

열 기포에 의한 고체 박막의 변형 해석

김 호 영* · 이 윤 표*
(2002년 8월 23일 접수, 2002년 12월 14일 심사완료)

Deflection of a Thin Solid Structure by a Thermal Bubble

Ho-Young Kim and Yoon Pyo Lee

Key Words: Thermal Bubble(열 기포), Microactuator(마이크로구동기), Cantilever Beam(외팔보), Surface Tension(표면장력)

Abstract

Thermal bubbles find their diverse application areas in the MEMS (MicroElectroMechanical Systems) technology, including bubble jet printers, microactuators, micropumps, etc.. Especially, microactuators and micropumps, which use a microbubble growing by a controlled heat input, frequently involve mechanical and thermal interaction of the bubble with a solid structure, such as a cantilever beam and a membrane. Although the concept is experimentally verified that an internal pressure of the bubble can build up high enough to deflect a thin solid plate or a beam, the physics of the entire process have not yet been thoroughly explored. This work reports the experimental study of the growth of a thermal bubble while deflecting a thin cantilever beam. A physical model is presented to predict the elastic response of the cantilever beam based on the experimental measurements. The scaling law constructed through this work can provide a design guide for micro- and nano-systems that employ a thermal bubble for their actuation/pumping mechanism.

1. 서 론

21세기의 공학기술 중 많은 관심을 모으고 있는 MEMS(MicroElectroMechanical Systems) 분야에서 마이크로 기포를 이용한 microfluidics 기술은 다양한 분야에서 응용될 수 있는 가능성을 지니고 있다. 일상 생활에서 가장 흔히 발견할 수 있는 MEMS 기기의 하나인 잉크젯 프린터 헤드 칩의 경우 잉크 체임버에 수백개의 초소형 채널이 연결되어 있으며, 각 체임버는 저항성 가열 소자로 급격히 가열되어 잉크 기포를 형성시켜 액적을 밀어내게 된다. Lin 등⁽¹⁾은 절연성 액체에 잠

긴 마이크로 히터에서 열을 발생시켜 마이크로 기포를 만든 뒤, 성장하는 기포가 히터 표면에서 수 마이크로미터 떨어져 있는 고체 박막을 밀어냄을 보임으로써 이러한 개념이 마이크로구동기(microactuator)로 구현될 수 있음을 보였다. Bergstrom 등⁽²⁾은 마이크로 캐비티 내에서 액체를 증기로 상변화시키고 이로 인한 압력증가를 이용하여 캐비티 벽의 박막을 휘게 함으로써 구동기로의 응용가능성을 보였다. 또한 이와 유사한 개념을 이용하여 박막에 압전물질을 삽입하고, 외부에서 가해지는 열에 의해 일어나는 액체의 상변화로 인한 압전막 변형으로 인하여 생성되는 전하를 집적함으로써 마이크로 발전기로 사용될 수 있음이 Xu 등⁽³⁾에 의하여 제안되었다.

위에서 예로 든 마이크로 기포를 이용한 MEMS기기 중 상당수가 마이크로 기포와 고체, 특히 얇은 고체막과의 기계적인 상호작용을 이용하고 있음을 알 수 있다. 이는 마이크로 스케일

† 책임저자, 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터
E-mail : hoyoung@kist.re.kr

