

진동하는 버블을 이용한 초소형 유영로봇 추진 Propulsion of Micro/Mini Water-Floating Objects by Oscillating Bubbles

원정민, 이정현, 이경호, 이계한, *#정상국

J. M. Won, J. H. Lee, K. H. Lee, K. Rhee, and *#S. K. Chung (skchung@mju.ac.kr)

명지대학교 기계공학과

Key words : Novel propulsion, Microrobot, Oscillating bubble, Cavitation microstreaming

1. 서론

최근에 나노/바이오 관련 산업이 크게 성장하면서 초소형 로봇(microrobot)의 개발에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 이러한 초소형 로봇을 개발하는데 있어 가장 큰 어려움은 작은 로봇에 맞는 새로운 추진방법을 개발하는 것이다[1, 2].

본 논문은 진동하는 마이크로 버블(oscillating microbubbles)을 이용하여 수면 위의 소금쟁이와 같이 초소형 로봇을 움직일 수 있는 새로운 추진방법을 제안하였다. 본 연구실에서는 외부에서 인가한 음파에 의해 진동하는 마이크로 버블에서 발생하는 cavitation microstreaming 을 이용하여 수중의 마이크로 물체를 추진하는데 성공한 바 있다[3]. 그러나 이 연구결과는 일차원 선형적 추진만 가능하였을 뿐 이차원 또는 삼차원 공간에서의 추진은 시도되지 못했다. 본 논문에서는 위의 한계를 극복하기 위하여 서로 다른 공진 주파수를 갖는 두 개의 버블을 사용하여 선택적으로 각각의 버블을 여기 시켜 이차원 수면 위에서 마이크로 물체를 자유롭게 추진하는데 성공하였다.

2. 실험결과

그림 1(a)와(b)는 음파에 의해 진동하는 버블에서 발생하는 cavitation microstreaming 결과이다[3, 4]. 소형수조의 바닥에 붙어있던 피에조 액추에이터(piezoactuator)를 이용하여 수조 내 직경이 500 μm 인 버블을 공진주파수(12 kHz)에 맞추어 진동시킬 때 그 버블은 그림 1(a)와 같이 버블의 주변으로 나가는 방향의 유동을 발생시킨다. 또한

주파수를 10 kHz 로 변경 시 그림 1(b)와 같이 버블의 내부로 들어오는 방향의 유동이 발생되었다. 본 실험은 주파수가 진동하는 버블에서 발생하는 유동의 방향을 제어하는데 효율적인 요소임을 보여준다. 또한 본 연구에서 버블의 공진주파수 (f_0) 는 1 기압하에서의 Minnaert 식($af_0 \cong 6 \text{ m/s}$, a 는 버블의 직경)를 통해 구하였다[4].

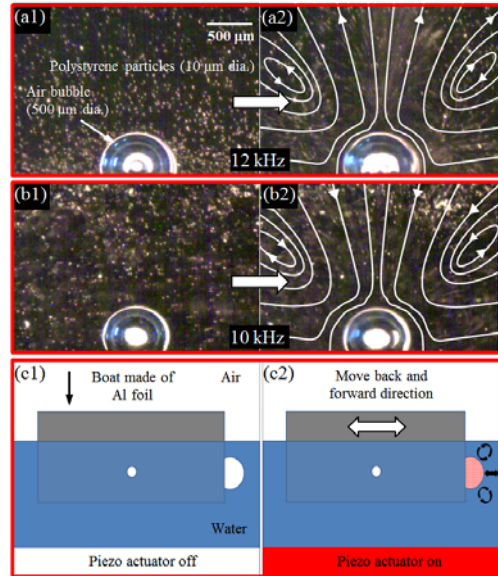


Fig. 1 Cavitation microstreaming flows around acoustically oscillating micro bubbles and a propulsion concept of water-floating objects using the flows

그림 1(c)는 서로 다른 크기의 두 개의 버블에서 발생하는 유동을 이용하여 수면 위의 물체를 추진하는 방법에 관한 도식도 이다.

