Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 22, No. 6 pp. 11-18, 2021

https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.6.11
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

초미세기포를 이용한 해양쓰레기 표면 내 염분제거에 관한 연구

김보민, 김광구, 박찬규*
한국산업기술시험원 환경기술본부

A Study of the Salt Rejection from the Surface of Marine Waste using Ultra Fine Bubble

Bo-Min Kim, Kwang-Koo Kim, Chan-Gyu Park*
Division of Environmental Technology, Korea Testing Laboratory

요 약 나노버블수는 태양광 패널 청소, 도로의 염분 제거, 기계의 정밀 부품 청소 등 다양한 세척 공정에 사용된다. 해양쓰레기 세척 시스템의 전처리에 나노버블을 적용하면 높은 세척 효율과 물 절약이 가능하다. 본 연구에서는 나노버블수의 염분 제거율을 비교하기 위해 NaCl 200,000 mg/L 용액에 목재를 침적시켜 해양쓰레기를 제작하였다. 수돗물과 나노버블수를 이용하여 노즐 종류, 오리피스 직경, 펌프 회전수 및 세척 시간에 따른 목재 표면 염분농도를 비교하였다. 목재 표면 염분농도는 세척시간이 길어질수록 감소하였다. 하지만 물 사용량을 고려한 최적의 세척 시간은 5-10초 사이였다. 노즐의 오리피스 직경이 커질수록 분사압력은 낮아지며, 세척 후 목재 표면 염분농도는 높아졌다. 이는 노즐의 오리피스 직경이 세척 시스템에서 중요한 요인임을 나타낸다. 나노버블수를 이용한 세척 후 목재 표면 염분농도는 수돗물로 세척 후 목재 표면 염분농도에 비해 부채꼴형 노즐은 2.2 %, 원형 노즐은 30.9 % 낮았다. 또한, 나노버블수를 이용한 세척 실험에서 부채꼴형 노즐을 사용하여 세척하였을 때가 원형 노즐을 사용하였을 때보다 목재 표면 염분농도가 약 9.5 mg/L 낮았다.

Abstract Nano bubble water is used in various washing processes, including cleaning of solar panels, salt rejection of roads, and cleaning precision parts of machines. High cleaning efficiency and water conservation are obtained by applying nano bubbles during pretreatment of the marine waste cleaning system. This study compared the salt rejection of nano bubble water, and it was revealed that marine waste was produced by wood immersed in 200,000 mg/L NaCl solution. Using tap water and nano bubble water for washing, comparisons of the surface salt concentrations of wood were determined according to the nozzle, orifice diameter, pump speed and washing time. Decreased surface salt concentration was observed on the wood surface with increasing washing time. Water consumption was optimal between 5- and 10-seconds washing time. Increasing orifice diameter of the nozzle reduced the spraying pressure, with consequent increase in the wood surface salt concentration, thereby establishing the importance of orifice diameter of the nozzle. Compared to levels obtained with tap water, salt concentration of the wood surface after washing with nano bubble water was 2.2% lower with sector nozzle, and 30.9% lower with circular nozzle. In the washing experiment using nano bubble water, the salt concentration on the wood surface was about 9.5 mg/L lower when washed with sector nozzle than the circular nozzle.

Keywords : Nano Bubble, Marine Waste, NaCl, Sector Nozzle, Circular Nozzle

본 논문은 해양수산부 "해양플라스틱 쓰레기저감을 위한 기술개발"사업(20200584)의 연구과제로 수행되었음.
*Corresponding Author : Chan-Gyu Park(Korea Testing Laboratory)
email: parkcg@ktl.re.kr
Received February 25, 2021 Revised April 14, 2021
Accepted June 4, 2021 Published June 30, 2021

1. 서론

해양쓰레기는 인간의 해양 활동에 의해 직접적 또는 간접적으로 발생하거나 육지쓰레기가 강과 하천을 통해 바다로 유입되어 발생한다. 바다로 유입된 해양쓰레기는 조류에 따라 이동하여 국가 간 경계를 넘나들거나 해저에 침적되기도 한다. 해양쓰레기는 해양생태계를 파괴시켜 해양생물들에게 악영향을 미치며 결국 어업생산량을 저하시킬 수 있다. 또한 선박사고의 원인 중 10분의 1이 해양쓰레기로부터 기인하며, 해양지역의 관광 및 레저 활동에 피해를 주기 때문에 경제적인 손실이 발생한다.

따라서 국제사회는 해양쓰레기 문제를 중요한 현안으로 인식하고 다양한 국제 규범을 마련하고 있다. 유엔환경계획은 해양플라스틱 폐기물을 지구적 환경문제로 선정하였고, 유엔환경총회는 세 차례의 '해양폐기물 대응 결의안'을 의결하였다. 우리나라 또한 해양쓰레기를 저감하기 위해 국가 차원의 해양쓰레기 저감 및 관리에 대한 법적 근거를 마련하는 등 다양한 정책을 추진하고 있다. 2009년부터는 유관기관 합동으로 5년 단위의 '해양쓰레기 관리 기본계획'을 수립 및 시행 중에 있다[1].

