

진동하는 버블을 이용한 마이크로 로봇 추진 Underwater propulsion using oscillating bubbles

**정상국, 이계한, 박강

*#S. K. Chung(skchung@mju.ac.kr), K. Rhee, K. Park
명지대학교 기계공학과

Key words : Novel propulsion, Acoustic excitation, Cavitation microstreaming flow, Drug delivery, Bio-sensing, Bio-surgery

1. 서론

최근 바이오와 나노 기술이 비약적으로 발전하면서 영화 속의 장면과 같이 인체의 혈관 내부에서 움직일 수 있는 초소형 로봇의 개발에 대한 관심이 높다 [1-4]. 향후 이 로봇은 인체 내부의 필요한 곳에 약물을 수송하는 약물 전달(drug delivery)과 바이오 센싱(bio-sensing) 및 바이오 수술(bio-surgery) 등과 같은 응용분야들에 이용될 수 있다. 그러나 현재 이러한 로봇을 구현하는데 있어 가장 큰 어려움은 초소형 로봇을 움직일 수 있는 새로운 추진 방법을 개발하는 것이다 [1]. 현재 수십 밀리미터에서 수 미터 이상의 크기의 로봇을 구동하기 위해 기계적 방식의 모터가 많이 사용되고 있다. 그러나 인체의 혈관 내에서 움직이는 초소형 로봇의 추진을 위해 기존의 기계적 방식을 사용하는 것은 크기 및 효율성과 같은 문제점으로 적절하지 않다. 최근 주요 연구기관에서는 이러한 초소형 로봇을 추진하기 위한 새로운 방법들을 작은 생물 또는 미생물들이 움직이는 방법에서 찾으려 하고 있다 [1, 2, 4].

국내의 한 연구팀에서는 이온 폴리머-금속 복합재료 구동체(ion polymer-metal composite actuator, IPMC)를 이용하여 물고기가 수영하는 방법을 모방한 밀리미터 크기의 수중 로봇을 연구 개발한 바 있다 [2]. 국외의 Sitti 그룹에서는 로봇의 크기를 혁신적으로 소형화시키기 위해 미생물 자체를 추진체로 이용하여 미소 물체를 이송시키는 것을 실험적으로 증명한 바 있다 [1]. 그리고 Paxton 그룹에서는 산성 용액(H₂O₂)에서 화학 촉매반응을 이용하여 나노(nano) 크기의 물체를 추진하는데 성공하였다 [3]. 그러나 이러한 추진 방식들은 제어의 어려움과 인체에 유해한 화학약품을 사용해야 하는 문제점들이 있다. 최근 Nelson 그룹에서는 생체 모방 기술을 이용하여 제작한 인공편모(artificial bacterial flagella)를 자기장을 이용하여 효과적으로 제어하는 것을 실험적으로 증명한 바 있다 [4].

하는 버블은 주변으로 Fig. 1(b)와 같은 형태의 유동을 발생시킨다. 이 유동을 캐비테이션 유동(cavitation microstreaming flow)이라 한다. 본 논문에서는 수중에서 버블의 고유 진동수와 유사한 주기의 음파 자극에 의해 진동하는 버블에서 발생하는 이 유동을 초소형 물체를 움직이는 새로운 추진력으로 사용하였다. 진동하는 버블을 이용하여 수중 물체를 추진하는 방법이 Fig. 2에 설명 되어있다. 수중 물체의 움직임을 제어하기 위해 서로 다른 크기의 버블이 각각 다른 고유 주파수를 갖는 것을 이용하였다. 예를 들어 Fig. 2는 수중 물체를 왼쪽으로 이동시키기 위해서 특정 주파수의 음파를 외부에서 발생시켜 물체의 오른쪽 면에 붙어있는 버블만을 선택적으로 진동시켜 유동을 발생시키고 다른 면의 버블들은 비 활성화된 상태로 만들어서 물체를 원하는 방향으로 움직이는 것을 설명한 것이다. 이러한 방법을 확대 적용하여 서로 다른 고유 주파수를 갖는 버블들을 선택적으로 여기(acoustically excited) 한다면 3 차원 공간에서 수중 물체의 움직임을 효율적으로 제어할 수 있다.

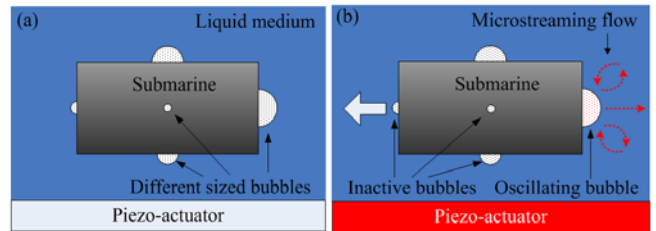


Fig. 2 Submarine propulsion scheme by a cavitation microstreaming flow: (a) Initial state. (b) A submarine moves to the left when the bubble on the rear side of the submarine is excited by a piezo-actuator attached to the bottom of a water chamber around the bubble resonant frequency.

