

Anti-biofouling properties of silver nano-particle coated artificial light-weight aggregates

Seongyeol Kim, Yooteak Kim and Yongjoon Park[†]

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

(Received August 26, 2015)

(Revised September 20, 2015)

(Accepted September 25, 2015)

Abstract Ships and marine structures have a lot of problems in their high maintenance and operating cost by biofouling. A biofouling occurs by the adhesion of marine microorganism, algae and bacteria. In this study, the aim is to prevent or to reduce the biofouling phenomena through silver nano-particle coating on artificial light-weight aggregates and geopolymer. The antibacterial activity on them is tested according to ASTM E2149-2013a. The test results showed, it is estimated that silver nano-particles removed 99.99 % of bacteria. Specimens were set up in the sea side of field test area in Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST) and have been observed for five months. The anti-biofouling effect and difference in weight change rate have been detected two months later after the installation. Because silver nano-particles inhibit bacterial growth and kill the cells by destroying bacterial membranes, silver nano-particle coating on artificial lightweight aggregates is a well-suited and eco-friendly method for preventing biofouling in the sea up to 5 months.

Key words Anti-biofouling, Silver nano-particle, Artificial lightweight aggregates

은 나노 입자가 코팅된 인공경량골재의 생물오손 방지 특성

김성열, 김유택, 박용준[†]

경기대학교 일반대학원 신소재공학과, 수원, 16227

(2015년 8월 26일 접수)

(2015년 9월 20일 심사완료)

(2015년 9월 25일 게재확정)

요약 본 연구는 해상 양식장 내에 유해 조류로 인해 발생하는 수산 동, 식물의 폐사를 막고, 양식장을 주기적으로 정화하는 폰톤 시스템 내의 멤브레인 층(Membrane Layer)의 생물오손(Biofouling)을 막고자, ML에 적용되는 인공경량골재 및 골재의 구조에 따른 미생물 흡착을 비교하고자 지오폐리머에 은 나노 입자를 코팅하여 생물오손 정도를 확인하고 그 능력을 평가하였다. 이후 코팅에 따른 미생물 기능 억제 능력을 확인하고자 항균 테스트를 실시하였으며, 한국해양과학기술원 남해연구소 앞바다에 설치하여 생물오손 정도와 무게변화율을 관찰하였다. 항균 테스트 결과 은 나노 입자를 코팅한 인공경량골재에서 99.99%의 세균 감소율을 확인하였으며, 생물오손 정도를 관찰한 결과 2개월부터 은 나노 입자의 효과에 의해 생물오손 정도가 억제되는 것을 확인하였다. 은 나노 입자 코팅에 의한 생물오손 억제기간은 인공경량골재에서 5개월, 지오폐리머에서 3개월 미만으로 나타났으며, 따라서 은 나노 입자가 코팅된 인공경량골재가 효과적으로 생물오손을 감소시킬 수 있는 친환경적이며 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

1. 서론

선박 및 해양 구조물 표면에 따개비, 해조류 및 원생 동물 등과 같은 해양 미생물들의 점착으로 발생하는 생

물오손(biofouling)은 시설물의 부식을 가속시켜 구조 안전성에 대한 문제를 야기시키고, 선박 표면 흐름의 저하를 증가시켜 운항비용 증가, 미생물 제거 및 유지 보수 비용 등을 발생시켜 오랫동안 해양 구조물 운영 및 관리에 문제가 되어 왔다. 점착된 해양 미생물들은 각종 분비물을 발생시키거나 미생물 외부에 석회질껍질을 만들어 고정화하는 등 심각한 생물학적 표면 오염을 유발한다. 또한 점착된 해양 미생물은 선박을 통해 다른 지역

