해 $AgNO_3$ 용액을 적용하는 연구를 진행하였다. 한편, 소성 조건을 인자로 하여 세라믹 다공체의 물리적인 특성을 변화시키는 연구는 최근 많이 수행되었으나[14, 15], 이를 해양 환경에 적용 시 발생하는 생물 오손 억제성과 연관시킨 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

본 논문에서는 독성 물질을 사용하지 않고, 친환경적으로 세라믹 다공체의 해양 생물 오손을 억제시키기 방법에 대하여 연구하였다. 먼저 세라믹 다공체의 기공율 및

흡수율이 해양 생물 오손에 미치는 영향을 측정하기 위하여 6 종류의 시편에 대해 현장 실험을 수행하였다. 또한 세라믹 다공체의 표면 거칠기 변화 및 유리질 코팅이 생물 오손에 미치는 영향에 대해서도 연구, 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 세라믹 다공체 준비

본 연구에서는 물리적 특성이 다른 6 종류의 세라믹 다공체를 준비하여 시편의 흡수율 및 기공율에 따른 생물 오손 특성을 관찰하였다. 6 종류의 세라믹 다공체는 각각 A-1, A-2, A-3, A-4, A-5 그리고 A-6로 명명하였다. 시편명 배열은 생물 오손량 측정 결과로부터 오손량이 적은 것부터 많은 순서로 나열한 것이다. 즉 시편명 뒤의 숫자가 클수록 생물 오손량이 많음을 뜻한다(“결과 및 고찰”, Fig. 2 참조). 본 연구에서 사용된 세라믹 다공체 시편들은 대부분 구형이었으며, 평균 크기는 12 ± 5 mm이었다.

2.2. 세라믹 다공체 표면 거칠기 변화

세라믹 다공체 표면의 거칠기(roughness)를 변화시키기 위하여 시편 A-1 표면에 SiO_2 입자를 결합시켰다. SiO_2 입자를 시편표면에 결합하는 방법은 먼저 증류수에 물유리(First grade, Na_2O 17~18%, SiO_2 36~38%, Kanto chemical, Japan)가 55 wt% 혼합된 용액과 세라믹 시편을 함께 플라스틱 통 안에 넣고 70 rpm의 속도로 10분간 회전시켰다. SiO_2 분말 입자(Kukje Mining Co., Korea, 99.6%)는 그 입경이 0.3 mm 이하인 미세한 것과 0.3 mm 이상인 굵은 것의 2 종류를 사용하였다. 0.3 mm 이상인 굵은 분말에서 최대 입자크기는 0.8 mm였다. 이후 세라믹 다공체 시편을 전기 건조기에서 100°C에서 24시간 동안 건조시킨 후 이를 900°C로 예열된 전기로에서 10분간 열처리하여 SiO_2 입자를 시편 표면에 단단히 결합시켰다.

2.3. 유리 코팅

세라믹 다공체 표면에 유리를 용착시켜 그에 따른 생물 오손량 변화를 관찰하기 위하여 2 종류의 유리 분말 즉, 소다라임 유리 및 수용성 유리를 사용하였으며 각각의 화학적인 조성을 Table 1에 나타내었다.

유리 분말의 입도는 체를 이용하여 300 μm 이하 것만을 선별 사용하였다. 먼저 세라믹 다공체를 1 wt% PVA 용액에 10초간 적시어 표면에 점성을 띠게 한 후, 이를

Table 1
Chemical composition of two kind of glasses (wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Soda lime glass	72.6	0.9	0.1	9.4	3.6	13.1	0.3	0.1
Water soluble glass	66.3					33.7		

유리 분말과 함께 플라스틱 용기에 넣고 70 rpm의 속도로 10분간 회전시켜 다공체 표면에 유리 분말을 코팅시켰다. 이때 용기 내 투입된 유리 분말의 양은 세라믹 다공체 무게의 10%로 하였다. 유리 분말이 코팅된 세라믹 다공체는 900°C로 예열된 전기로에서 20분간 열처리하여 유리 분말을 시편 표면에 균일하게 용착시켰다.