TEL : (02)958-5673 FAX : (02)958-5689

* 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

에서는 거시현상에 비하여 마찰력의 영향이 매우 증가하여 기계적인 움직임을 구현하는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라 비효율적인 것에 주된 이유가 있다고 할 수 있다. 또한 잉크젯 프린터 헤드 칩의 발전에서도 볼 수 있듯이 마이크로 기포의 성장 제어가 정밀하게 이루어질 수 있기 때문에 향후 연구개발에 의해 시간적, 공간적으로 높은 정밀도가 요구되는 구동기나 에너지 변환기(열에너지로부터 운동에너지 또는 탄성에너지로의 변환)에 사용될 수 있는 가능성이 충분히 큼을 이해할 수 있다. MEMS 기기에 적용할 수 있는 고정밀도와 높은 제어 성능을 가진 마이크로 기포와 고체 박막을 이용한 시스템을 구현하기 위해서는 이러한 현상에 대한 체계적인 물리적 이해가 필수불가결하다. 그러나 현재까지는 실험 장치가 마이크로 스케일이라는 크기의 제약을 받기 때문에 작동가능성을 먼저 시험하는 연구 정도만이 보고되어 온 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기포의 성장에 의해 고체 박막이 변형되는 현상에 관한 관찰 및 측정을 수행하여 이 현상의 해석을 위한 기본 설명을 제안하고자 한다. 시간에 따른 기포의 성장과 박막 변형을 정확히 관찰하기 위하여, 실제 MEMS 응용시에 사용될 것으로 추정되는 수십내지 수백 마이크로미터 크기보다 약 10배 정도 확대한 모형(수백~수천 마이크로미터)에 대한 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 바탕으로 박막 변형에 관한 간단한 이론식을 제안하고 다양한 관찰 결과에 대한 논의를 진행하였다.

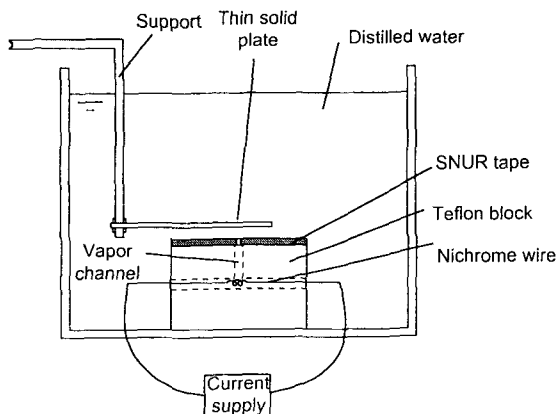


Fig. 1 Experimental setup

2. 실험장치 및 결과

Figure 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험 장치는 마이크로 기포를 생성하기 위하여 열을 발생시키는 전열선(니크롬선)과 이를 지지하고 기포를 위로 안내하는 채널을 가진 테프론 블록, 그리고 블록의 윗면과 일정한 거리를 두고 위치한 고체박막과 지지대로 이루어져 있다. 테프론 블록 표면 위에는 Snur[®] 은박테이프를 붙이고 지름 400 μm 의 구멍을 뚫었다. 지름이 400 μm 인 니크롬선에 전류발생기(Agilent Technologies E3633A)를 이용하여 일정전류를 공급하여 증류수를 증기로 상변화시킨 후, 수직 방향의 채널을 통하여 400 μm 지름의 구멍으로부터 기포가 발생되도록 하였다. 이러한 방식으로 지정된 위치에서 기포가 생성되고 성장하도록 제어하는 것이 가능하였다. 이 장치는 테프론으로 만든 수조에 담겨 있으며, 수조의 앞면은 광학적인 관찰을 위하여 투명한 아크릴로 이루어져 있다. 기포의 성장과 박막의 변형을 측정하기 위하여 고속 비디오 카메라 시스템(Redlake PCI 2000S)을 사용하여 초당 60 프레임의 이미지를 녹화하였다. 실험 후 이미지 해석 소프트웨어를 이용하여 각 프레임에서 기포의 지름, 박막의 변형 등에 대한 측정을 수행하였다.

전열선에 공급되는 전류는 기포가 규칙적으로 발생할 만큼 충분히 크고 동시에 니크롬선이 과열되지 않는, 4.3 A로 고정하였다. 전열선의 저항은 1.5 Ω 로서, 전열선에 공급되는 전력은 28 W이다. 고체 박막의 재료로는 스테인레스 스틸 304를 이용하였고 두께는 50 μm 이다. Figure 2에서 보이는 바와 같이 변형이 쉽게 될 것으로 예상되는 T형 박막과 가공이 쉬운 일자형의 두가지 형태의 박막을 시험하였다. 기포가 성장하는 동안 충분히 압력을 받을 수 있도록 박막의 폭

