

기포를 이용한 미세 부유 폴리에틸렌 입자 포획에 대한 연구

최진용* · 박형민*,†

Study of capturing micro-sized floating polyethylene particles using a bubble

Jinyong Choi* and Hyungmin Park*,†

Abstract Underwater environmental pollution caused by microplastic particles is considered to be one of the most serious problems in many oceans and countries nearby. Previous academic studies or field technologies tried to remove the micro-sized particles are often energy-consuming and costly, so it is hard to be employed for the actual uses. In this study, the mechanism of removal of micro-sized polyethylene spheres (size in order of 100 μm) using a rising bubble is experimentally investigated. It is found that the particles are either affected by bubble wake, thus translocated close to the water surface, or pushed far away by the surrounding fluid flow, depending on their initial position relative to the bubble. By scrutinizing the visualized behaviors of bubble-particle interaction, we draw the governing parameter, i.e., the polar angle between the particle and the bubble, to determine the effective capturing of the particles with a rising bubble.

Key Words : Bubble(기포), Bubble-particle interaction(기포-입자 상호작용), Shadowgraphy(Fig. 촬영기법), Marine pollution(해양오염)

기호설명

f_s : 물의 부피에 대한 계면활성제의 부피 비
 f_p : 물의 부피에 대한 입자의 부피 비
 D_{eq} : 기포의 등가 직경(equivalent diameter)
 d : 기포 중심에서부터 입자까지의 거리(mm)
 q : 기포 상승방향 축에 대한 입자의 지름이 이루는 각도(polar angle)

1 서론

작게는 수 μm 에서 크게는 수 mm의 크기를 가지는 플라스틱 쓰레기 조각을 의미하는 미세 플라스틱(microplastics)은 전 세계의 다양한 국가 및 대양에 심각한 환경 문제를 야기하고 있다. 배출 또는 무단 방류된 플라스틱 쓰레기는 자연적으로 완전히 분해되지는 않지만 여러 물리적, 화학적, 그리고 생물학적 요인들에 의해 더욱 작은 입자로 쪼개지게 되어 5 mm 이하의 크기를 가지는 미세플라스틱 조각이 되는데, 이는 플라스틱 쓰레기가 생태계에 축적되기는 쉬워지지만 이를 수거 및 제거하는 과정은 더욱 어려워지도록 만든다. 대양에 방출된 미세플라스틱 조각들은 환류를 타고 먼바다에 부유하거

† Department of Mechanical Engineering,
Seoul National University, Professor
E-mail: hminpark@snu.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering,
Seoul National University, MS student

나 수면 밑으로 퍼지게 되는데, 먼바다에 퍼진 미세플라스틱 조각들은 대양 상에서 응집하여 섬 모양의 ‘쓰레기 더미(garbage patch)’를 이루게 된다. 이러한 쓰레기 더미는 지역적인 환경 문제를 넘어 범 지구적인 해양 생태계의 파괴를 불러일으키는 주된 원인이기에 이러한 현상을 방지하고 대응하기 위해 해양 쓰레기 제거를 위한 수많은 과학적 연구 및 기술의 개발이 이루어져 왔다⁽¹⁾.

폐수에서 다양한 오염물을 분리 및 제거하는 폐수처리기술(wastewater treatment plants, WWTPs)은 상기한 여러 기술들 중의 하나로, 미세플라스틱이 바다로 흘러가기 전 오폐수에 존재하는 상태에서 미세플라스틱 조각을 제거하기에 그 효과가 높은 미세플라스틱 대응 기술들 중 하나이다. 폐수처리기술의 대표적인 예시로는 모래나 천 등 다양한 조성의 필터를 이용하여 물리적으로 폐수를 거르는 필터링(filtering) 기술, 미생물의 자연적 대사 반응을 이용하여 폐수 내의 오염물을 제거하는 막결합 생물반응조(membrane bioreactor, MBR) 기술, 포화된 가압수를 순간적으로 감압시킨 후 그 결과로 인해 생성되는 미세기포를 이용하여 소수성(hydrophobic) 물질을 친수성(hydrophilic) 물질에서 분리해 내는 용존 공기 부상법(dissolved air flotation, DAF) 등이 있다⁽²⁾. 그러나, 이러한 기술들은 사용 환경의 제약 및 비용적 측면에서 한계를 가진다. 예를 들어, 이론상 폐수에서 미세플라스틱을 99% 이상 제거할 수 있다고 여겨지는 MBR 기술의 경우 핵심 부품인 막(membrane)의 가격이 상당히 비싸고, 반응 과정에서 소모되는 에너지량도 막대한 수준이기에 제3세계와 개발도상국을 포함한 전세계적 규모에서 폐수처리 기술로 널리 활용하기에는 적절하지 못하다⁽³⁾.