해양쓰레기를 자체를 저감하는 것도 중요하지만, 발생된 해양쓰레기의 적절한 처리 또한 중요하다[3]. 수거된 해양쓰레기는 육지쓰레기에 비해 염분 농도 및 오염 정도가 높으며, 수거된 후 적절한 처리를 하지 않을 경우 시간이 지나며 부패하는 생물의 사체로 인해 해양쓰레기 자체의 질적 저하를 유발하며, 벌과 같은 이물질들의 고화로 인해 처리를 위한 약품비용이 증가할 수 있다. 해양쓰레기에 존재하는 생물의 사체가 부패하거나, 오염물질의 고화로 인해 해양쓰레기의 처리와 재활용 및 재이용이 어려워 질 수 있다. 해양쓰레기 소각 시 해양쓰레기의 Cl^-로 인해 다이옥신 발생량이 증가하여 암발생률을 증가시키고 호르몬 조절 장애를 유발한다. 또한, 다량의 미세먼지가 발생으로 폐질환 및 심혈관 질환을 일으킨다. 해양쓰레기 매립 시 염분으로 인한 나트륨성 토양 발생으로 토양의 질적 저하를 유발하며, 토양오염으로 인해 농작물의 생육을 저해한다[2,6].

나노버블수는 기포 직경이 0.1 ㎛ 이하이며, 1 mm 크기의 일반 기포에 비해 나노버블의 접촉 면적은 10,000 배 크다. 일반적인 기포는 물속에서 상승하여 표면에서 파열하지만 나노버블은 수중에서 축소하여 완전 용해된다. 따라서 나노버블이 축소하며 용해될 때 내부순간압력은 약 500 기압, 순간온도는 약 4-5,000 ℃로 상승한다. 또한, 표면장력에 의해 축소되는 나노버블은 높아지는 내부압력과 나노버블이 원상태로 되기 위한 힘에 의해 파열이 발생되면서 약 40 Hz의 초음파가 발생하고, 나노버블의 이러한 작용들로 인해 오염물질의 세척 효율이 증가하게 된다. 따라서 흡착부상, 살균 및 세정, 방사능 세슘 물질 흡착제거, 태양광 판넬 세척, 도로 콘크리트 염분세척, 기계 정밀부품 세척 등 다양한 세척분야에서 이용된다. 나노버블의 높은 세척 효과로 인해 적은 물 사용량으로도 높은 세척 효율을 얻을 수 있으며, 물 사용량이 제한된 세척 공정에서의 이용이 증가하고 있다[4,5,7-11].

따라서 본 연구의 목적은 수돗물과 나노버블수를 이용해 해양쓰레기의 세척 효과를 여러 조건에서의 실험을 통해 비교하는 것이며, 이를 통해 나노버블수의 세척효율을 검증하고 최적의 세척 시간을 도출하는 것이다.

2. 장치 및 방법

본 연구에서는 나노버블수가 해양쓰레기의 염분제거에 미치는 영향을 비교하기 위해 목재를 해양쓰레기로 선정하였으며, 각각의 조건에 따라 세척 후 목재 표면 염분농도를 극명하게 비교하기 위해 NaCl 200,000 mg/L에 목재를 24시간 침적시켜 해양쓰레기를 제작하였다. 부채꼴형 노즐과 원형 노즐을 사용하여 나노버블수가 목재 표면 염분 제거에 미치는 영향을 비교하였다. 실험 조건은 Table 1과 같으며, 각 노즐의 오리피스 직경, 펌프 회전수, 세척 시간에 따라 실험을 진행하였다.

Table 1. Experimental conditions

Water type	Nozzle	Orifice diameter(O.D.)(mm)	Pump speed(rpm)	Washing time(sec)
Tap water(T.W.)	Circular	1.0 1.2 1.5	830 1250 1670	5 10 15
Nano bubble Water(N.W.)	sector	1.3 1.4 1.5		

2.1 실험장치

노즐 세척 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였으며, 세척수 탱크의 세척수를 펌프를 이용해 노즐로 분사하여 목재를 세척하였다. 해양쓰레기 중 두 번째로 많은 무게를 차지하는 목재를 선정하여 실험을 진행하였으며, 목재는 합판을 250×150×4 mm의 규격으로 절단하여 사용하였다. 동일한 규격의 해양쓰레기를 통해 동일한 조건에서 실험을 진행할 수 있도록 하였다. Cole-Parmer® Consol Drive의 기어펌프를 사용하였으며 830, 1250, 1670 rpm 조건에서 실험을 진행하였다. 부채꼴형 노즐과 원형 노즐을 사용하여 세척을 진행하였으며, 부채꼴형 노즐의 오리피스 직경은 1.3, 1.4, 1.5 mm이며 원형 노즐의 오리피스 직경은 1.0, 1.2, 1.5 mm이다. 목재의 세척 시간은 5, 10, 15초이며 각 세척 시간별 세척 후의 목재 표면 염분농도를 비교하였다. 나노버블 발생장치는 한국산업기술시험원의 설계도면을 바탕으로 ㈜지티엔에서 제작하였으며, 약 1억 개/cycle의 나노버블을 생산할 수 있다.