2.4. 세라믹 다공체 특성 및 생물 오손량 평가

세라믹 다공체의 흡수율은 한국산업규격 “KS F 2503: 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험방법”에 의거하여 측정하였다. 표면 거칠기는 공초점 레이저 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope, OLS3000-300mm autostage, OLYMPUS)을 이용하여 측정하였고 다공체 표면에서 4 곳을 측정한 뒤 그 평균값을 구하였다. 세라믹 다공체는 가로 15 cm, 세로 21 cm의 아크릴 판에 유기 접착제를 사용하여 붙인 후, 경상남도 거제시에 위치한 한국해양과학기술원 앞바다 수심 1 m 위치에 설치하였다. 현장에서의 실험기간은 전체적으로 2014년 3~11월까지였으나, 시편 계열 별로 3개월씩만 관찰, 측정하였다. 시편에 발

생된 생물 오손량은 한달에 1회 씩 측정하였으며, 다음 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{생물 오손량(\%)} = \frac{(W_a - W_b)}{W_b} \times 100 \quad (1)$$

여기서 W_a = 설치 후 시편의 해양 속 무게이고 W_b = 설치 전 시편의 해양 속 무게이다.

3. 실험결과

3.1. 세라믹 다공체의 물리적 특성 및 생물 오손량

본 연구에서 사용된 6 종류의 세라믹 다공체의 기공율, 흡수율 그리고 비중을 측정하여 Fig. 1에 나타내었다. 다공체 시편의 기공율과 흡수율은 서로 유사한 경향을 보였다. 즉 기공율이 큰 시편은 흡수율도 크게 나타났다. 그러나 다공체의 비중은 기공율과 대체로 반비례하는 경향을 보였다.

6 종류의 세라믹 다공체를 경상남도 거제시 앞바다 수

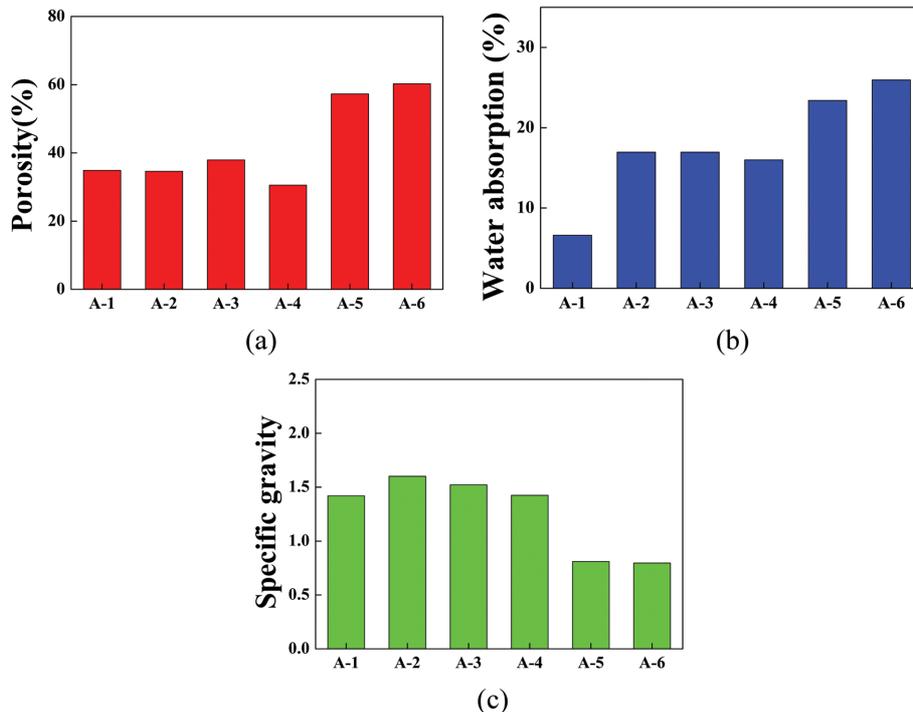


Fig. 1. Physical properties of 6 different porous ceramics; (a) porosity, (b) water absorption, and (c) specific gravity.