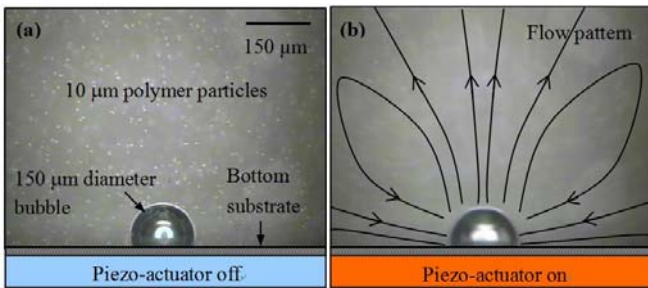


Fig. 1 Cavitation microstreaming flow around an oscillating bubble. The bubble is excited by the piezo-actuator at 25 kHz. (a) Initial state : for flow visualization 10 μm polymer particles are seeded and suspended. (b) Excitation : large circulation flow patterns are formed around the bubble.

본 논문에서는 이전의 추진방법들과는 차별화된 방식으로 초음파에 의해 진동하는 버블에서 발생하는 유동을 이용하여 초소형 물체를 추진하는데 성공하였다 [5-7]. 외부에서 음파가 수중의 버블에 전파될 때, 버블은 인가된 음파의 주기에 맞추어 진동하게(팽창과 수축) 되며 이때 진동

본 추진방법에 있어 중요한 특징 중 한 가지는 추진을 위해 사용되는 버블이 이미 임상적으로 인체에 무해하다는 것이 증명되었다는 것이다 [8]. 그래서 버블은 이미 초음파 치료(ultrasound therapy) 및 이미징(ultrasound imaging) 기술 등에 응용되고 있다. 새로운 추진방법은 향후 바이오 산업을 비롯하여 내시경(endoscope)을 이용하여 관찰이 불가능한 초소형 구조물의 탐침 및 정찰 등과 같은 다양한 산업 분야에 응용이 될 수 있으리라 판단된다.

2. 실험결과

위에 제시한 새로운 추진방법을 실험적으로 검증하기 위하여 물이 담겨있는 소형 챔버(5 × 5 × 2.5 cm³)에 470 μm 직경의 공기 버블을 220 μm 직경의 유리관 끝에 붙였다. 그리고 유리관의 끝부분은 버블과의 접촉력을 향상시켜 주기 위해서 소수성 막(Teflon layer)을 딥핑(dipping) 방법을 이용하여 도포 하였다. 또한 버블이 붙어있는 유리관이 바닥면에 닿는 것을 방지하고 추진시험 시 자유로운 좌우 움직임을 가능하도록 25 μm 직경의 금으로 만들어진 와이어와 폴리머 지지대가 사용되었다 (Fig. 3). 그리고 다양한 주파수의 음파를 발생시키기 위하여 링 타입의 피에조 액추

에이터(액추에이터의 내경, 외경, 두께는 각각 25 mm, 9.5 mm, and 3.2 mm)를 챔버 바닥면에 붙여서 사용하였다.

피에조 액추에이터에 의해 유리관 끝에 부착된 버블이 자신의 고유 진동수(13 kHz)와 동일한 음파에 의해 자극 받을 때 버블은 크게 진동하며 유리관을 왼쪽으로 이송시켰다 (Fig. 3a). 이는 진동하는 버블에서 발생한 유동이 유리관을 앞쪽으로 미는(pushing) 효과를 나타낸 것이다. 그리고 함수발생기(function generator)를 이용하여 피에조 액추에이터에 인가한 주파수를 18 kHz 로 변경하였을 때 이번엔 유리관이 오른쪽으로 움직였다(Fig. 3b). 이는 진동하는 버블이 유리관을 뒤쪽으로 당긴(pulling) 것과 같은 효과를 나타낸 것이다. 이 실험을 통해 진동하는 버블에서 발생하는 캐비테이션 유동을 효율적으로 이용하면 수중에서 작은 물체를 추진할 수 있다는 것이 증명되었다. 또한 본 실험을 통해서 버블에 인가하는 음파 주파수는 수중 물체의 추진 방향을 효율적으로 제어할 수 있는 중요한 인자(parameter)라는 것이 밝혀졌다.