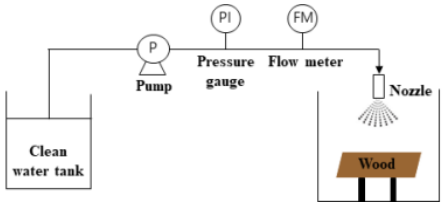

Fig. 1. Schematic diagram of washing system

2.2 분석방법

Elcometer®의 Elcometer 130을 이용하여 세척 후 목재 표면 염분농도를 측정하였다. 세척이 완료된 목재를 자연건조 시킨 후 표면 염분농도를 측정하였다. Filter paper에 1.6 ml의 증류수를 흡수시킨 후 세척이 완료된 목재 표면에 2분간 흡착시켜 염분을 흡수한 후, Elcometer 130을 사용하여 Filter paper의 염분농도를 ppm 단위로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 나노버블의 버블 크기 측정

제작된 나노버블 발생장치로부터 제조된 나노버블의 크기 분포도를 측정하였다. 나노버블 입자추적법을 통해 나노버블의 입경을 측정하였으며, 이 방법은 1 ㎛-10 ㎚ 직경크기의 미세기포를 측정하는 방법이다. 입자에 레이저 광을 조사했을 때의 산란광에 의해 입자의 움직임을 시각화하고, 그 입자의 브라운 운동의 속도에서 스톡 아인슈타인식에 의해 입경을 측정한다. Malvern사(영국)에서 제조한 NanoSight NS300을 통해 나노버블의 입경을 측정하였으며, 10번의 측정을 통해 장치의 신뢰성을 판단하였다. 측정 결과는 Fig 2에 나타내었으며, 나노버블의 평균 크기는 165.43 ㎚, 평균 기포 개수는 53,540,000 개/ml로 나타났다. 따라서 제작한 나노버블 발생장치를 통해 나노버블의 생성이 정상적으로 이루어지는 것을 확인하였다.

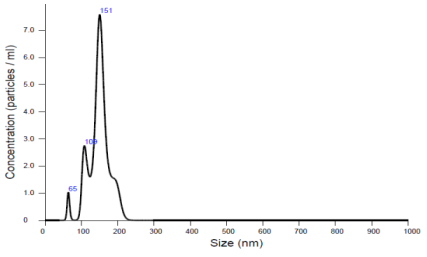

Fig. 2. Measurement of the bubble size of nano bubble

3.2 펌프 회전수, 노즐의 종류, 오리피스 직경에 따른 세척이 완료된 목재 표면 염분농도 변화

목재 표면의 염분 제거는 분사압력과 유량이 중요하다. 이는 펌프 회전수, 노즐의 종류, 오리피스 직경에 의해 영향을 받는다. 펌프의 회전수가 증가할수록 노즐의 분사압력과 유량은 증가한다. 하지만 펌프 회전수와 유량은 비례해서 증가하지 않기 때문에 높은 분사압력과 높은 유량을 얻기 위한 오리피스 직경을 적절히 선택하여야 한다. 따라서 실제 세척 공정에선 해양쓰레기의 오염정도에 따라 적절한 분사압력, 유량, 오리피스 직경을 선택하는 것이 중요하다.

Fig. 3은 수돗물을 이용한 실험의 세척 후의 목재 표면 염분농도를 펌프 회전수, 노즐 종류, 오리피스 직경에 따라 나타낸 그래프이다. 펌프의 회전수가 증가할수록 목재 표면 염분농도는 낮아졌고, 이는 분사 압력과 유량이 염분제거에 중요함을 시사한다. 오리피스 직경이 커질수록 노즐의 분사 압력이 낮아지기 때문에 염분제거율은 낮아졌다. 또한, 부채꼴형 노즐이 원형 노즐에 비해 염분제거율이 높은 것을 확인하였다. 이는 부채꼴형 노즐의 충격력 효율이 원형노즐에 비해 높기 때문에 비슷한 분사 압력에도 높은 염분 제거 효율을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