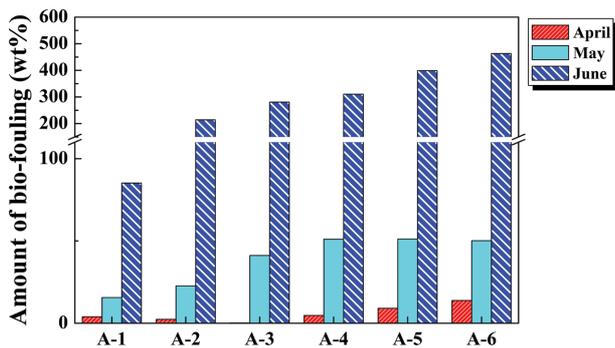


Fig. 2. Monthly amount of bio-fouling of 6 different porous ceramics. The specimens were first installed in the marine of Geoje-si, Gyeongsangnam-do in March, 2014.

심 1 m 속에 설치하고 3개월 동안 월별로 생물 오손량을 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 처음 1개월 경과 시점까지는 모든 시편의 생물 오손량이 크지 않았다. 일반

적으로 생물 오손 발생 초기에는 시편 표면에 미생물 막이 형성되므로 생물 부착 무게가 크지 않기 때문이다.

그러나 2개월이 경과되면 생물 오손량이 증가하기 시작하였고 3개월이 경과되면 모든 시편에서 생물 오손량이 급속히 증가하였다. 이는 시간 경과에 따라 점차 무게가 큰 따개비 또는 담치류 등 대형 해조류가 시편에 부착되기 때문이다.

그런데 6종류 시편 중에서 생물 오손량이 가장 낮았던 것은 A-1 시편이었고, 가장 높았던 것은 A-6 시편이었다. 즉 A-6 시편의 경우, 1개월 뒤 오손량이 15%였으나 2개월 뒤에는 50%, 그리고 3개월 뒤에는 450%로 급증하였다. 반면 A-1 시편의 경우, 1개월 경과 후 오손량이 5%였고 2개월 뒤에는 18%, 그리고 3개월이 경과되어도 85% 정도로 나타나, A-6 시편에 비해 생물 오손량이 현저히 낮은 것을 알 수 있다.