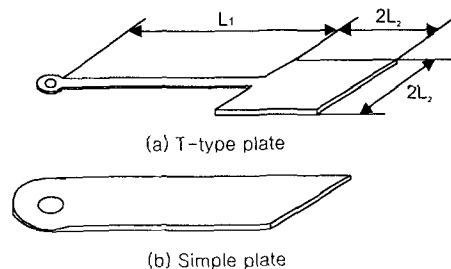


Fig. 2 Configurations of thin solid plates

$2L_2$ 를 5.2 mm로 두었다. 이는 박막이 없을 경우 본 실험에서 사용된 히터에서 발생한 기포가 고체 표면에 붙어서 최대한 성장하는 지름의 약 두 배에 해당한다. 특히 T형 박막의 경우 지지대와 판을 연결하는 보(beam)의 길이 L_1 이 4.7 mm와 9.6 mm인 두가지 경우를 시험하여 4.7 mm 길이의 보를 가진 박막의 변형이 매우 작음을 확인하였다. 여기서 보의 너비는 1 mm로 일정하게 하였다. 뿐만아니라 일자형 박막의 경우도 기포에 의한 변형이 아주 작아서, 여기서는 보의 길이가 9.6 mm이고, 연결된 정사각형판의 한 변의 길이가 5.2 mm인 T형 박막에 관한 결과를 제시한다. 또한 기포가 발생하기 전의 보와 히터 표면사이의 거리를 0.36 mm로 두었다.

Figure 3은 이러한 T형 박막이 기포의 성장에 의하여 위로 변형되고 기포가 빠져나감에 따라 다시 아래로 내려오는 과정을 촬영한 이미지이다. 그림 왼쪽의 시간은 기포가 생성된 후 흐른 시간을 나타낸다. 전열선에 전류가 공급되는 한 이와 같은 과정이 끊임없이 일정한 주기를 가지고 반복하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 때, 기포가 처음 생성되는 구멍을 박막의 넓은 면의 정확한 중심이 아니라 약간(1mm 이내) 지지대 쪽으

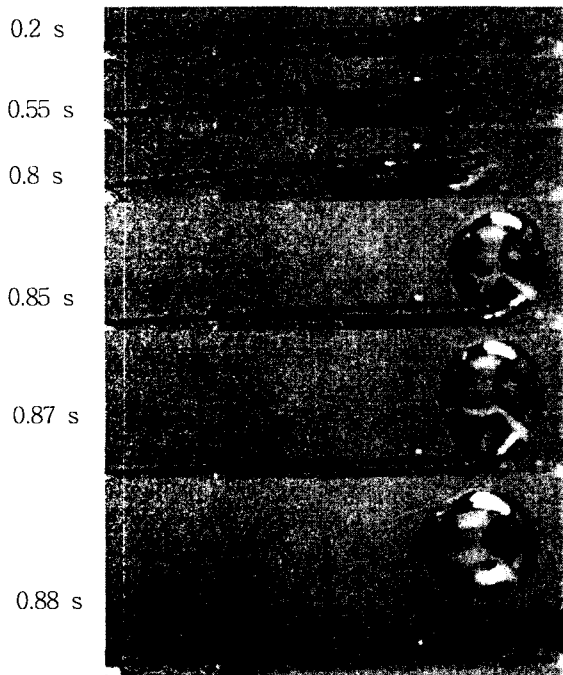


Fig. 3 Images of a growing vapor bubble and a deforming solid plate.

로 움직인 곳에 위치시켰다. Lin 등⁽²⁾은 기포가 박막을 효과적으로 밀어내기 위하여 박막의 중심에 기포를 발생시켰지만, Fig. 3에서 관찰되는 바는 이와 다른 현상을 내포한다고 할 수 있다. 즉 본 실험과 같이 기포가 지지대에 가까운 쪽에서 발생한다고 하여도, 박막의 변형에 의하여 지지대에서 멀어지는 쪽의 액체 압력이 더 낮아지기 때문에 기포의 중심은 원래 생성위치에 머물러 있지 않고 지지대에서 멀어지는 쪽으로 움직여 간다는 것이다. 따라서 기포가 박막의 넓은 면의 중심보다 지지대에 가까운 쪽에서 생성하는 것이 기포와 박막의 상호작용을 최대화하는데 도움을

