

초음파장내 파괴적인 기포의 운동 가시화

김태홍* · 박근환* · 김호영†

Visualization of Disruptive Bubble Behavior in Ultrasonic Fields

Tae-Hong Kim, Keunhwan Park and Ho-Young Kim

Abstract. The bubble oscillations play an important role in ultrasonic cleaning processes. In the ultrasonic cleaning of semiconductor wafers, the cleaning process often damages micro/nano scale patterns while removing contaminant particles. However, the understanding of how patterns in semiconductor wafers are damaged during ultrasonic cleaning is far from complete yet. Here, we report the observations of the motion of bubbles that induce solid wall damage under 26 kHz continuous ultrasonic waves. We classified the motions into the four types, i.e. volume motion, shape motion, splitting or jetting motion and chaotic motion. Our experimental results show that bubble oscillations get unstable and nonlinear as the ultrasonic amplitude increases, which may exert a large stress on a solid surface raising the possibility of damaging microstructures.

Key Words: Ultrasonic cleaning(초음파 세정), Chaotic bubble oscillation(무작위적인 기포 진동), 패턴 손상 (Pattern damage)

기호설명

P_a : 음향 압력 진폭 (Pa)

R : 기포의 반지름 (μm)

R_0 : 선형 공진 반지름 (μm), Minnaerts 공식

1. 서 론

초음파 세정과정은 반도체 산업에서 포토마스크나 웨이퍼 세정에 광범위하게 사용되고 있다. 최근, 초음파에 의한 세정과정에서 미세입자들이 제거되는 과정을 직접 관찰한 Kim, et al⁽¹⁾의 논문을 통하여 미세 기포들의 운동이 세정과정에서 중요한 역할을 한다고 알려졌다. 그러나 반도체 세정과정 중 발생하는 미세 패턴의 손상 메커니즘에 대하여는 아직 정확하게 밝혀지지 않고 있다. 캐비테이션 기포에 의한 표면 손상에 대한 기존의 연구들은 주로 스파크나 레이저를 이용하

여 발생시킨 충격파에 의하여 기포들이 운동하는 양상의 관찰에만 집중되고 있다⁽²⁾. 하지만 초음파 세정에서 사용하는 음파는 충격파(impulse)가 아닌 연속파로서, 기포들의 응답 특성 또한 충격파와 다른 양상을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 26 kHz 주파수의 연속파에서 미세 기포의 운동을 관찰하고, 관찰된 기포들의 운동을 음압의 크기에 따라 나누어, 어떤 기포의 운동양상이 표면 손상에 관여하는 지를 알아 보았다.

2. 미세 기포 운동 가시화

2.1 실험장치 구성

미세기포의 운동을 관찰하기 위해 Fig. 1a와 같은 실험 장치를 구성하였다. 초음파 세정기로는 SUS Bath (폭 : 9.5 cm, 길이 : 15 cm, 높이 : 7 cm) 한쪽 면에 26 kHz의 연속파를 내는 진동자를 부착하였고 음향 압력 진폭은 바늘형태의 마이크로폰(Precision Acoustics HPM1/1)으로 측정하였다. 미세기포의 관찰은 업라이트 현미경(Olympus BX-51M)에 수중 대물 렌즈(Olympus LUMPLFL 20XW or 40XW)를 부착하여 초고속카메라(Photron APX-RS)로 최대 50,000 fps(frames per second)

†서울대학교 기계항공공학부

E-mail : hyk@snu.ac.kr

*서울대학교 기계항공공학부

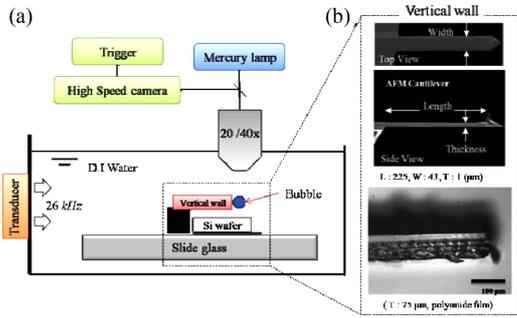


Fig. 1. Preparations for visualization experiments. (a) Schematic of the apparatus. (b) Vertical walls (AFM cantilever and Polyimide film) for observation of bubble motions.

로 촬영하였다. 또한 기포와 고체 표면의 상호작용을 측면에서 관찰하기 위하여 두 가지 종류의 수직벽(Fig. 1b)을 사용하였다. 한가지는 AFM(atomic force microscope)에 사용되는 실리콘 미세 외팔보로 폭 $43\ \mu\text{m}$, 길이 $225\ \mu\text{m}$, 두께 $1\ \mu\text{m}$ 를 가지며, 나머지 하나는 두께 $75\ \mu\text{m}$ 의 Polyimide 필름을 사용하였다.