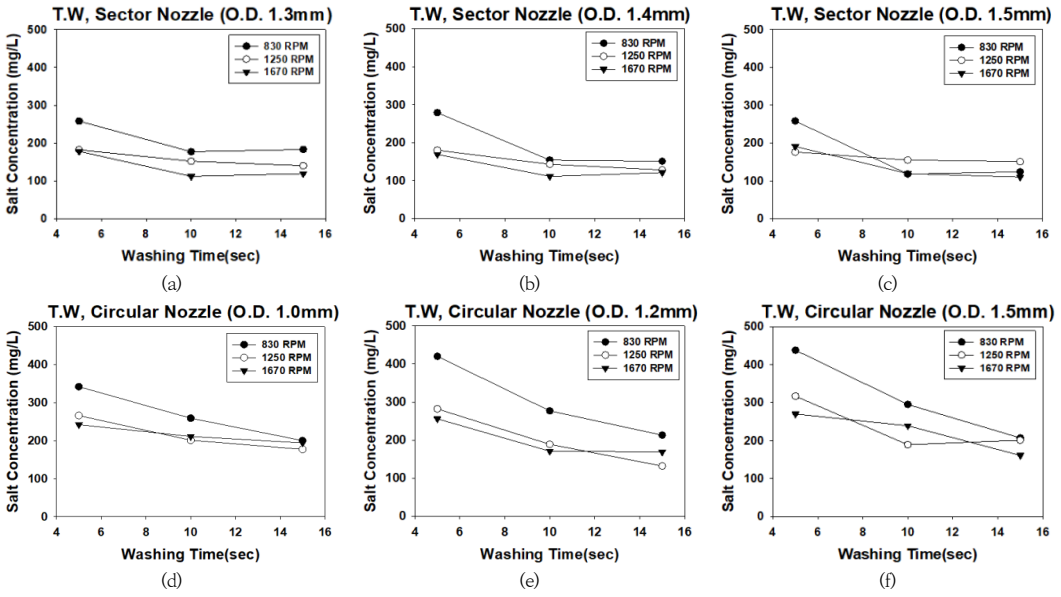

Fig. 3. Salt concentration on wood surface using tap water. (a) sectors nozzle, orifice diameter 1.3mm, (b) sectors nozzle, orifice diameter 1.4mm, (c) sectors nozzle, orifice diameter 1.3mm, (d) circular nozzle, orifice diameter 1.0mm, (e) circular nozzle, orifice diameter 1.2mm, (f) circular nozzle, orifice diameter 1.5mm.

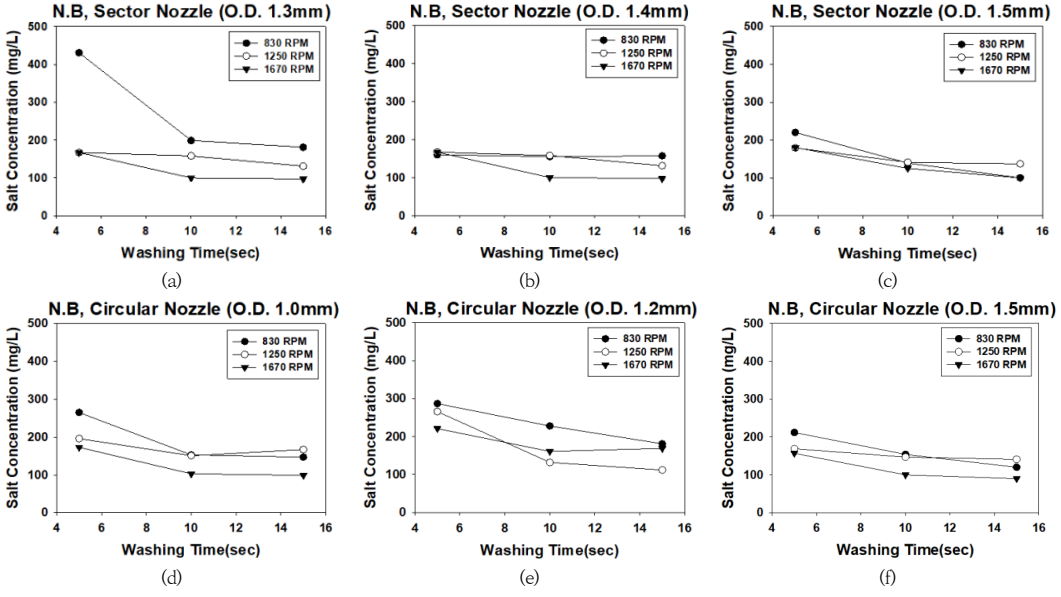

Fig. 4. Salt concentration on wood surface using nano bubble water. (a) sectors nozzle, orifice diameter 1.3mm, (b) sectors nozzle, orifice diameter 1.4mm, (c) sectors nozzle, orifice diameter 1.3mm, (d) circular nozzle, orifice diameter 1.0mm, (e) circular nozzle, orifice diameter 1.2mm, (f) circular nozzle, orifice diameter 1.5mm.