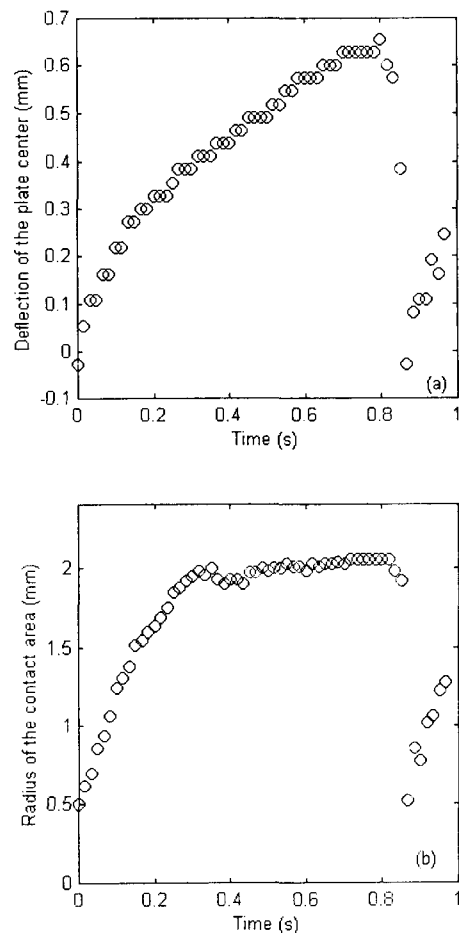


Fig. 4 Measurement results for the evolution of (a) the deflection of the center plate and (b) the radius of the bubble/plate contact area with time.

줄 수 있다고 할 수 있다.

위의 실험에서 얻은 이미지를 이용하여 시간에 따른 박막의 변형과 기포와 박막이 접촉하는 면의 반지름을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 박막은 기포가 처음 성장할 때부터 기포가 빠져나갈 때까지 계속해서 위로 변형을 계속하다가 기포가 빠져나가는 순간 탄성에 의하여 급격히 아래로 내려오는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상을 *spring-back*이라고 한다. 아래로 내려오는 도중 바닥면에서 새로운 기포가 형성되고 이와 만나면서 박막은 *spring-back*을 멈추고 다시 위로 변형이 되는 새로운 주기를 곧바로 시작하게 된다. 그러나 한 주기동안 계속되는 박막의 변형 증가에 반하여, 기포와 박막의 접촉면적은 일정수준까지 증가하다가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 박막의 넓은 면은 5.2 mm의 둘레를 가지고 있어 지름은 최대 5.2 mm까지 증가할 수 있으나 위에서 설명한 바와 같이 압력이 상대적으로 낮은 바깥 쪽으로 기포가 이동하려는 경향이 있어 최대 4.1 mm까지만 접촉면적이 증가하는 것을 볼 수 있다. 기포와 박막의 접촉면적이 일정한 가운데서도 박막의 변형 증가가 계속되는 원인등에 대한 이론적 고찰이 아래에 논의되어 있다.

3. 이론 해석

기포의 성장에 따른 박막의 변형을 Fig. 5(a)와 같이 나타내었다. 엄밀한 의미에서 박막의 보에 연결되어 있는 평판은 기포내의 압력에 의하여 일정한 면적에 걸쳐 분산된 힘을 받게 된다. 그러나 해석의 편의를 위하여 기포가 박막에 미치는 힘을 평판의 중심점에 미치는 집중하중이라고 모델링하면, 집중하중 F 와 평판 중심점의 탄성 변형 δ 사이에는 다음의 관계가 만족한다.⁽⁴⁾

$$\delta = F \left[\left(\frac{L_1^2 + L_1 L_2}{2EI_1} \right) \left(\frac{2}{3} L_1 + L_2 \right) + \left(\frac{L_1 L_2}{2EI_1} \right) \left(\frac{1}{3} L_1 + L_2 \right) + \frac{L_2^3}{3EI_2} \right] \quad (1)$$