따라서, 본 연구에서는 기존의 처리 방법의 단점을 극복(DAF 수준의 low-cost 기법으로, 타 기법에 비해 적은 에너지를 필요로 함)⁽³⁾할 수 있으며 친환경적인 폐수처리 기법으로 최근 들어 다양한 분야에서 관심을 받고 있는 기포(bubble)를 사용하여 미세플라스틱 조각을 포획하고 제거하는 방식의 효율성을 실험적으로 검증해 보

고자 한다. 해양의 미세플라스틱 쓰레기의 대부분을 차지하는 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene, HDPE) 현탁액에 기포 생성 장치를 장착하여 단일 기포가 수조 내에서 상승하며 폴리에틸렌 입자와 만났을 때의 상호작용 및 입자의 움직임을 초고속카메라를 이용하여 촬영하였고, 이를 통해 얻은 이미지를 후처리하여 기포 유동의 영향을 받는 기포 주변 입자들의 거동 및 궤적의 변화 과정을 가시화 및 분석하였다. 이를 통해 기포-입자 상호작용(bubble-particle interaction)을 크게 기포의 후류(bubble wake)에서 유도된 모멘텀의 영향을 받아 입자가 수면 방향으로 끌려 올라오는 긍정적인 입자 제거 메커니즘(wake entrainment), 기포가 밀어낸 액체의 유동에 의해 입자가 멀리 밀려나 그 궤적이 무작위하게 변하는(pushed away) 메커니즘의 두 가지로 분류하여 그 기전 및 현상에 대해 관찰 및 분석하는 것을 목표로 한다.

2. 실험장비 및 실험기법

2.1 실험 장비

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 수조 및 기포를 생성하기 위한 syringe 펌프, 초고속 카메라를 포함하는 유동 가시화 장비가 세팅된 실험 장비의 도식이다. 기포 수조는 200 mm × 200 mm의 바닥 면적을 가지고 있으며, 높이는 1500 mm이다. 수조의 바닥 면의 가운데에 22-gauge 바늘을 체결하고, 이를 유압 호스와 연결하여 syringe 펌프에 연결한다. 이 때 기포가 생성되는 바늘 끝 부분(needle tip)이 수조의 바닥 면의 기하학적 중심 위치에 바닥 면과 평행하게 부착하도록 하여 바닥 면에서 기포가 생성되도록 한다. 실험에 사용한 입자는 300-550 nm 범위의 붉은색 파장을 가지는 형광 고밀도 폴리에틸렌(fluorescent HDPE) 입자로, 0.995 g/cc의 밀도를 가지며, 입자 지름의 범위는 212-250 μm이다. 또한, 초기 상태가 아닌 중단 속도(terminal velocity)에 도달한 후의 기포의 영향을 받는 입자의 거동을 관찰하기 위하여 50 mm 렌즈를 장착한 초고속카

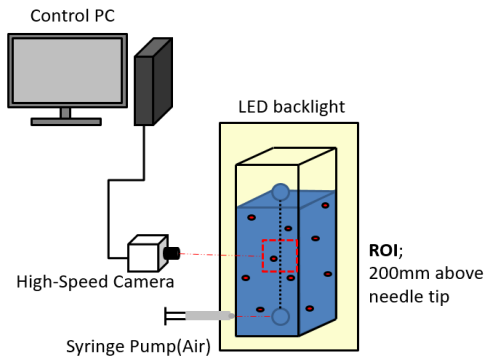


Fig. 1. Experimental setup for the single bubble flow to the particle-suspended 3D water tank.