수돗물을 이용한 실험에서 5-10초 구간의 염분농도 감소량은 평균 29.7 %이며, 10-15초 구간의 염분농도 감소량은 8.9 %로 나타났다. 세척 시간이 증가함에 따라 목재 표면 염분농도가 감소하는 경향을 나타냈지만 5-10초 구간의 염분 감소량이 10-15초 구간의 염분 감소량보다 높았으며, 이는 세척 시간이 길어질수록 염분 제거율은 높아질 수 있으나 물 사용량 대비 염분 제거효율은 낮아지는 것을 의미한다.

Fig. 4는 나노버블수를 이용한 실험의 세척 후의 목재 표면 염분농도를 펌프 회전수에 따라 나타낸 그래프이다. 수돗물을 이용한 실험과 마찬가지로 세척 시간이 길어질수록, 펌프 회전수가 높아질수록 세척이 완료된 목재의 표면 염분농도가 감소하는 경향을 나타냈으며, 오리피스 직경이 커질수록 목재의 표면 염분농도는 증가하였다. 또한, 부채꼴형 노즐이 원형 노즐보다 염분 제거율이 높았다.

5-10초 구간의 염분농도 감소량은 28.7 %이며, 10-15초 구간의 염분농도 감소량은 9.1 %로 나타났다. 5-10초 구간의 염분 감소량이 10-15초 구간의 염분 감소량보다 높게 나타났으며, 이는 세척시간이 길어질수록 물 사용량 대비 세척 효율이 낮아지는 것을 의미한다.

3.3 수돗물과 나노버블수의 세척이 완료된 목재 표면 염분농도 비교

Fig. 5는 부채꼴 노즐의 수돗물과 나노버블수의 목재

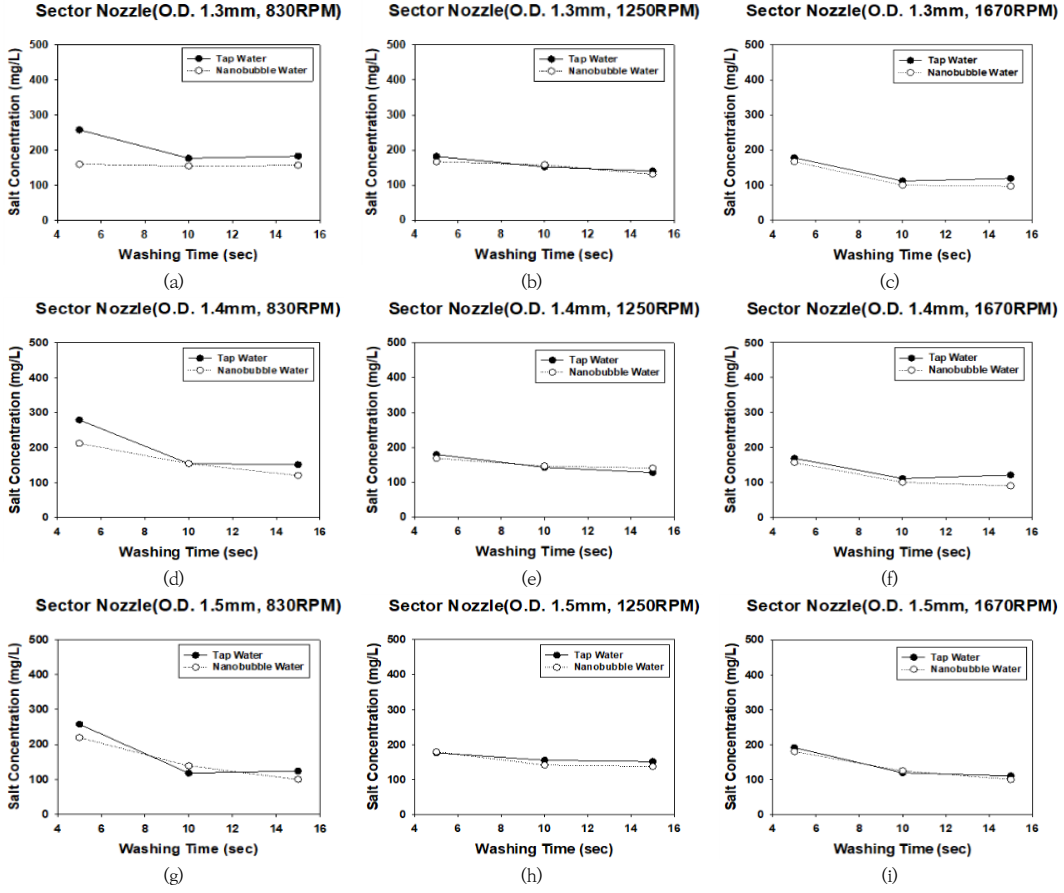

Fig. 5. Comparison of the concentration of tap water and nano bubble water on the wood surface of sectors nozzle (a) orifice diameter 1.3mm, pump speed 830rpm, (b) orifice diameter 1.3mm, pump speed 1250rpm, (c) orifice diameter 1.3mm, pump speed 1670rpm, (d) orifice diameter 1.4mm, pump speed 830rpm, (e) orifice diameter 1.4mm, pump speed 1250rpm, (f) orifice diameter 1.4mm, pump speed 1670rpm, (g) orifice diameter 1.5mm, pump speed 830rpm, (h) orifice diameter 1.5mm, pump speed 1250rpm, (i) orifice diameter 1.5mm, pump speed 1670rpm.