여기서 L_1 과 L_2 는 Fig. 2에 나온 바와 같고, E 는 박막의 탄성계수(Young's modulus), I_1 과 I_2

는 각각 보와 평판의 회전관성(moment of inertia)을 나타낸다. 박막의 운동의 영향, 즉 관성력과 항력(drag force)을 무시할 정도로 박막의 속도가 느리고 기포의 상하 양단에서 발생하는 정수력학적(hydrostatic) 압력을 무시할 정도로 기포가 작을 경우, 박막을 변형시키기 위한 힘 F 와 기포 내부의 압력에 의한 힘이 평형을 이룬다고 할 수 있다. 기포 내부의 압력에 의한 힘은 기포 압력과 주위 압력의 차이에 의하여 발생하며 이 압력의 차이 ΔP 는 Young-Laplace 식에 의하여⁽⁵⁾

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{R} \right) \quad (2)$$

와 같이 표시되며 여기서 σ 는 표면장력, a 와 R 은 Fig. 5에 나타낸 바와 같은 기포면의 곡률반경이다. 여기서 곡률반경 a 는 Fig. 5 (b)에서 보인 바와 같이 초기 박막과 바닥사이의 간격 h 와 평판 변형 δ , 그리고 접촉각 θ 에 의하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$a = \frac{h + \delta}{2 \cos \theta} \quad (3)$$

기포내외의 압력 차이에 의해서 박막을 위로 밀어올리는 힘은 ΔP 에 접촉면적을 곱한 것과 같으므로 다음과 같은 힘의 평형식을 얻을 수 있

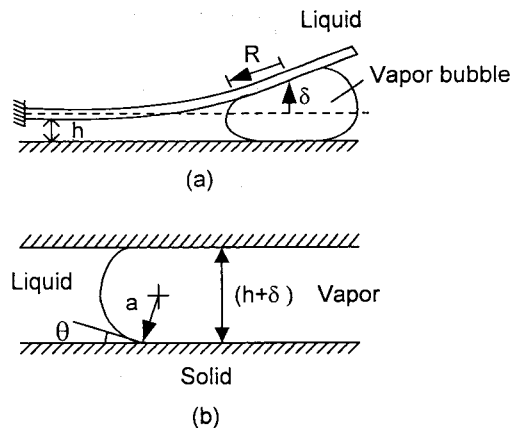


Fig. 5 (a) A schematic of the deflecting plate due to a growing bubble. (b) The radius of curvature of the meniscus.

다.

$$k\delta = \pi R^2 \sigma \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{R} \right) \quad (4)$$

여기서 k 는 식 (1)을 $F = k\delta$ 로 나타냈을 때의 등가스프링계수이다. 식 (4)에 식 (3)을 대입하고 δ 에 관하여 풀면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{2} \left[(h - \beta R)^2 + 4\beta R(2R\cos\theta + h) \right]^{1/2} - \frac{(h - \beta R)}{2} \quad (5)$$

여기서 $\beta = \pi\sigma/k$ 이다.

식 (5)에서 볼 수 있듯이 주어진 재료와 초기 형상에서 박막의 변형 δ 는 기포의 반지름 R 과 접촉각 θ 에 의하여 결정된다고 할 수 있다. 접촉각 θ 는 고/액/기체의 3상이 만나는 접촉선과 고체면이 이루는 각도로서, 액적이 평평한 고체면에 놓여져 있는 것과 같은 평형 상태에서 얻어지는 각도를 평형접촉각(equilibrium contact angle)이라고 하고, 접촉선이 움직일 때 이루어지는 각도를 동적접촉각(dynamic contact angle)이라고 한다. 액체가 기체를 밀어내면서 움직일 때 생기는 접촉각을 전진접촉각(advancing contact angle), 기체가 액체를 밀어낼 때의 접촉각을 후진접촉각(receding contact angle)이라고 부른다. 일반적으로 전진 접촉각은 평형접촉각보다 크고 후진 접촉각은 평형접촉각보다 작으며 이러한 현상에 의해 접촉각 히스테리시스(contact angle hysteresis)가 일어나게 된다.⁽⁶⁾ 본 실험에서 사용된 액체와 고체면 사이의 평형 접촉각을 부동액적방법(sessile drop method)을 이용하여 구한 결과 증류수와 은박테이프표면의 경우 약 40° 그리고 증류수와 스테인레스 표면의 경우 약 83° 의 값을 가짐을 알 수 있었다. 접촉각 측정의 오차는 약 $\pm 2^\circ$ 이다. 여기서 볼 수 있듯이 식 (3)은 기포의 상하면에서 같은 접촉각을 가진다고 가정하였으나 실제 실험에서는 서로 다른 고체 표면과 접촉하기 때문에 상하면의 접촉각이 다르다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 수행한 모델링의 타당성을 검토하기 위하여 시간에 따른 접촉면의 반지름 측정 데이터(Fig. 4(b))를 식 (5)에 대입하여 구한 박막의 변형 δ 를 구하여 Fig. 4(a)에 보인 바와 같은 실험 결과와 비교하여 이를 Fig. 6에 나타내었다.