[†]Corresponding author

Tel: +82-70-4024-9765

Fax: +82-31-249-9774

E-mail: kmpsens@naver.com

으로 퍼져 나감으로써 해양 환경오염 및 연안 생태계 교란을 야기하는 원인으로 추정되고 있다[1]. 해양 미생물들로 인한 생물오손은 저항증가, 속도저하, 연료비 증가 등으로 인한 일차적인 손실은 물론, 때때로 선박을 입거(docking)시켜 표면개선과 재도장을 해야 함으로써 생기는 부차적인 손실도 발생시킨다[2]. 해양 미생물의 생물오손을 방지하기 위한 방법으로는 트리부틸틴(tributyltin), 살생물제, 유기주석 화합물 등이 포함된 방오염 페인트가 사용이 있다. 특히 트리부틸틴은 따개비와 강장동물과 같은 부착생물의 부착방지에 매우 효과적이며, 효능도 5년 이상 지속되어 전 세계적으로 널리 사용되어 왔다[3]. 그러나 트리부틸틴은 표적 생물에 대한 독성이 강해 해양의 모든 생물에 강한 독성을 나타내고, 해양 미생물의 사멸과 면역 동성을 유도하고, 내분비계 장애 물질로서 고등류 생물의 임포섹스(imposex)를 일으키기도 하여 전 세계적으로 사용이 금지되고 있다. 따라서, 트리부틸틴 및 유기주석 화합물과 같은 중금속 물질이 포함되지 않은 신기능성 친환경적 방법을 통해 생물오손을 방지하는 연구가 시급한 추세이다[4]. 일반적으로 생물오손은 바다물에 노출된 세라믹, 금속, 고분자 등의 다양한 기질 표면에 미생물 표면의 세포에서 분비하는 단백질이나 당단백질이 점착되면서 일어난다[5]. 이에 따라, 미생물 표면의 세포에서 분비된 단백질 혹은 당단백질의 점착을 막아 생물오손을 방지하기 위해서는 미생물 자체를 표면에서 제거하는 기술이 요구된다.

은(Ag)은 미생물 체내의 신진대사 기능을 다방면으로 억제하여 650여종의 유해 세균 및 바이러스들을 제거하는 것으로 알려져 있다[6]. 은 나노 입자가 미생물 기능을 억제하는 메카니즘은 크게 두 가지가 있다. 먼저 일반적으로는 은 나노 입자가 미생물 표면의 세포에 직접적으로 접촉해 세포막 기능을 방해하고, 투과되어 단백질 기능을 저하시키거나 DNA 손상을 유발할 것으로 추측된다. 다른 방법은 은 나노 입자가 부분적 산화가 일어나 은 이온으로 용출되어 세포막에 부착될 수 있고, 내부로 유입되어 아미노산을 연결해 단백질 합성을 담당하는 세포소기관인 리보솜(Ribosome)을 변형시켜 단백질 합성 자체에 영향을 주기도 하며, DNA에 결합하여 손상을 유발함으로써 불활성화 시킬 수도 있다[6-8].

본 연구에서는 양식장을 상시적으로 정화할 뿐 아니라, 유해조류가 번성하여 침투할 때, 이를 효율적으로 제거하기 위한 폰툰 시스템의 ML에 적용되는 인공 경량 골재 표면에 생물 기능 억제 효과가 탁월한 은 나노 입자를 코팅하여 그 특성을 평가하였다. 또한, 인공경량골재의 구조에 따른 미생물 흡착효과를 비교하고자 비 소성 방식인 지오폐리머에 은 나노 입자를 코팅하여 비교하였다. 신기능성 재료인 은 나노 입자의 코팅은 방오 도료에 비해 독성이 적고 친환경적이므로 해양 생태계 교란

을 일으키지 않고, 효과적으로 생물 오손을 방지하여 선박 및 해양 구조물 산업 및 수산업에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

2. 실험방법

2.1. 시편 준비

실험을 위한 시편은 양식장을 상시적으로 정화하며 유해조류가 번성하여 침투할 때 효율적으로 제거하기 위한 폰툰 시스템의 ML의 생물오손을 막기 위해 ML에 적용되는 인공경량골재에 은 나노 입자를 코팅하여 실험을 진행하였다. 인공경량골재는 SiO₂ 및 Al₂O₃를 주성분으로 포함하는 세라믹 산화물 원료를 성형, 소성하여 제작하였고, 인공경량골재의 구조에 따른 효과와 미생물 흡착 경향을 비교하기 위하여 비 소성 방식을 이용한 지오폐리머를 제작하여 비교하였다. 지오폐리머는 친환경적이며 재활용 특성이 뛰어난 용융슬래그(fused slag)를 원료로 사용하였으며, 12 M의 NaOH 용액과 함께 혼합하여 성형 후 70°C에서 24시간 동안 양생을 하고 탈형하여 3일 재령 후 설치하였다. 지오폐리머 시편의 크기는 15 cm × 20 cm 크기로 제작하였으며, 인공경량골재의 경우 아크릴판에 15 cm × 20 cm 크기만큼 부착하여 실험을 진행하였다. 인공경량골재와 지오폐리머의 조성은 Table 1에 나타났다. 이후 시편은 한국해양과학기술원 남해연구소 앞 바다에 설치되어 5개월간의 생물오손 정도를 무게변화율로 측정하였다.