메라를 바늘 끝으로부터 충분히 떨어진⁽⁴⁾ 윗부분(200 mm 거리)에 설치하였다.

2.2 실험 기법

수조에 11 L의 물을 채운 후, 계면활성제를 기포의 유동에 영향을 미치지 않을 수준으로 미량 ($\Phi \sim O(10^{-6})$) 첨가하였다. 이는 92.3°의 접촉 각을 가지는 소수성 폴리에틸렌 입자들이 서로 뭉쳐서 수면에 덩어리를 형성하는 것을 막아주는 동시에 수조 내에 입자가 균일하게 배치되도록 하는 효과를 가진다. 계면활성제는 입자 군(cluster)의 거동이 아닌 개별 입자의 거동 가시화가 이루어질 수 있도록 하기 위해 이용한 것이며, 기포를 이용한 입자제거를 위해 추가하는 것은 아니다. 또한, 실제 폐수처리 기술을 적용할 때 폐수에 함유되어 있는 계면활성제의 영향도 확인할 수 있는 부가적인 효과도 있다. 계면활성제를 첨가한 물에 고밀도 폴리에틸렌 입자를 $\Phi (= 10^{-4})$ 의 부피 비로 물에 개어 놓고, 시약 수저로 수조를 저은 후 입자의 움직임이 거의 사라질 때까지 기다려 폴리에틸렌 현탁액(suspension)을 얻는다. 실험의 매 시행이 시작되기 전 수조를 저은 후 동일한 시간을 기다리는 행위를 반복하여 현탁액 내 입자가 침전 및 부유하는 정도를 동일하게 유지한다. 현탁액이 얻어진 후 syringe 펌프를 0.07 ml/min의 유량으로 작동시켜 단일 기포를 생성시키는데, 이 때 생성된 단일 기포의 등

가 직경(equivalent diameter, D_{eq})은 1.0-1.4 mm의 범위를 가진다. 초고속카메라(1000 fps)를 이용하여 바늘 끝에서 처음으로 생성된 단일 기포(very first single bubble)가 바늘에서 떨어진 직후의 순간부터 2000 프레임(2초) 동안 촬영하여 처리 전 이미지(raw image)를 얻는데, 이 때 관심 영역(region of interest, ROI) 안에 기포의 머리 부분이 들어오는 프레임부터 기포의 꼬리 부분이 영역을 벗어나는 프레임까지 발췌하여 분석을 수행한다. 관심 영역은 256×256 픽셀의 정사각형으로, calibration 후의 resolution 값은 $42.11 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 이다.

3. 결과 및 분석

3.1 기포-입자 충돌에 의한 상호작용

기포와 입자 사이의 상호작용은 크게 기포와 입자가 충돌(collision)하는 경우와 기포와 입자의 직접적인 충돌 없이 입자가 기포가 밀어낸 액체의 유동이나 기포 후류의 영향을 받는 경우로 나눌 수 있다. Fig. 2는 입자가 기포와 충돌한 후 기포 표면을 타고 이동하다 기포의 적도 부근의 불룩한 곡면에서 미끄러져 나가는 경우(bulge dislocation)를 보여주는 그림이다. 이처럼 입자가 기포와 충돌한 후 기포 표면을 따라 이동하다 기포 표면에서 떨어져 나올 경우 기포는 입자에 비해 상대적으로 높은 속도로 계속해서 상승하기에 입자는 기포의 후류가 지배적인 유동

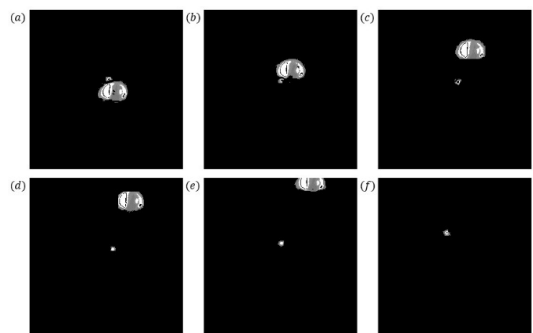


Fig. 2. Particle dislocation occurred at bulged part of bubble (image sequence in interval of 0.01 second).