예를 들어 그림 1(c2)와 같이 수면 위에 떠있는 물체를 전후로 이동시키기 위해서 물체의 뒤에 붙어있는 큰 버블만을 특정 주파수에서 선택적으로 여기 시켜 추진할 수 있다. 이와 동일한 방법으로 물체의 옆면에 붙어있는 작은 버블만을 여기 시켜 물체를 좌우로 이동시킬 수도 있다. 두 버블을 동시에 진동시키면 다양한 방향으로 물체를 이동시킬 수 있을 뿐만 아니라 이 방법을 통해 수면 위의 이차원 공간에서 자유롭게 물체를 추진할 수 있게 된다.

제안된 추진방법을 실험적으로 검증하기 위해 그림 2 와 같이 얇은 알루미늄 판으로 만들어진 보트를 소형수조의 수면 위에 띄우고 700 μm 직경의 공기버블을 그림 1(c)와 같이 부분적으로 물에 잠긴 보트($1 \times 2 \text{ mm}^2$)의 한쪽면에 부착하였다. 소형수조의 바닥에 붙어있는 피에조 액추에이터를 이용하여 보트에 붙어있는 버블을 공진주파수(8.5 kHz, 300 V)에 맞추어 진동시켰을 때 보트는 그림 2(a)와 같이 왼쪽으로 이동하였다. 이는 공진주파수에서 진동하는 버블이 그림 1(a)와 같이 주변으로 나가는 유동에 의해 보트를 밀어준 것으로 판단된다. 주파수를 10 kHz 로 변경 시 버블이 보트를 당기는 것과 같이 보트는 오른쪽으로 이동하였다(그림 1(b) 참조).

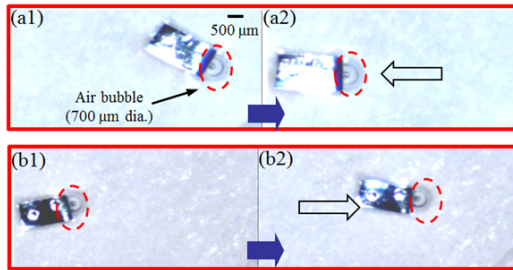


Fig. 2 Sequential snapshots of linear motions of a small water-floating object. Note that red broken circles indicate microbubbles

마지막으로 마이크로 보트를 이용하여 이차원 추진을 위해 그림 3(a)와 같이 두 개의 다른 크기의 버블을 서로 인접한 보트의 표면에 부착하였다. 피에조 액추에이터를 이용하여 소형수조를 10 kHz 로 진동 시 직경

300 μm 크기의 큰 버블이 이 주파수에 반응하는 반면 직경 200 μm 크기의 작은 버블은 이 진동수에 반응하지 않았다. 이로 인해 마이크로 보트는 윗면에 붙어 있는 큰 버블의 영향으로 위쪽방향으로 움직였다. 그러나 주파수를 12 kHz 로 변경 시 큰 버블의 진동은 약해지고 작은 버블의 진동이 커지면서 보트는 그림 3(c)와 같이 왼쪽방향으로 이동하였다.

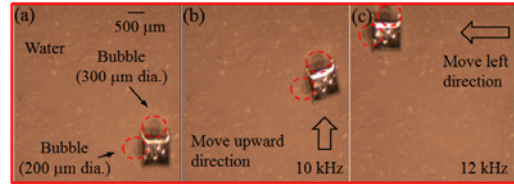


Fig. 3 Sequential snapshots of two-dimensional propulsion

3. 결론

본 논문에서는 음파에 의해 진동하는 버블에서 발생하는 유동을 이용하여 수면 위에 초소형 물체를 추진하는 방법에 관한 연구가 수행되었다. 이렇게 개발된 새로운 추진 방법은 향후 다양한 산업분야에서 주변 환경을 모니터링 하는 로봇의 추진방법으로 사용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2009-2010 년도 명지대학교 교내연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Behkam, B. and Sitti, M., "Bacterial flagella-based propulsion and on/off motion control of microscale objects," *Applied Physics Letters*, **90**, 2007.
2. Pawashe, C., *et al.*, "Multiple magnetic microrobot control using electrostatic anchoring," *Applied Physics Letters*, **94**, 164108, 2009.
3. Chung, S. K., *et al.*, "Electrowetting propulsion of water-floating objects," *Applied Physics Letters*, **95**, 014107, 2009.
4. Leighton, T. G., "The Acoustic Bubble," Academic Press, 1997.