6 종류 시편의 생물 오손량 그래프(Fig. 2)와 시편의

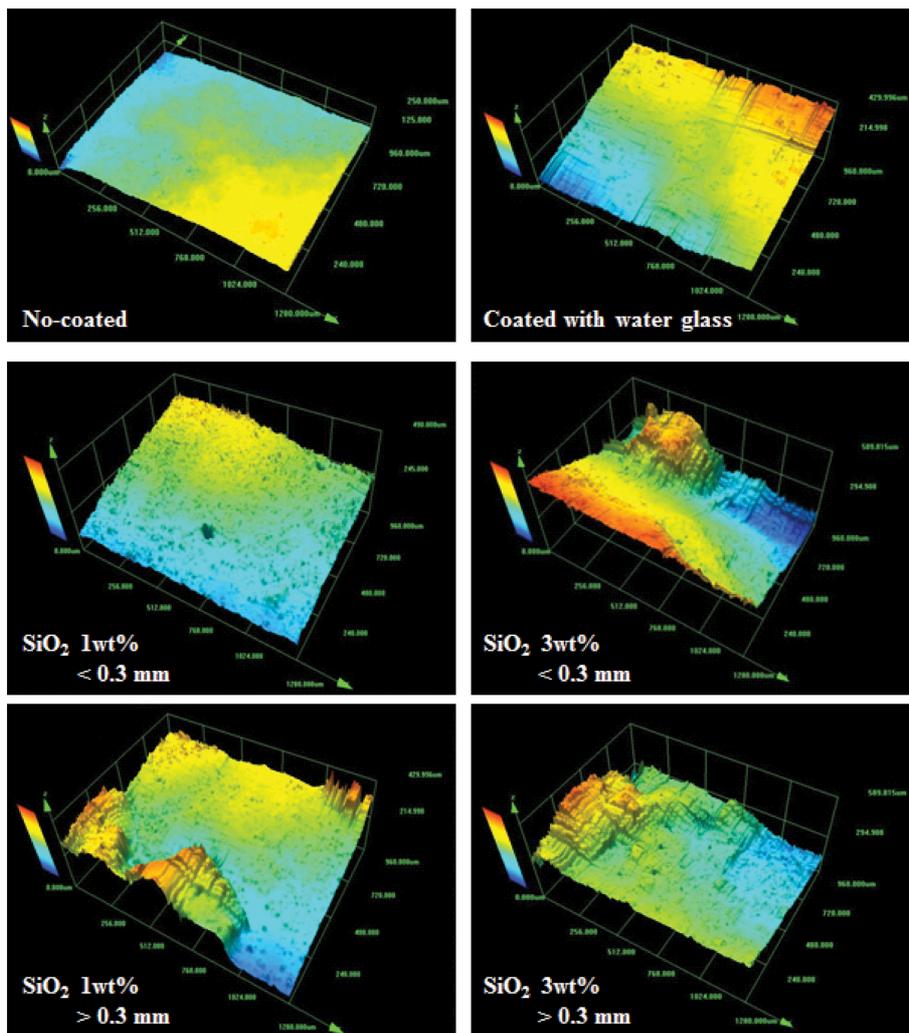


Fig. 3. Image of surface for porous ceramics coated with various size and coating amount of SiO₂ powders using confocal laser scanning microscope.

물리적인 특성(Fig. 1)을 비교해 보면, 시편의 기공율 및 흡수율이 낮을수록 생물 오손량이 낮은 것을 알 수 있다. 이는 흡수율이 낮을수록 생물 오손 초기 단계인 미생물 흡착이 잘 일어나지 않기 때문에 생물 오손량이 낮은 것으로 생각된다.

3.2. 세라믹 다공체의 표면 거칠기 효과

SiO₂ 분말 코팅 유무에 따른 세라믹 다공체 표면 이미지를 공초점 레이저 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope)으로 관찰하여 Fig. 3에 나타내었다. 이때 입자 크기가 다른 2 종류의 SiO₂ 분말을 사용하였고, 각각에 대해 코팅량을 1 및 3 wt%로 변화를 주었다. SiO₂ 분말이 코팅되지 않은 시편 표면은 전체적으로 높낮이 차이가 별로 없이 평탄한 것을 알 수 있다. 그러나 SiO₂가 코팅된 대부분의 시편은 그 표면이 거칠어졌다. SiO₂ 입도가 0.3 mm 이하인 경우에는 코팅량이 3 wt% 이상 첨가해야 거칠기가 증가하였으나 0.3 mm 이상인 경우, 코팅량이 1 wt%으로도 시편 거칠기가 크게 증가하였다.

공초점 레이저 현미경으로 관찰된 표면에서 임의로 선택한 4곳의 거칠기를 측정하여 그 평균값으로 그래프로 그려서 Fig. 4에 나타내었다. 코팅하지 않은 다공체 시편의 표면 거칠기는 약 100 μm 값을 나타냈으나 SiO₂ 분말을 코팅하면 분말 크기나 코팅량에 관계없이 표면 거칠기가 2배 이상 증가되었다. 특히 SiO₂ 분말 크기가 0.3 mm 이상인 것을 3 wt% 코팅하였을 때 다공체 표면 거칠기는 410 μm 정도로 약 4배 높게 증가하였다.

세라믹 다공체의 표면 거칠기에 따른 해양 생물 오손량을 Fig. 5에 나타내었다. 시편을 해양에 설치하고 1개월 및 2개월 후까지는 시편 거칠기 조건에 따른 생물 오손량 변화가 거의 없었다. 그러나 3개월이 경과되면 SiO₂ 입자가 코팅된 시편의 생물 오손량이 코팅되지 않

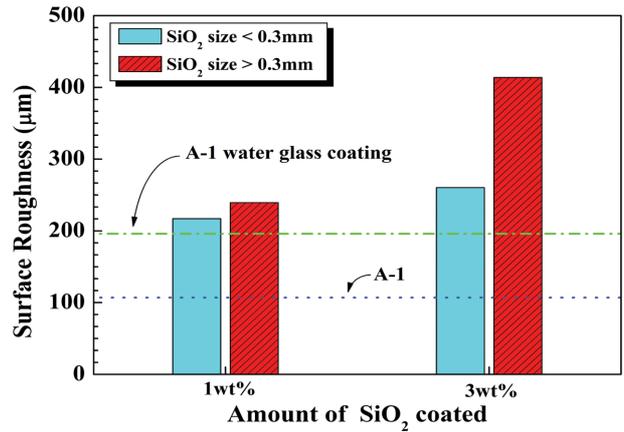


Fig. 4. Surface roughness of porous ceramics coated with SiO₂ as a function of amount and particle size of SiO₂ powder.