표면 염분농도를 나타낸 그래프이다. 수돗물을 이용하여 세척하였을 때와 나노버블수를 이용하여 세척한 후의 목재 표면 염분농도는 대체로 나노버블수를 이용한 세척방법이 더 낮게 나온 것을 확인하였다. 부채꼴형 노즐의 실험에서 나노버블을 이용하였을 때가 그렇지 않을 때보다 목재 표면 염분농도가 약 2.2 % 낮은 것을 확인하였다.

Fig. 6은 원형 노즐의 수돗물과 나노버블수의 세척 후의 목재 표면 염분농도를 나타낸 그래프이며, 나노버블수를 이용하여 세척하였을 때의 염분제거 효과가 수돗물을 이용하여 세척하였을 때보다 높은 경향을 확인할 수 있다. 원형 노즐의 실험에서 나노버블을 이용하여 세척하였을 때가 그렇지 않을 때보다 목재 표면 염분농도가 약 31 % 더 낮았다.

부채꼴형 노즐과 원형 노즐 모두 나노버블수를 이용하여 세척할 때가 수돗물을 사용하여 세척하였을 때보다 세척력이 더 높으며, 해양쓰레기 세척 시 나노버블을 이용하면 물 사용량 대비 더 높은 세척 효율을 얻을 수 있음을 의미한다[12,13].

3.4 부채꼴형 노즐과 원형 노즐의 세척이 완료된 목재 표면 염분농도 비교

나노버블수를 이용하여 세척 후 목재의 표면 염분 농도를 Fig. 7과 같이 원형 노즐과 부채꼴 노즐로 나누어 비교하였다. 펌프 회전수를 높여서 분사압력을 높일수록