Table 1
Composition of artificial light weight aggregates and fused slag

	Content (wt%)	
	Artificial light weight aggregates	Fused slag
SiO ₂	63.870	47.401
Al ₂ O ₃	18.144	13.787
Fe ₂ O ₃	8.818	7.559
K ₂ O	3.353	1.106
CaO	3.166	22.075
TiO ₂	1.155	2.321
MgO	0.986	1.356
BaO	0.376	1.475
MnO	0.089	0.441
Cr ₂ O ₃	0.026	1.524
ZnO	0.016	0.123
CuO		0.631
SO ₃		0.140
NiO		0.031
SnO ₂		0.029
Total	99.983	99.97

2.2. 코팅 방법

친환경적이며 우수한 미생물 억제 능력을 갖는 은 나노 입자는 인공경량골재와 지오폐리머에 딥(dip) 코팅법을 이용하여 코팅하였으며, 은 나노 슬러리는 살균 효과 범위인 10~50 ppm에 맞추기 위하여 에탄올(ethanol)을 이용해 50 ppm으로 희석하여 사용하였다. 코팅을 위해서는 은 나노 슬러리에 인공경량골재와 지오폐리머를 Dipping 한 후 30분 후 꺼내어 상온에서 건조를 실시하였다. 은 나노 입자의 코팅 유무는 코팅된 시편의 색 변화를 통하여 알 수 있었으며, 은 나노 입자의 항균 테스트를 통하여 확신할 수 있었다.

2.3. 은 나노 입자의 항균 테스트

은 나노 입자 코팅 후 미생물 기능을 저하시키는 능력을 확인하고자 항균 테스트를 실시하였다. 항균 테스트는 ATCC 6538 표준 균주인 황색포도상구균(*Staphylococcus aureus*)과 ATCC 25922 표준 균주인 대장균(*Escherichia coli*)에 대하여 실시하였고, ASTM E2149-2013a 규격에 맞게 FITI 시험연구원에 의뢰하여 이루어졌으며, 시험은 균주가 배양된 배양액과 은 나노 입자가 코팅된 시편을 24시간 동안 플라스크에서 배양한 후 생존한 균의 수를 측정하는 방식으로 진행되었다.

2.4. 해양 현장 테스트

본 연구는 양식장에 유해 적조 조류의 번성을 억제하거나, 양식장을 상시적으로 정화하기 위한 폰툰 시스템의 ML의 생물오손을 억제시키기 위하여 미생물 기능을 저하시키는 은 나노 입자를 ML 내에 사용되는 인공경량골재에 코팅하여 한국해양과학기술원 남해연구소 앞 바다에 설치하여 생물오손 정도를 관찰하였다.

시편은 육지로부터 50 m 정도 벗어난 위치의 양식장에 수심 1 m 이하의 깊이에서 설치되었다. 수온과 pH는 생물오손에 큰 영향을 미쳐 지속적으로 측정하였는데, Table 3에 시편이 설치된 곳의 pH 및 수온을 측정한 결과를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 은 나노 입자의 항균 테스트

은 나노 입자의 생물오손 억제 능력을 확인하고자 FITI 시험연구원에 ASTM E2149-2013a 규격에 맞게 항균 테스트를 의뢰한 결과를 Table 2에 나타내었고 이들 테

Table 2

Number of cells after cultivation of blank, non-coated, and silver nano-particle coated artificial lightweight aggregates with bacteria for 24 hours