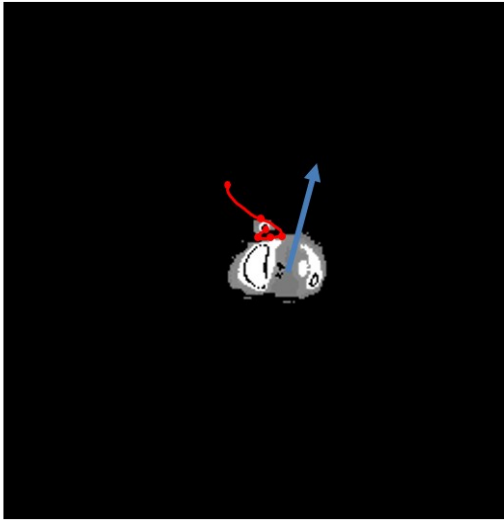


Fig. 3. Direction of velocity of bubble centroid (vector not drawn in scale) at the instance of bubble-particle collision with particle trajectory within 50 frames (0.05sec) in interval of 0.01 second.

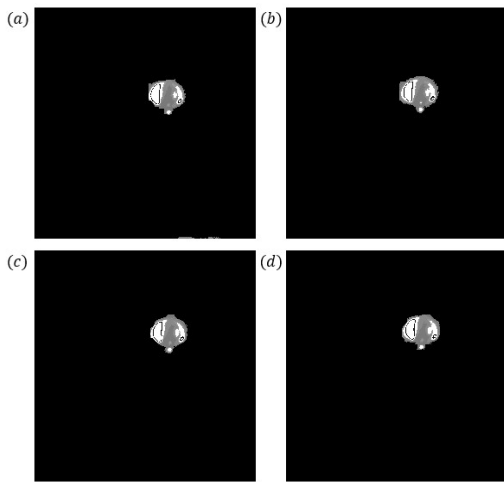


Fig. 4. Bubble tail clinging phenomenon of particle followed by bubble bulge dislocation (image sequence in interval of 0.001 second).

이 되는 뒤쪽 구간⁽⁵⁾에 놓이게 되며, 이 때 입자는 기포 후류의 영향을 받아 2차적인 기포-입자 상호작용을 겪게 된다. 입자가 기포와 충돌한 후 기포 표면을 타고 이동하지 못하고 표면에서 튕겨져 나올 경우 입자는 충돌 시의 반발력⁽⁶⁾에 더해 기포가 밀어내는 액체 유동에 의해 추가적

인 모멘텀을 받아 기포와 먼 방향으로 밀려나지만(pushed away), 이러한 경우에서도 입자는 기포에 비해 상대적으로 작은 속도를 가지기에 2차적인 기포-입자 상호작용을 가지는 기포 뒤쪽 구간에 위치하게 된다. 2차적인 기포-입자 상호작용에서 대부분의 입자는 후류로부터 충분한 모멘텀을 전달받지 못해 후류에 끌려 올라오지 못하고 입자의 거동이 기포의 상승 방향과는 관련이 없이 무작위하게 변하는데, 이는 Fig. 3을 통해 관찰할 수 있다.

Fig. 4는 입자가 기포의 적도에서 떨어져 나간 이후 2차적인 기포-입자 상호작용의 영향을 받은 입자 중 기포 후류의 모멘텀을 충분히 받은 몇몇의 경우 중 하나를 보여주는데, 입자가 기포의 꼬리 부분까지 상승한 후 꼬리에 매달려 기포와 같이 상승하는 현상(tail clinging)을 확인할 수 있었다. 이 경우 입자는 관심 영역을 넘어간 이후에도 계속해서 기포의 꼬리 부분에 붙어 수면까지 이동하는 현상을 보였지만, 그 빈도는 앞서 언급한 불안정한 거동의 입자-기포 상호작용보다 월등히 적게 관찰되었다.