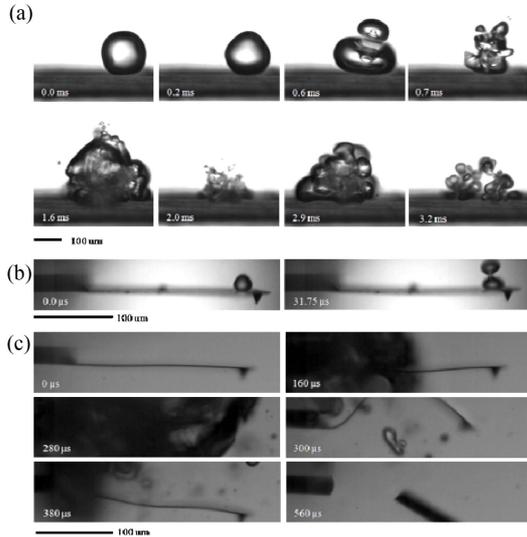


Fig. 2. High-speed images of bubble motion. (a) As P_a increases from 0 kPa to 35 kPa, various bubble motions were observed on the polyimide film. $R/R_0 \sim 1$ (b) A small bubble was split at 75 kPa. $R/R_0 < 0.2$ (c) Vigorous and chaotic motion of a resonance bubble at 75 kPa. At $560\ \mu\text{s}$, the AFM cantilever was broken. $R/R_0 \sim 1$

2.2 실험 결과

Fig. 2는 수직벽과 상호작용하는 미세입자의 운동을 보여주는 결과로 음향 압력 진폭이 증가함에 따라 다양한 기포 운동을 보여주고 있다. 본 연구에서는 관찰된 기포 운동 양상을 아래 네 가지로 구분하였다.

1. 부피 운동(Volume motion) : 기포의 반경방향 운동으로 Fig. 2a 첫 번째 프레임에 해당
2. 형상 운동(Shape motion) : 기포의 표면 진동 운동으로 Fig. 2a 두 번째 프레임 및 Fig. 3 첫 번째 열에 해당
3. 분리 또는 제트 운동(Splitting or jetting motion) : 기포가 분리되거나 분리 시 제트가 발생하는 운동으로 Fig. 2a 세 번째 프레임 및 Fig. 3 두 번째 열에 해당
4. 혼돈 운동(Chaotic motion) : 기포의 무작위적인 운동으로 Fig. 2a의 네 번째에서 여덟 번째 프레임에 해당.

음향 압력 진폭이 낮을 때, 기포는 순수하게 반경방향으로 진동을 하다가 점점 가진 압력이 증가함에 따라 표면 진동으로 바뀐다. 이때 표면 진동의 모드 수는 기포의 크기와 관계가 있으며, 기포의 크기가 클수록 모드 수는 증가한다. 가진 압력이 더 증가하면 기포는 표면 모드 수와 같은 수의 미세 기포로 분리된다⁽³⁾. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 음향 압력 진폭이 증가함에 따라 표면 진동 후, 기포 분리와 함께 제트가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 가장 높은 음향 압력 진폭에서 미세 기포는 격렬하고 무작위적인 운동을 보이며, 수 많은 기포들이 분리되고 다시 합쳐지는 과정을 반복하고 있다. 이런 무작위적 운동은 분석이나 예측이 힘든 상태로 혼돈 운동(Chaotic motion)의 특성을 보이고 있다. 결국 본 연구에서 관찰된 미세 기포의 운동은 음향 압력 진폭이 증가함에 따라 안정적인 반경 방향 운동에서 불안정하고 비선형적인 운동으로 바뀌며, 이때 고체벽에 큰 응력(stress)을 주어 미세구조물들이 파괴되는 것⁽⁴⁾임을 알 수 있다. Fig. 2b는 선형 공진 반지름보다 작은 미세기포($R/R_0 < 0.2$, $R_0 = 125\ \mu\text{m}$ @ $26\ \text{kHz}$)가 큰 음향압력 진폭에서 분리되는 과정을 보여주고, Fig. 2c는 선형 공진 반지름과 크기가 비슷한 미세 기포($R/R_0 \sim 1$)의 무작위적인 기포운동에 의하여 AFM 미세 외팔보가 부러지는 과정을 보여 주고 있다.