		Blank	Non-coated	Silver nano-particle coated
Staphylococcus aureus	Initial	2.3×10^5	2.3×10^5	2.3×10^5
	After 24 h	2.1×10^5	2.5×10^5	4.4×10^2
Escherichia coil	Initial	2.5×10^5	2.5×10^5	2.5×10^5
	After 24 h	1.0×10^5	1.3×10^5	<30

Table 3

pH and temperature of sea in a month period up to 5 months

	pH	Temperature
1 Month later	8.12	25.8°C
2 Month later	8.54	8.6°C
3 Month later	8.28	6.9°C
5 Month later	8.31	8.7°C

이타들은 24시간 동안 은 나노 입자를 코팅 한 시편과 균주를 함께 배양한 후 세균의 수를 측정한 값들이다. Table 2에서 볼 수 있듯 은 나노 입자를 코팅한 인공경량골재의 경우 모든 균주에서 감소율이 99.99 % 이상으로 나타났다. 이는 은 나노 입자가 잘 알려진 바와 같이 미생물의 기능을 억제하기 때문에 은 나노 입자가 코팅된 시편에서 초기 균수에 비해 24시간 이후 99.99 % 이상의 세균 감소율을 보인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 1는 24시간 동안 은 나노 입자가 코팅된 시편과 균주를 함께 배양한 후 남은 균주의 모습이다. (a), (b), (c)의 경우 황색포도상구균에 대한 항균 테스트 결과이고, (d), (e), (f)의 경우 대장균에 대한 항균 테스트 결과이다. 또한 (a)와 (d)는 오직 균주만을 배양한 결과이고 (b)와 (e)는 은 나노 입자를 코팅하지 않은 시편에 대한 결과이며 (c)와 (f)는 은 나노 입자를 코팅한 시편에 대한 결과이다. 황색포도상구균 및 대장균은 은 나노 입자가 코팅된 시편에서 모두 감소된 것을 확인할 수 있었고, 균주만을 배양한 (a), (d)와 은 나노 입자를 코팅하지 않은 (b), (e)를 비교하였을 때 서로 비슷한 수의 균주가 존재함을 확인할 수 있었다. Kim 등[9]은 은 이온과 효소 등의 단백질을 구성하고 있는 아미노산 중 하나인 시스테인(Systeine) 그룹의 -(SH)기가 상호작용을 하면서 -S-Ag를 형성하고, 균주의 단백질 기능을 저하시켜 대장균 및 황색포도상구균의 성장을 방해한다고 하였다. 이러한 이유 등으로 인하여 인공경량골재에 표면에 있던 은 입자가 미생물 기능 저하시켜 생물오손 억제된 결과임을 알 수 있었다.