3.2 유동에 의한 상호작용

기포와 입자 사이의 직접적인 충돌이 일어나지 않는 이유는 크게 두 가지인데, 첫번째는 기포 중심으로부터 입자까지의 거리(d)가 너무 멀어(모든 프레임에서 $d/D_{eq} \gg O(10)$ 인 경우) 상승 기포의 유동이 입자에 미치는 영향이 미미한 경우로, 이는 본 연구의 분석 대상 밖의 케이스로 볼 수 있다. 기포와 입자 사이 충돌이 일어나지 않는 두 번째 이유는 기포가 밀어낸 액체의 유동에 의해 입자가 멀리 밀려나 입자와 기포 중심 사이의 거리가 충돌하기에 충분한 거리까지 가까워지지 못하는 경우로 이러한 상태의 입자들 중 몇몇은 기포 표면에서 튕겨져 나와 밀려난(pushed away) 입자들과 그 궤적 및 거동이 유사하게 나타났지만, 일부 입자는 기포 후류의 영향을 받는 지역으로 빨려 들어가 후류를 따라 수면 방향으로 천천히 상승하는 거동(wake entrainment)을 보여주었고, 이는 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. 즉, 입자가 후

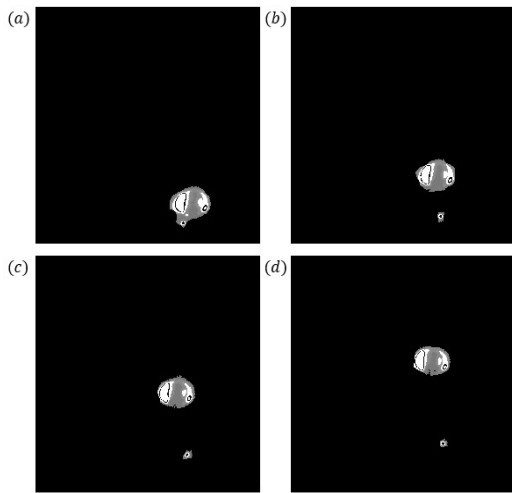


Fig. 5. Entrainment of a particle due to the bubble wake (image sequence in interval of 0.1 second).

류의 영향을 받는 현상은 후류의 영향이 가장 큰 기포의 적도 부근에서 후류에 빨려 올라간(tail clinging) 경우와, 이와는 다르게 기포가 밀어낸 유체의 유동에 의해 입자가 한번 밀려난 후 기포와 적당히 떨어진 거리에서 후류의 영향을 받았기에 기포의 상승 속도보다는 월등히 낮은 속도로 입자가 상승하게 되는 경우로 나뉜다. 따라서 기포와 입자 사이의 충돌이 선행되지 않은 경우에는 후류의 모멘텀에 의해 입자가 기포 꼬리까지 도달하여 꼬리에 매달리는 경우를 관찰할 수 없었다.

3.3 기포-입자 상호작용 분류

상승 기포 유동의 가시화 결과 및 그 분석을 통해, 기포와 입자 사이의 상호작용을 크게 네 가지로 분류할 수 있었다. 1) 입자와 기포가 충돌한 뒤 입자가 기포의 표면을 타고 미끄러지다 기포의 적도 부근에서 떨어져 나간 후 후류의 영향을 받아 입자의 움직임이 불안정해지고 무작위해지는 현상(bulge dislocation)으로, 입자와 기포 사이의 충돌이 일어난 경우에서 기포-입자 상호작용의 대부분을 차지한다. 2) 입자가 기포가 밀어낸 액체의 유동으로 인해 밀려난 이후 후류로부터 적당한 모멘텀을 받아 천천히 끌려