박막의 변형에 대한 접촉각의 영향을 알아보기 위하여 θ 에 0° , 30° , 45° 및 60° 의 값을 대입하여 각각의 결과를 구하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기(0.35초 이내)에는 $\theta = 60^\circ$ 에 해당하는 계산 결과가 실험치와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 기포의 하부는 접촉각 40° 의 은박 표면과, 상부는 접촉각 83° 의 스테인레스 표면과 접촉한다는 것을 상기할 때, 접촉각의 평균값에 근접한 접촉각을 사용하여 실제 현상을 근사하게 대표할 수 있는 a 값이 사용되었기 때문이라고 보여진다.

시간이 0.35초 경과한 후에는 고정된 접촉각을 이용하여 계산한 δ 가 일정하게 유지되는 반면 실험적으로 구한 박막의 변형은 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 고정 접촉각에서 계산된 δ 가 일정하게 유지되는 이유는 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 0.35초 이후부터 기포가 박막과 바닥 사이를 빠져나갈 때까지 실험적으로 측정된 R 이 일정하게 유지되기 때문이다. 따라서 R 이 일정하게 유지되는 조건에서 δ 가 증가하기 위해서는 접촉각이 감소해야 한다. 즉 한정된 평판의 넓이로 인하여 기포의 접촉선이 평판의 끝부분에 도달하면 기포/평판 접촉면이 더 이상 증가하지 못한 상태에서 수증기가 계속적으로 주위 액체를 밀어내려고 하는 힘이 작용하게 된다. 접촉선이

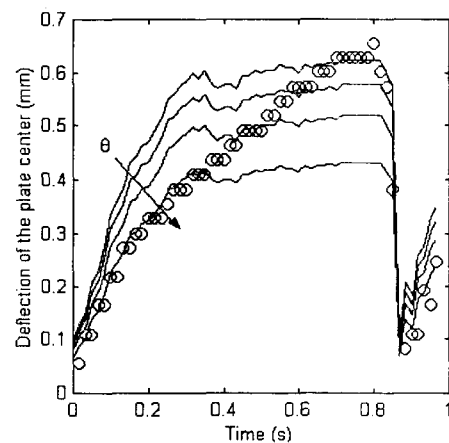


Fig. 6 Comparison the experimental results with the theoretical predictions.

Along the arrow θ varies as 0° , 30° , 45° , and 60° .

고정되어 있으므로 이러한 힘은 액체와 수증기가 만나는 자유표면(free surface)을 점점 액체 쪽으로 밀어내게 되고, 결과적으로 접촉각이 감소하게 된다. 이러한 물리적 기구에 의하여 기포가 발생할 수 있는 최대의 변형은 $\theta=0$ 에서의 δ 에 해당한다. 이러한 설명은 Fig. 6에서 매우 잘 검증된다. 즉 기포는 0.35초에 최대 접촉면에 도달한 뒤 점점 접촉각이 감소하다가 0이 될 때 최대의 변형을 발생시키며 이 값은 계산치와 잘 일치한다. 접촉각이 0인 상태에서 기포의 압력이 더욱 증가하면 Fig. 5에 나타낸 시스템으로는 이를 수용할 수 없으며, 따라서 기포는 상대적으로 압력이 낮은 바깥쪽으로 빠져나오게 되고 부력에 의해 위로 떠오르게 된다.