은 시편에 비해 낮은 값을 나타내었다. 특히 SiO₂ 코팅량이 증가할수록, 그리고 SiO₂ 입자 크기가 클수록 생물 오손량이 낮게 나타났다. 예를 들어 0.3 mm 이상의 SiO₂ 입자를 3 wt% 코팅된 시편은 원래 시편에 비해 생물 오손량이 약 50 % 낮게 나타났다.

이를 Fig. 5의 표면 거칠기와 연관시켜 보면, 표면 거칠기 값이 클수록 3개월 경과 시 생물 오손 억제 효과가 큰 것으로 나타났다. 거칠기가 클수록 장기적 생물 오손 억제 효과가 큰 것은 해양에서 생물 오손은 미생물 부착으로 시작되지만 시간이 경과하면서 부착된 미생물을 먹잇감으로 하는 딱개비나 홍합류 같은 대형 조류가 부착하기 때문이다. 이러한 딱딱한 대형 조류는 표면 거칠기가 큰 시편에서는 쉽게 성장하지 못하는 것으로 판단된다.

3.3. 세라믹 다공체 표면의 유리 코팅 효과

세라믹 다공체의 표면을 유리로 용착 코팅한 뒤, 그

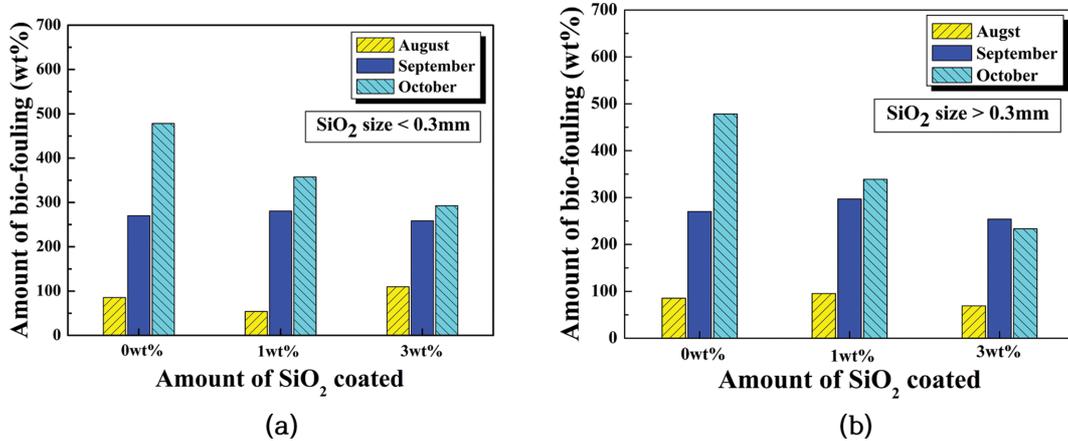


Fig. 5. Amount of bio-fouling for porous ceramics coated with SiO₂; (a) SiO₂ size < 0.3 mm and (b) SiO₂ size > 0.3 mm. The specimens were first installed in the marine of Geoje-si, Gyeongsangnam-do in July, 2014.

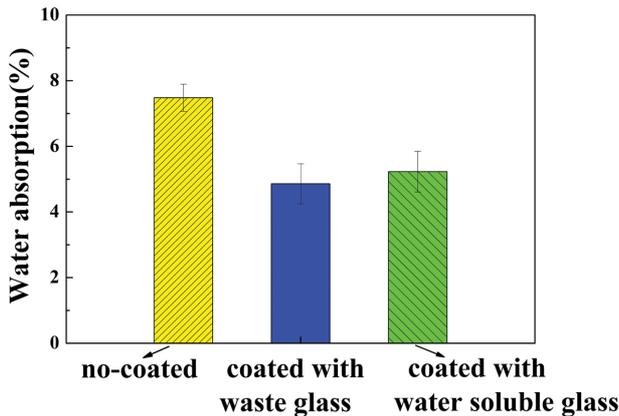


Fig. 6. Water absorption of porous ceramics coated with two kinds of glasses, waste glass and water soluble glass.