올라오는 현상(wake entrainment)으로, 입자와 기포 사이의 충돌이 일어나지 않은 경우에서 유동-입자 상호작용의 대부분을 차지한다. 3) 기포가 밀어낸 액체의 유동으로 인해 입자가 후류의 영향을 받지 못하는 거리까지 밀려나는 현상(pushed away)으로, 기포와 입자의 충돌이 선행되는 경우와 그렇지 않은 경우의 두 가지 경우가 존재하며, 두 가지 경우 모두 입자는 기포의 반경 방향(radial direction)으로 밀려나며 기포의 중심 및 상승 궤적에서 멀어지게 된다. 4) 기포와 입자의 충돌 이후 기포의 표면을 타고 이동하던 입자가 기포 적도 부근 표면에서 미끄러져 나온 후(bulge dislocation 이후) 후류로부터 충분한 모멘텀을 받아 상승하여 기포 꼬리 부분에 붙어 기포와 같이 수면으로 상승하는 현상(tail clinging)으로, 모든 입자-기포 상호작용 중 발생 빈도가 제일 적었으나 상승 기포를 이용한 마이크로 사이즈 입자 제거에 있어서 가장 효과적인 메커니즘이라고 할 수 있다. 즉, 이러한 분류를 통해 입자와 기포 사이의 상호작용은 입자의 초기 위치 혹은 유동에 의해 1차적으로 밀려난 후 입자의 위치가 기포 후류의 영향권에 얼마나 가까이 위치할 수 있는지에 의해 가장 큰 영향을 받는다는 것을 의미하는데, 입자가 후류가 발생하는 영역에 충분히 가까이 위치하더라도 상승 모멘텀을 무조건 전달받지 못하고 후류의 와도(vorticity)⁽⁷⁾로 인하여 무작위한 거동을 보이는 경우도 존재한다는 점 또한 주목할만한 점이다.

기포 중심에 상대적인 입자의 초기 위치와 기포-입자 상호작용 사이의 관계를 알아보기 위해 기포-입자 상호작용 지도(bubble-particle interaction map)를 도출할 수 있었다(Fig. 6). Fig. 에서 x 축은 기포의 주 상승방향 축에 대한 입자의 극 각(polar angle, θ)을 나타내고, y 축은 기포 중심으로부터 입자까지의 거리(d)를 기포의 등가직경(D_{eq})으로 정규화 시킨 거리를 나타내는 무차원 변수이다. 입자가 기포로부터 멀리 밀려나는(pushed away) 상호작용의 경우, 기포와 입자의 충돌 유무와 관계없이 입자는 후류의 영향을 받지 못하는 곳으로 밀려났으며, 기포가 지나간 후의 입자의 거동 및 궤적에서도 큰 차이를 보

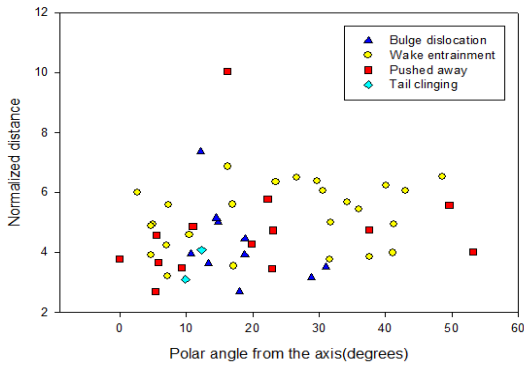


Fig. 6. Map of bubble-particle interaction classified by the particle polar angle from the vertical axis (rising direction of the bubble) and normalized bubble-particle distance.

이지 않았으므로 그래프에 구별하지 않고 나타냈다.

Fig. 6을 통해 입자와 기포 중심 사이의 거리 (d/D_{eq})는 기포-입자 상호작용에 미치는 영향이 상대적으로 적다고 이야기할 수 있는데, 이는 입자와 기포 중심 사이의 거리가 너무 멀 경우 입자가 상승하는 기포에 의해 받는 영향이 미미해 무시할 수 있고, 기포가 상승하며 그 거리가 어느 정도 좁아진 후에서야 (대략 $d/D_{eq} < 8$ 일 경우) 입자가 상승하는 기포의 영향을 받게 되는데 이 때 입자와 기포 중심 사이의 거리에 따른 상호작용의 종류의 차이가 크지 않고 고루 나타나기 때문이다. 또한 bulge dislocation, 혹은 bulge dislocation 후에 일어나는 tail clinging 현상이 일어나기 위해선 입자가 기포의 영향을 받기 시작할 만큼 충분히 가까워졌을 때 특정한 극 각의 범위 ($\sim 10-35^\circ$) 안에 있어야 한다는 것을 관찰할 수 있는데, 입자와 기포 사이의 충돌 (collision) 또한 이 범위에서 주로 관찰되었다. 이는 특정한 극 각 범위 밖에 있는 입자들은 일차적으로 기포가 밀어낸 액체의 유동의 영향을 우선적으로 받아 기포의 상승 궤적으로부터 멀리 밀려나기에 기포와 입자 사이의 충돌이 잘 일어나지 않고, 후류의 영향을 크게 받는 기포 바로 뒤쪽으로 이동하기 어렵다는 것을 내포한다. 즉, 이는 기포와 입자 사이의 거리보다는 기포와 입자가 이루는 극 각(polar angle)이 기포-

입자의 충돌 및 기포-입자 상호작용의 종류를 결정하는 주된 변수로 작용한다는 것을 의미한다.