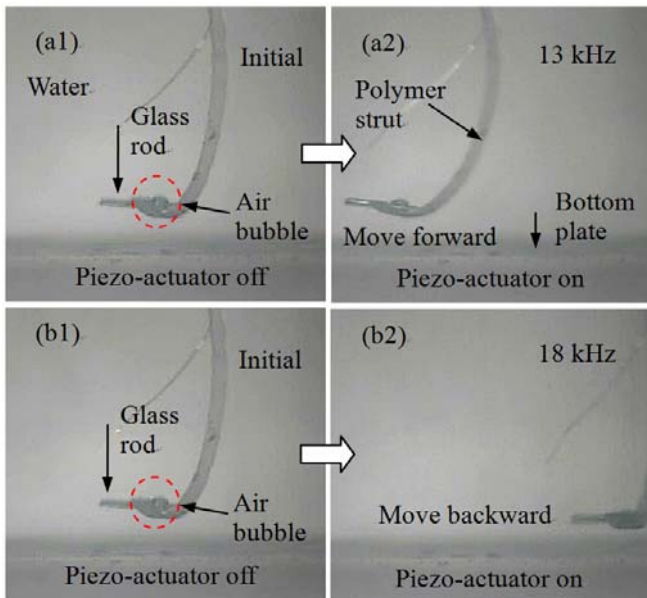


Fig. 3 Side view snapshots of forward and backward directional propulsion of a micron-sized submarine using an oscillating bubble. (a1, b1) Initial state. (a2) When a bubble (470 μm dia.) is excited at 13 kHz, a submarine (220 μm dia.) moves to the left. (b2) When the same bubble is excited at 18 kHz, the submarine moves to the right. Note that a hydrophobic Teflon layer is deposited on the right tip of the submarine.

진동하는 버블에서 발생하는 추진력을 정량적으로 구하기 위해 Fig. 4 와 같이 진자(pendulum)와 유사한 형태의 실험 구성(setup)에서 시험이 수행되었다. 이는 진동하는 버블에 의해 움직인 유리관의 위치를 구함으로써 그 위치에서 중력과 균형을 이루는 추진력을 구한 것이다. 본 실험을 통해서 피에조 액추에이터에 인가된 다양한 전압에 따라 진동하는 버블에서 발생하는 추진력을 구할 수 있었다(Fig. 4). 실험결과 외부에서 피에조 액추에이터에 인가된 전압이 클수록, 즉 버블의 진동이 증가될수록 버블에서 발생하는 추진력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 참고로 고속카메라를 이용하여 본 실험에서 측정된 버블의 최대 진폭 변화는 수십 마이크로 미터였다.

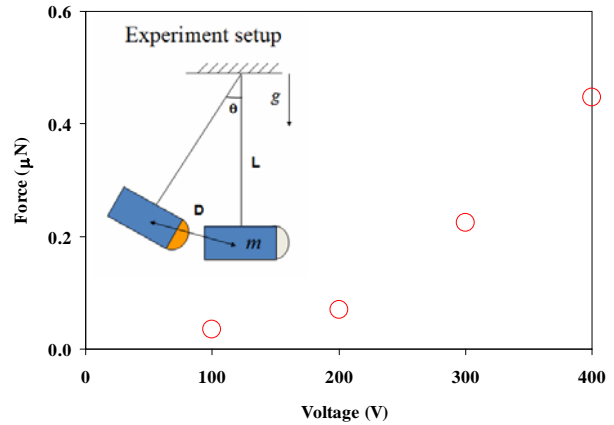


Fig. 4 Propelling force vs. voltage applied to the piezo-actuator. Bubble propelling force is proportional to the applied voltage. The propelling force is measured using the propelling displacement of the rod when hanging in the pendulum configuration.

3. 결론

진동하는 버블을 이용한 새로운 추진방법이 개발되었다. 본 추진방식은 외부에서 무선으로 로봇의 추진을 제어할 수 있기 때문에 추후 인체 내에서 움직이는 초소형 로봇의 추진방식으로 응용되어 향후 약물 전달(drug delivery)과 바이오 센싱(bio-sensing) 및 바이오 수술(bio-surgery) 등과 같은 응용분야들에 이용될 수 있으리라 판단된다.

후기

이 논문은 2009 년도 명지대학교 교내연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. B. Behkam and M. Sitti, "Bacterial flagella-based propulsion and on/off motion control of microscale objects," *Applied Physics Letters*, vol. 90, pp. 023902(1-3), 2007.
2. B. Kim, D. H. Kim, J. Jung, and J. O. Park, "A biomimetic undulatory tadpole robot using ionic polymer-metal composite actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, pp. 1579-1585, 2005.
3. W. F. Paxton, A. Sen, and T. E. Mallouk, "Motility of Catalytic Nanoparticles through Self-Generated Forces," *Chem. Eur J.*, vol. 11, pp. 6462-6470, 2005.
4. L. Zhang, J. J. Abbott, L. Dong, B. E. Kratochvil, D. Bell, and B. Nelson, "Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control," *Applied Physics Letters*, vol. 94, pp. 064107(1-3), 2009.
5. S. K. Chung and S. K. Cho, "On-chip manipulation of objects using mobile oscillating bubbles," *J. Micromech. Microeng.*, 18, 125024 (12pp), 2008.
6. Leighton, T.G., *The Acoustic Bubble*. 1997: Academic Press.
7. Sung Hee Ko, Seungjun Lee, Kwan Hyoung Kang (2009) "A synthetic jet produced by electrowetting-driven bubble oscillations in aqueous solution", *Applied Physics Letter*, 94(18). 194102.
8. van Wamel, A., Bouakaz, A., Versluis, M., and de Jong N., "Micromanipulation of endothelial cells: Ultrasound-microbubble-cell interaction," *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol. 30, No. 9, pp. 1255-1258, 2004.