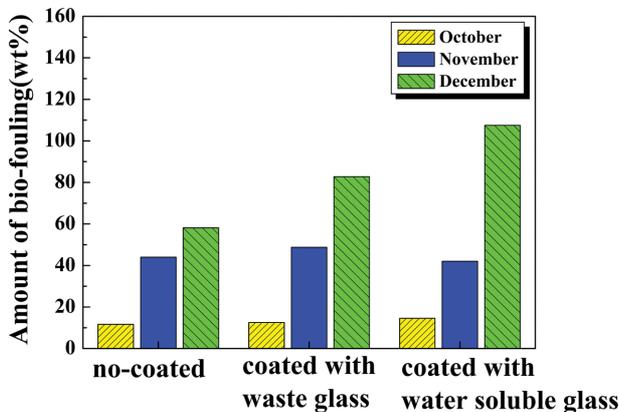


Fig. 7. Amount of bio-fouling for porous ceramics coated with two kinds of glasses, waste glass and water soluble glass. The specimens were first installed in the marine of Geoje-si, Gyeongsangnam-do in September, 2014.

흡수율을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 원래 시편의 흡수율은 7.5%인 반면, 유리를 용착 코팅시킨 시편은 5~5.5%로 약 30% 낮은 흡수율 값을 나타내었다.

유리로 용착 코팅된 세라믹 다공체 시편의 생물 오손량을 3개월간 관찰 측정한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 2개월이 경과할 때 까지 유리 용착 코팅에 따른 생물 오손량 변화는 거의 나타나지 않았다. 그러나 3개월이 경과되면 생물 오손량은 원래 시편에 비해 유리가 용착 코팅된 시편에서 더 많이 나타났다. 이는 용착 코팅된 유리가 해수 속에서 내구성이 저하되면서 구성 성분 이온들이 용출되기 때문으로 생각된다. 미생물이 성장하기 위해서는 탄소 공급물질이 필요한 것은 물론, 그 외에도 단백질과 핵산을 합성하는데 필수적인 무기질이 요구된다. 따라서 유리가 용출되면서 나오는 Na, Mg 등 무기질 이온이 해양 미생물 성장을 촉진한 것으로 생각된다[16]. 특히 수용성 유리를 용착한 시편의 경우, 3개월 경과된 뒤 생물 오손량이 가장 큰 것으로부터, 용출된

유리 성분들이 해양 생물 성장에 관여한 것으로 보인다. 그러나 이에 대한 정확한 분석은 추가적인 연구를 통해 밝혀야 할 것으로 판단된다.

유리를 용착 코팅시킨 시편은 원래 시편에 비해 흡수율이 30% 낮게 나타났으나, 생물 오손량은 원래 시편보다 증가하였다. 앞서 3.1절에서 논했듯이 세라믹 다공체는 그 흡수율이 낮을수록 생물 오손량이 낮아지는 경향을 보였다. 그런데 유리를 용착 코팅시켜 인위적으로 흡수율을 낮춘 시편에서 생물 오손량이 오히려 증가한 것이다. 이와 같이 표면 개질을 통해 비록 흡수율을 낮추었다라도, 이온 용출 특성이 발현하게 되면, 생물 오손량은 흡수율 보다는 이온 용출 특성에 더 영향을 받는 것으로 생각된다.