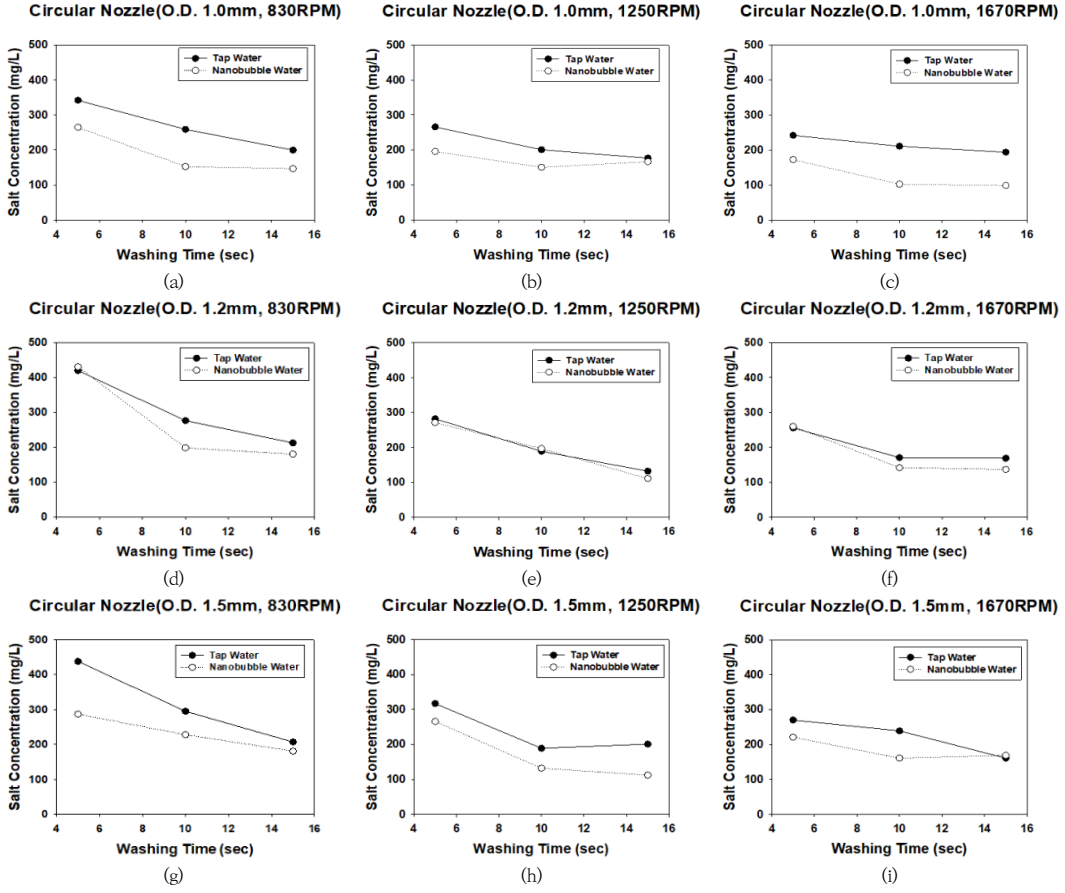

Fig. 6. Comparison of the concentration of tap water and nano bubble water on the wood surface of circular nozzle (a) orifice diameter 1.3mm, pump speed 830rpm, (b) orifice diameter 1.3mm, pump speed 1250rpm, (c) orifice diameter 1.3mm, pump speed 1670rpm, (d) orifice diameter 1.4mm, pump speed 830rpm, (e) orifice diameter 1.4mm, pump speed 1250rpm, (f) orifice diameter 1.4mm, pump speed 1670rpm, (g) orifice diameter 1.5mm, pump speed 830rpm, (h) orifice diameter 1.5mm, pump speed 1250rpm, (i) orifice diameter 1.5mm, pump speed 1670rpm.

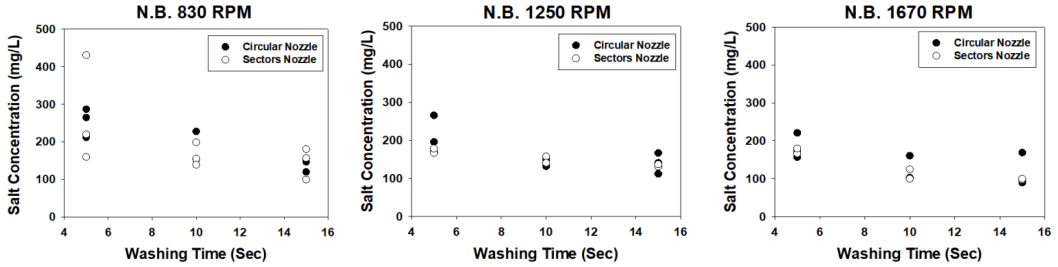

Fig. 7. Comparison of the concentration on the wood surface of circular nozzle and sectors nozzle after washing using nano bubble water (a) pump speed 830rpm, (b) pump speed 1250rpm, (c) pump speed 1670rpm.

세척 후 목재 표면 염분농도는 감소하였으며, 부채꼴형 노즐이 원형 노즐에 비해 세척 후 목재 표면 염분농도 평균은 약 9.5 mg/L 낮았다. 부채꼴형 노즐의 충격력 효율은 90-95 %이며 원형 노즐의 충격력 효율은 약 50-85 %이며 충격력이 높은 부채꼴형 노즐이 충격력이 낮은 원형 노즐에 비해 세척효율이 높은 경향을 보였다. 따라서 분사압력과 노즐의 충격력이 목재 표면의 염분제거에 크게 영향을 미친다고 판단된다.

3.5 노즐 분사압력을 고려한 최적 세척시간

수돗물과 나노버블수의 5-10초 구간의 목재 표면 염분농도 감소량은 각각 29.7 %, 28.7 %이며, 10-15초 구간의 목재 표면 염분농도 감소량은 8.9 %, 9.1 %로 나타났다. 세척시간이 증가할수록 목재 표면 염분농도는 감소하지만, 5-10초 구간에 비해 10-15초 구간의 목재 표면 염분농도 감소량은 낮아졌다. 따라서 세척시간이 증가할수록 목재 표면의 염분은 제거가 되나, 물 사용량 대비 비효율적인 세척이 이루어지는 것을 나타낸다.

따라서 물 사용이 제한된 곳에서 노즐의 분사 압력이 3 bar 이하이며 해양쓰레기의 NaCl만을 제거 할 때, 물 사용량을 고려한 최적 세척시간은 5-10초임을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 세척수, 노즐, 오리피스 직경, 펌프 회전수, 세척시간에 따라 세척 후 목재 표면 염분농도를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수돗물과 나노버블수를 이용하여 세척하였을 때 모두 세척 시간이 증가할수록 목재 표면 염분농도가 감소하지만 물 사용량을 고려했을 때의 해양쓰레기의 최적 세척 시간은 5-10초 구간이다.
2. 노즐의 오리피스 직경이 커질수록 분사 압력은 낮아지며, 세척 후 목재 표면 염분농도는 높아졌다. 이는 노즐의 오리피스 직경이 세척력에 중요한 요인임을 나타내며, 해양쓰레기의 크기, 오염정도 등을 고려하여 적절한 오리피스 직경의 노즐을 선택하는 것이 필요하다.
3. 수돗물보다 나노버블수를 이용하여 세척 시 목재 표면 염분농도가 부채꼴형 노즐이 약 2.2 %, 원형 노즐이 약 30.9 % 낮았으며, 이는 나노버블수의 염분제거 효과가 수돗물보다 높음을 시사한다.
4. 나노버블수를 이용하여 세척한 실험에서 세척 후 목재 표면 염분농도는 원형 노즐보다 부채꼴형 노즐이 약 9.5 mg/L 낮아 염분 제거에 더 높은 효과를 나타냈다. 이는 부채꼴형 노즐의 충격력이 원형 노즐의 충격력보다 높기 때문으로 판단된다.