지금까지 기술한 입자 거동의 가시화 결과 및 분석을 통해 기포를 사용한 미세플라스틱 제거 기술의 입자 제거 메커니즘은 기포가 가지는 부력을 이용한 입자의 부유에만 국한되어 있지 않고, 기포 후류와 입자 사이의 상호작용에 의해 더욱 효율적으로 일어남을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 이를 확인하기 위하여 단일기포와 입자사이의 상호작용에 대한 기초연구를 수행하였지만, 실제적인 미세플라스틱 제거 기술에 응용한다면, 기포 체인(bubble chain)이나 기포탑(bubble column)을 사용하여 그 효율성을 더욱 극대화 시키는 방안을 생각해 볼 수 있다. 선행 기포에 의해 전위가 일어나거나 추가적인 운동량을 받은 입자들은 뒤따라오는 기포(들)에 의해 2차적인 기포-입자 상호작용을 겪을 것이며, 이는 물보다 밀도가 높은 PVC나 PET 등의 고밀도 미세플라스틱 입자 또한 기포를 이용하여 효율적으로 제거할 수 있다는 것을 함의하고 있기에 후속 연구의 필요성이 대두된다.

4. 결론

본 연구에서는 폴리에틸렌 현탁액 내에서 상승하는 단일 기포 유동과 개별 폴리에틸렌 입자 사이의 상호작용을 shadowgraphy 기법을 통해 가시화 및 분석할 수 있었다. 입자의 거동의 주된 변화의 원인은 기포에 의해 유발되는 액체 유동 및 후류에 의해 입자가 힘을 받기 때문인데 이 때 입자와 기포 중심 사이의 초기 위치, 특히 기포의 영향권($d/D_{eq} < 8$) 안에 들어왔을 때 기포 중심과 입자가 이루는 극 각에 따라 입자가 궤적 및 거동에 영향을 받는 정도가 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 상호작용이 일어날 때 입자와 기포 사이의 거리가 충분히 가까울 경우 입자가 기포 꼬리 부분에 매달리거나, 후류를 타고 올라가 수면으로 상승시킬 수 있음을 확인할 수 있었으며, 이를 이용한 상승 기포를 이용한 효과적인 입자 제거 메커니즘의 가능성을 확인해 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 정부 재원으로 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 중견연구자지원사업(2020 1A2C2014510) 및 원자력연구개발사업(RS-2022-00144494)의 후원을 받아, 서울대학교 정밀기계 설계공동연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

- 1) Hale, R.C., Seeley, M.E., La Guardia, M.J., Mai, L. and Zeng, E.Y., 2020, “A global perspective on microplastics”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), p.e2018JC014719.
- 2) Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A. and Setälä, O., 2017, “Solutions to microplastic pollution—Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies”, *Water research*, 123, pp.401-407.
- 3) Sol, D., Laca, A., Laca, A. and Díaz, M., 2020, “Approaching the environmental problem of microplastics: Importance of WWTP treatments”, *Science of the Total Environment*, 740, p.140016.
- 4) Aybers, N.M. and Tapucu, A., 1969, “The motion of gas bubbles rising through stagnant liquid”, *Wärme-und Stoffübertragung*, 2(2), pp.118-128
- 5) Lee, J. and Park, H., 2017, “Wake structures behind an oscillating bubble rising close to a vertical wall”, *International Journal of Multiphase Flow*, 91, pp.225-242
- 6) Jeong, H. and Park, H., 2015, “Near-wall rising behaviour of a deformable bubble at high Reynolds number”, *Journal of Fluid Mechanics*, 771, pp.564-594.
- 7) Maeng, H. and Park, H., 2021, “An experimental study on the heat transfer by a single bubble wake rising near a vertical heated wall” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 165, p.120590