4. 결 론

세라믹 다공체 시편의 특성 변화 또는 표면 개질을 통하여 해양 생물 오손을 억제하는 방법에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

6 종류의 세라믹 다공체를 시험한 결과, 기공율과 흡수율이 낮을수록 생물 오손량이 낮게 나타났다. 이는 생물 오손 초기에 부착되는 미생물/시편 간 결합력을 낮추었기 때문이다. 또한 다공체 표면에 실리카 입자를 결합시켜 표면 거칠기를 증가시키면, 생물 오손량이 감소하였다. 이는 시편이 해양 속에서 3개월 가량 경과되면 파개비, 홍합류 등의 대형 해양 생물이 부착하게 되는데 이러한 생물의 시편 부착성을 저하시켰기 때문이다. 한편 세라믹 다공체 표면에 유리분말을 용착 코팅시키면 시편의 흡수율이 감소하였음에도 생물 오손량이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 장기간 해양 속에서 유리 내구성이 감소되면서 유리 성분들이 용출되어 나오기 때문이다. 즉 용출된 무기질 이온들이 미생물의 생육을 촉진하였기 때문으로 생각된다. 그러나 향후 생물/신소재 간 융합 연구를 추가적으로 수행해야만 더욱 확실한 결론을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구로부터 세라믹 다공체의 물리적 성질 및 표면 거칠기를 제어하면 위험 물질을 사용하지 않고도 친환경적으로 해양 생물 오손량을 줄일 수 있음을 확인하였으며, 따라서 본 결과를 향후 해양 구조물 등에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2015학년도 경기대학교 대학원 연구원장학 생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- [1] KBS News, 2015. 8. 18, <http://news.changwon.kbs.co.kr/4609/>.
- [2] Hankyoreh Daily Newspaper, 2015. 8. 17, <http://www.hani.co.kr/arti/society/area/704815.html>.
- [3] Site for Information of Cochlodinium Polykrikoides, National fisheries Research & Development Institute, http://www.nfrdi.re.kr/redtide/webpage/operation/operation_01.jsp.
- [4] S.G. Lee, Y.S. Lee and W.A. Lim, "Study on prevention of red tide using sea bottom water and red tide barrier membrane", Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference 16 (2007) 211.
- [5] S.J. Shin, The second year report, Public Welfare Project: The development of bio/ceramic membrane pontoon for marine purification, Ministry of Science, ICT, & Future Planning, Korea (2014).
- [6] J.H. Shim and M.S. Jeong, "Development and succession of marine fouling organisms on artificial substrata", J. Oceanol. Soc. Korea 22 (1987) 257.
- [7] S.H. Park, J.Y. Seo and J.W. Choi, "Community structure of sessile organisms on PVC plates according to different submerged timings and durations in Jangmok Bay, Korea", Korean J. Malacol. 27 (2011) 99.
- [8] D.H. Jung, A.R. Kim, D.S. Moon, S.W. Lee, H.J. Kim and Y.H. Ham, "Preliminary experimental study on bio-fouling in real sea environment", J. Ocean Eng. & Technol. 23 (2009) 39.
- [9] D.M. Yebra, S. Kiil and D.J. Kim "Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings", Prog. Org. Coat. 50 (2004) 75.
- [10] C.X. Liu, D.R. Zhang, Y. He, X.S. Zhao and R. Bai, "Modification of membrane surface for anti-biofouling performance: Effect of anti-adhesion and anti-bacteria approaches", Journal of Membrane Science 346 (2010) 121.
- [11] S.H. Cho, S.N. Ryu, W.B. Hwang and B.S. Yoon, "Anti-fouling property of hydrophobic in sea water", J. Korean Society for Marine Environment and Energy 16 (2013) 82.
- [12] R. Dinshram, R. Subasri, K.R.C. Somaraju, K. Jayaraj, L. Vedaprakash, Krupa Ratnam, S.V. Joshi and R. Venkatesan, "Biofouling studies on nanoparticle-based metal oxide coatings on glass coupons exposed to marine environment", Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 74 (2009) 75.
- [13] J. Wehing, J. Koser, P. Lindner, C. Luder, S. Beutel, S. Kroll and K. Rezwani "Silver nanoparticle-doped zirconia capillaries for enhanced bacterial filtration", Material Science and Engineering C 48 (2015) 179.
- [14] M.A. Kang and S.G. Kang, "Effect of activated carbon on bloating properties of artificial lightweight aggregates containing coal reject ash and bottom ash", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 23 (2013) 201.
- [15] K.G. Lee, "Bloating mechanism for coal ash with iron oxide", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 24 (2014) 77.
- [16] Wikipedia, "Growth medium", https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_medium.