References

[1] F. Ronkay, B. Molnar, D. Gere, T. Gzigany, "Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies", *Waste Management*, Vol.119, pp.101-110, 2020.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.029

[2] K. J. Song, S. H. Han, T. J. Ha, "Changes of physiological properties of zelkova serrata to NaCl concentration in soil", *Journal of Korea Society of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.5, No.3, pp.166-171, 2003.

[3] Y. J. Kim, S. G. Han, D. H. Hwang, D. H. Lee, S. H.

Kwon, H. J. Kim, "Physical composition and salt removal characteristics from coastal wastes", *Journal of Korean Society of Urban Environment*, Vol.16, pp.97-103, 2018.

[4] H. E. Choi, J. H. Jung, Y. L. Han, D. Y. Kim, B. G. Jung, Y. I. Choi, "A study on the treatment of oil contaminated soils with micro-nano bubbles soil washing system", *Journal of Environmental Sciences*, Vol.20, pp.1329-1336, 2011.
DOI: https://doi.org/10.5322/jes.2011.20.10.1329

[5] J. H. Lee, S. H. Park, "A study on the rotating jet nozzle for washing sand filter in water purification plant", *Journal of Korea Safety Management and Science*, Vol.4, No.3, pp.177-187, 2002.

[6] S. G. Seo, S. H. Lee, J. H. Sohn, Y. Y. Jang, "Application of a full scale soil washing process for the remediation of contaminated soil around an abandoned mine", *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, Vol.13, No.2, pp.70-75, 2008.

[7] H. Chu, R. Khang, Y. Qi, Z. Kan, "Simulation and experimental test of waterless washing nozzles for fresh apricot", *Biosystems Engineering*, Vol.159, pp.97-108, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.001

[8] D. Tao, Z. Wu, A. Sobhy, "Investigation of nanobubble enhanced reverse anionic flotation of hematite and associated mechanisms", *Powder Technology*, Vol.379, pp.12-25, 2021.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.040

[9] N. Tamura, A. Kaneko, S. I. Uesawa, M. Ike, "Development of non-chemical micro-bubble washing technology using a venturi tube", *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol.27, No.5, pp.577-584, 2014.
DOI: https://doi.org/10.3811/jjmf.27.577

[10] N. Ahmed, G. J. Jameson, "The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles", *International Journal of Mineral Processing*, Vol.14, No.3, pp.195-215, 1985.
DOI: https://doi.org/10.1016/0301-7516(85)90003-1

[11] F. A. N. Maoming, T. A. O. Daniel, R. Honaker, L. U. O. Zhenfu, "Nanobubble generation and its application in froth flotation (Part I): nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions", *Mining Science and Technology (China)*, Vol.20, No.1, pp.1-19, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1016/s1674-5264(09)60154-x

[12] H. N. P. Dayarathne, J. W. Choi, A. Jang, "Enhancement of cleaning-in-place (CIP) of a reverse osmosis desalination process with air micro-nano bubbles", *Desalination*, Vol.422, pp.1-4, 2017.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.002

[13] A. Ushida, T. Hasegawa, N. Takahashi, T. Nakajima, S. Murao, T. Narumi, H. Uchiyama, "Effect of mixed nanobubble and microbubble liquids on the washing rate of cloth in an alternating flow", *Journal of Surfactants and Detergents*, Vol.15, No.6, pp.695-702, 2012.
DOI: https://doi.org/10.1007/s11743-012-1348-x

김 보 민(Bo-Min Kim) [정회원]

- 2020년 2월 : 국민대학교 환경공학과 (석사)
- 2020년 10월 ~ 현재 : 한국산업기술시험원 연구원

〈관심분야〉
환경공학

김 광 구(Kwang-Koo Kim) [정회원]

- 1999년 8월 ~ 2000년 4월 : 한국지질자원연구소
- 2015년 2월 : 부산대학교 지질환경과학과 (박사)
- 2000년 5월 ~ 현재 : 한국산업기술시험원 수석연구원

〈관심분야〉
환경공학

박 찬 규(Chan-Gyu Park) [정회원]

- 2009년 1월 ~ 2009년 12월 : 국립환경과학원 전문위원
- 2010년 2월 : 연세대학교 토목환경공학 (박사)
- 2010년 1월 ~ 2010년 10월 : 한국과학기술연구원 Post-Doc.
- 2010년 11월 ~ 현재 : 한국산업기술시험원 책임연구원

〈관심분야〉
환경공학