3.2. 생물오손 관찰 결과

Fig. 2는 5개월간 한국해양과학기술원 남해연구소 앞

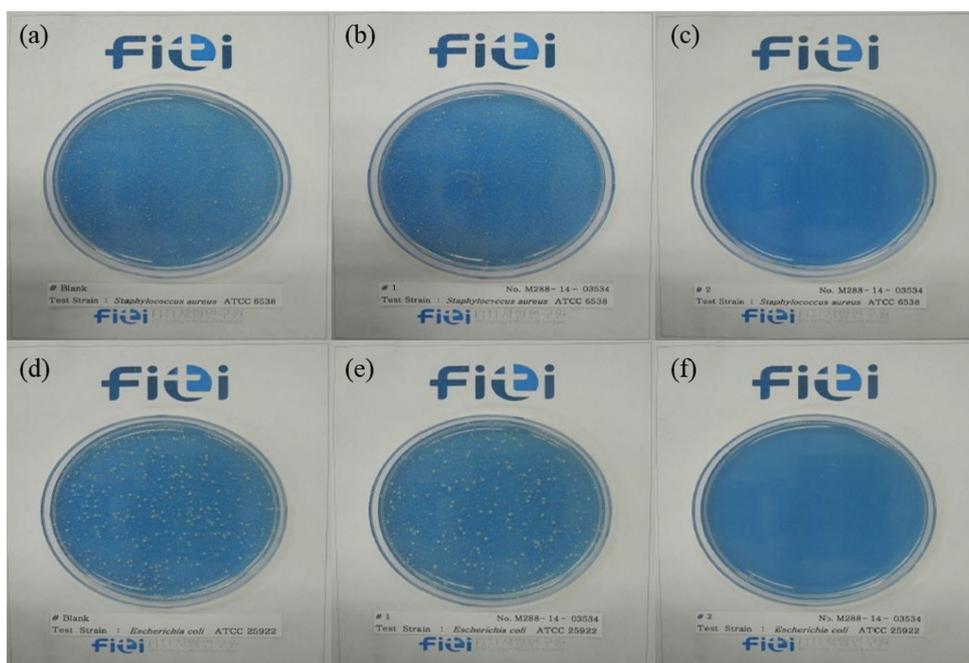


Fig. 1. Bacteria after cultivation of silver nano-particle coated artificial light-weight aggregates with bacteria for 24 hours: (a) Blank for *Staphylococcus aureus* (b) non-coated aggregates for *Staphylococcus aureus* (c) Silver nano-particle coated aggregates for *Staphylococcus aureus* (d) Blank for *Escherichia coli* (e) non-coated aggregates for *Escherichia coli*, and (f) Silver nano-particle coated aggregates for *Escherichia coli*.

	Non coating		Ag coating	
	Aggregates	Geopolymer	Aggregates	Geopolymer
Initial sample				
1 Month later				
2 Month later				
3 Month later				
5 Month later				

Fig. 2. Biofouling of artificial light-weight aggregates and geopolymer samples for 5 months.

바다에 설치한 샘플들의 생물오손 정도를 관찰한 사진이다. 은 나노 입자를 코팅한 시편과 코팅하지 않은 시편 모두 인공경량골재가 지오폐리머보다 월등하게 생물오손 정도가 낮게 나타났다. 따라서 지오폐리머쪽이 해양생물들이 서식하기 더 좋은 환경이라는 것을 알 수 있었는데 이는 지오폐리머의 화학성분 및 재질, 물리화학적 성질 등에 기인하는 것으로 추정된다. 은 나노 입자를 코팅하지 않은 시편의 생물오손은 주로 물미역 및 매우 작은 해양 미생물들에 의한 것이었으며, 특히 2개월 경과 후에는 생물오손이 급격하게 진행되었다. 은 나노 입자를 코팅한 시편의 생물오손은 마찬가지로 주로 물미역 및 매우 작은 해양 미생물들이 존재 하였지만 지오폐리머는 3개월, 인공경량골재는 5개월 이후부터 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3와 Fig. 4는 인공경량골재 및 지오폐리머의 생물오손 정도를 무게변화율로 측정된 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이, 1개월 경과 후(pH: 8.12, 수온: 25.8°C) 인공경량골재는 은 나노 입자를 코팅한 시편과 코팅하지 않은 시편 모두 무게 변화율 차이가 크게 발생하지 않았는데, 이는 생물오손이 매우 적었

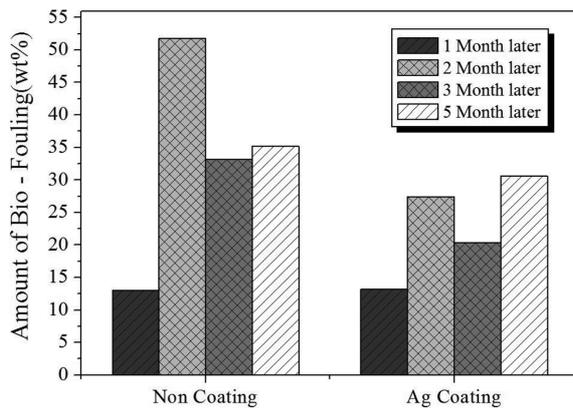


Fig. 3. Weight change rate of non-coated artificial light-weight aggregates and silver nano-particle coated artificial light-weight aggregates.

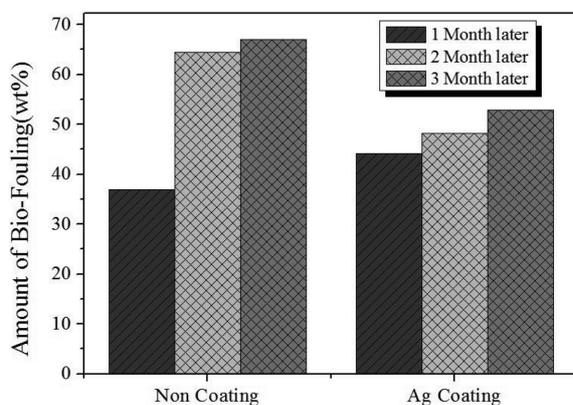


Fig. 4. Weight change rate of non-coated geopolymer and silver nano-particle coated geopolymer.