2.3 결과 토의

앞서 관찰된 기포의 거동 양상은 다음과 같은 과정

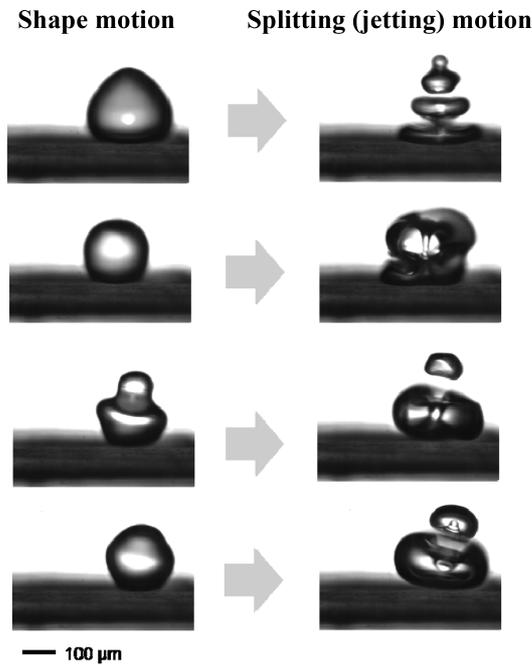


Fig. 3. As P_a increase from 0 kPa to 35 kPa which takes 100 μ s, the shape motion turns into the splitting or jetting motion.

을 통하여 진행되고 있다. 가진 압력이 작을 때, 구형의 반경방향 운동을 하던 미세기포들이 형상 안정성 (Shape stability) 이상의 압력이 가진 되면 구형 표면의 초기 미세한 변형 (small perturbations)들이 짧은 시간 동안 발달하여 표면진동을 발생시키고⁽⁵⁾, 가진 압력이 더 증가하여 외부에서 유체내로 유입되는 에너지가 증가하면 미세기포의 운동은 이 에너지를 소산시키는 쪽으로 발달하게 된다. 증가한 에너지는 미세기포의 팽창과 수축에 의한 운동에너지 (kinetic energy) 소산과 미세기포들이 더 작고 많은 기포 파편 (fragments)으로 쪼개지면서 필요한 표면자유에너지 (surface free energy)로 사용되어⁽⁶⁾, 가진 압력이 증가 할수록 미세기포의 팽창과 수축은 더 격렬해지고 더 많은 수의 기포 파편들이 생성되어 서로 상호 작용에 의하여 무작위적인 기포 거동 양상을 보이게 된다.

3. 결 론

본 연구에서는 패턴손상과정에서 중요한 역할을 하는 기포의 운동을 관찰하기 위하여 연속파를 가진한 초음파 세정기속에서 음향 압력 진폭에 따라 기포의 운동을 관찰하였다. 음향 압력 진폭이 낮을 때 기포는 안정적인 반경방향운동을 하지만 점점 압력 진폭이 증가함에 따라 표면 진동, 기포 분리 및 제트를 형성하며 결국 불안정하고 비선형적인 운동으로 바뀌어 미세구조물에 큰 응력을 주어 패턴을 손상하게 된다.

후 기

본 연구는 (주)삼성전자와 서울대학교의 산학협력 (0591-20090021)와 한국연구재단 대학중점연구소지원사업 (J03001) 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 1) W. Kim, T.-H. Kim, J. Choi, H.-Y. Kim, 2009, "Mechanism of particle removal by megasonic waves," *Appl. Phys. Lett.*, 94, 081908
- 2) W. Lauterborn, W. Hentschel, 1985, "Cavitation bubble dynamics studied by high speed photography and holography: part one," *Ultrasonics*, Vol. 23, Issue 6, p. 260
- 3) M. Versluis, S.M.V. Meer, D. Lohse, P. Palanchon, D. Goertz, C.T. Chin, N. D. Jong, 2004, "Microbubble surface modes," *2004 IEEE Ultrasonics Symposium*, p. 207.
- 4) C.D. Ohl, M. Arora, R. Dijkink, V. Janve, D. Lohse, 2006, "Surface cleaning from laser-induced cavitation bubbles," *Appl. Phys. Lett.*, 89, 074102
- 5) M. Versluis, D. E. Goertz, P. Palanchon, I. L. Heitman, S. M. V. Meer, B. Dollet, N. D. Jong, D. Lohse, 2010, "Microbubble shape oscillations excited through ultrasonic parametric driving," *Phys. Rev. E.*, 82, 026321
- 6) C. E. Brennen, 2002, "Fission of collapsing cavitation bubbles," *J. Fluid Mech.*, Vol. 472, p. 153-166