음을 알 수 있었고 Fig. 2를 통해서 확인할 수 있었다. 그에 비해, 지오폐리머의 경우 생물오손이 은 나노 입자를 코팅 시편 및 코팅하지 않은 시편 모두 비슷하게 발생하여 은 나노 입자의 효과를 확인할 수 없었다. 2개월 경과 후(pH: 8.542, 수온: 8.61°C) 인공경량골재의 무게 변화율은 은 나노 입자를 코팅한 시편 쪽이 코팅하지 않은 시편보다 훨씬 작게 나타났다. 이는 은 나노 입자의 효과와 더불어 수온이 급격히 떨어져서 나타난 결과로 보인다. 지오폐리머에서도 인공경량골재와 비슷한 경향을 나타내었는데 은 나노 입자를 코팅한 시편이 훨씬 적은 생물오손 정도를 보였다. 3개월 경과 후(pH: 8.28, 수온: 6.9°C) 인공경량골재의 경우 무게감소율이 2개월째보다 크게 감소하여 수온 저하 효과와 은 나노 입자 효과가 지속되고 있다는 것을 알 수 있었다. 지오폐리머의 경우 3개월째에는 코팅하지 않은 시편에 비해 무게 감소율이 감소하여 수온(6.9°C)이나 pH(8.28)의 영향을 받은 것을 알 수 있었으나 2개월째의 시편에 비해서는 무게 증가율이 증가하였으므로 은 나노 입자의 효과가 감소하였다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 지오폐리머는 3개월 경과 후부터 은 나노 입자를 코팅한 시편에서 생물오손이 발생한 결과와도 잘 일치하고 있다. 따라서 은 나노 입자가 코팅된 지오폐리머의 생물 오손 억제 효과는 약 3개월 정도 지속된다고 할 수 있겠다. 한편 5개월 경과 후(pH: 8.31, 수온: 8.76°C) 인공경량골재의 경우 은 나노 입자를 코팅한 시편과 코팅하지 않은 시편의 무게변화율은 비슷하게 나타났다. 이는 은 나노 입자가 은 이온의 용출뿐만 아니라 직접적으로 화학적, 물리적 반응 등으로 미생물 성장 억제 효과가 감소했기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 2의 시편 외관관찰 결과와도 잘 일치하고 있어서 인공경량골재에서 나노 입자 혹은 은 이온들이 생물오손 억제 지속기간은 약 5개월 미만이라고 판단된다[6]. 해상 및 가두리 양식장의 오염 및 유해 조류 제거 장치에 적용되는 정화용 폰툰 시스템은 주로 적조 조류에 의한 수산 동, 식물들의 폐사를 방지하는데, 적조 조류의 발생 기간은 4~5개월이고, 주로 7~9월에 가장 많이 발생한다. 효율적으로 폰툰 시스템을 이용해 유해 조류를 제거 하기 위해서 폰툰 시스템 내의 ML의 경우 5개월 이상의 생물오손 억제 기간이 요구되고, ML은 카트리지 방식으로 교환이 가능하다. 따라서, 은 나노 입자를 코팅한 인공경량골재는 폰툰 시스템에서 생물오손을 효과적으로 제어할 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

4. 결 론

해상 가두리 양식장 내의 유해 조류로 인한 수산 동,

식물들의 폐사를 방지하고, 양식장의 주기적인 정화를 위한 폰툰 시스템 내의 ML의 생물오손을 방지하기 위하여 본 논문에서는 ML 내의 인공경량골재에 은 나노 입자를 코팅하여 생물오손 정도를 확인하였다. 생물오손 관찰 결과, 지오폐리머의 경우 은 나노 입자 코팅 유무와 관계 없이 인공경량골재보다 높은 무게 변화율을 보였다. 이는 지오폐리머의 화학성분 및 재질, 물리화학적 성질 등이 해양생물의 부착 및 번식을 하는데 더 좋은 환경을 조성함을 알 수 있었다. 2~3개월 이후 발생하는 생물오손에 대하여 은 나노 입자 코팅 시편에서 높은 억제력을 보이기 시작하였다. 은 나노 입자를 코팅한 지오폐리머의 경우 3개월 후, 인공경량골재의 경우 5개월 경과 후 생물오손 억제 능력은 매우 낮았다. 이는, 은 나노 입자가 코팅된 시편들의 생물 억제 지속기간이라고 판단 된다. 따라서, 생물오손을 억제하기 위한 중금속이 포함된 방오 도료에 비해, 친환경적인 은 나노 입자 코팅 방법이 폰툰 시스템 내의 ML에 적용되는 인공경량골재에 미생물의 번식 능력을 크게 저하시켜 생물오손을 훌륭하게 억제할 수 있는 방법임을 알 수 있었다. 본 연구에서는 매우 낮은 수온으로 인해 미생물의 활동도가 매우 낮아, 미생물 활동도가 높은 시기보다 생물오손 정도가 매우 낮았음에도 은 나노 입자가 코팅된 인공경량골재의 미생물 억제 능력을 확실하게 확인할 수 있었다

감사의 글

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

References

- [1] S.I. Park, Y.M. Lee, W.G. Koh, J.W. Ha and S.Y. Lee, "Study on anti-biofouling properties of the surfaces treated with perfluoropolyether (PEPE)", *Appl. Chem. Eng.* 23 (2012) 71.
- [2] S.H. Cho, S.N. Ryu, W.B. Hwang and B.S. Yoon, "Anti-fouling property of hydrophobic surfaces in sea water", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. & Energy* 16 (2013) 82.
- [3] S. Hashimoto, M. Watanabe, Y. Noda, T. Hayashi, Y. Kurita, Y. Takasu and A. Otsuki, "Concentration and distribution of butyltin compounds in a heavy tanker route in the strait of malacca and in Tokyo bay", *Mar. Environ. Res.* 45 (1998) 169.
- [4] S.Y. Jeong, H.J. Son and N.H. Jeoung, "Isolation and degradation activity of a TBTCI (tributyltin chloride) resistant bacterium in Gwangyang bay", *Korean J. Environ Agric.* 30 (2011) 424.
- [5] W.R. Li, X.B. Xie, Q.S. Shi, H.Y. Zeng, Y.S. Yang and Y.B. Chen, "Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli*", *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 85 (2010) 1115.
- [6] I.S. Hwang, J.Y. Cho, J.H. Hwang, B.M. Hwang, H.M. Choi, J.Y. Lee and D.G. Lee, "Antimicrobial effects and mechanism(s) of silver nanoparticle", *Korean J. Microbiol. Biotechnol.* 39 (2011) 1.
- [7] K. Chaloupka, Y. Malam and A.M. Seifalian, "Nanosilver as a new generation of nanoparticle in biomedical applications", *Trends in Biotechnology* 28 (2010) 580.
- [8] J.Y. Kim, T.Y. Kim and J.Y. Yoon, "Antimicrobial activity and mechanism of silver", *J. Korean Ind. Eng. Chem.* 20 (2009) 251.
- [9] K.J. Kim, W.S. Sung, S.K. Moon, J.S. Choi, J.G. Kim and D.G. Lee, "Antifungal effect of silver nanoparticles on dermatophytes", *J. Microbiol. Biotechnol.* 19 (2008) 1482.
- [10] H.S. Park, M.S. Ko and J.U. Lee, "Adsorption and redox state alteration of arsenic, chromium and uranium by bacterial extracellular polymeric substances (EPS)", *Econ. Environ. Geol.* 43 (2010) 223.
- [11] S.H. Cho, B.S. Yoon, S.N. Ryu and W.B. Hwang, "A study on anti-fouling property of super-hydrophobic surfaces in sea water", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. & Energy* 16 (2013) 82.
- [12] Y.S. Kim and S.G. Kang, "Characterization of geopolymer made of municipal solid waste incineration ash slag", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 24 (2014) 15.
- [13] S.N. Jo and S.G. Gang, "Properties of artificial aggregates of coal bottom ash-dredged soil system added with waste glass", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 23 (2013) 146.