본 연구에서 사용된 실험장치는 전기에너지로 열에너지로, 이를 다시 박막의 탄성에너지로 바꾸는 에너지변환 장치로도 간주할 수 있다. 위에서 언급하였듯이 열선에 공급되는 전력은 28 W로서 박막이 변형되는 주기인 0.8초동안 22 J의 전기에너지가 공급된다. 박막이 최대로 변형되었을 때의 기포 크기를 기준으로 액체를 기포로 변환하기 위하여 공급된 잠열을 계산하면 6.2 mJ이 된다. 즉 공급된 열의 대부분이 히터 주변으로 발산되는 것을 알 수 있다. 박막이 최대로 변형되었을 때 저장되는 굽힘변형에너지(bending strain energy)는, 탄성학의 기본 이론⁽⁷⁾을 이용하여 4.5 μ J임을 계산할 수 있다.

본 해석 모델에서는 박막의 운동의 영향, 즉 관성력과 항력(drag force)을 무시할 정도로 박막의 속도가 느리다고 가정하였는데 여기서 이 가정의 타당성을 검토해 본다. 본 연구에서는 기포의 압력에 의한 외력이 박막의 탄성력과 평형을 이룬다고 가정하였으므로 관성력과 항력의 크기를 탄성력과 비교하여야 한다. 탄성력 F_k 의 크기는 $F_k \sim k\delta_{max} = 0.1$ mN로 쓸 수 있으며, 이때 δ_{max} 는 박막의 최대변형을 나타낸다. 항력은 $F_d \sim c\delta_{max}/T$ 로 스케일링 할 수 있는데, 항력계수 c 는 $c = 16\mu(L_1/2)$ 로 추정하며⁽⁸⁾, T 는 주기를 나타낸다. $F_d \sim 36$ nN으로 F_k 에 비하여 매우 작음을 알 수 있다. 한편 관성력 F_i 는 $F_i \sim m\delta/T^2$ 로 스케일링할 수 있으며, m 은 폭 5.2 mm의 정사각형판의 질량으로 둔다. $F_i \sim 13$ nN

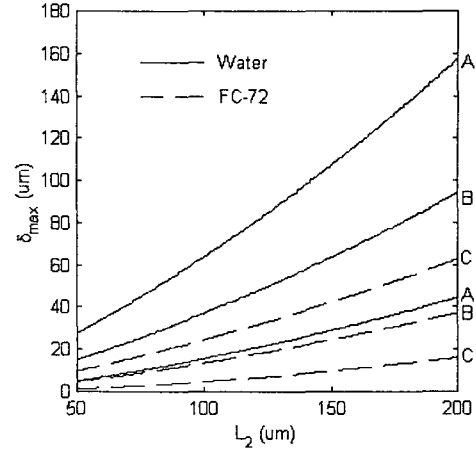


Fig. 7 The maximum plate deflection for varying plate thickness and plate dimension.

으로 구해지며 이 또한 F_k 에 비하여 매우 작기 때문에 본 연구의 가정이 타당함을 알 수 있다.

위에서 제시된 모델링을 바탕으로 하여 주어진 시스템에서 기포의 성장에 의해 얻을 수 있는 박막의 이론적인 최대 변형을 추정할 수 있다. 즉 식 (5)에서 접촉각 $\theta=0$ 을 대입하고, R 이 가질 수 있는 최대값을 대입하면 δ 의 최대값을 계산할 수 있다. 위에서 언급되었듯이 R 이 이론적으로 가질 수 있는 최대값은 정사각형 평판 길이의 반, 즉 $R=L_2$ 이지만 실제로는 기포의 이동으로 인하여 이보다 항상 작은 값을 가지게 된다. 따라서 박막이 평판 중심점에서 가질 수 있는 최대 변형 δ_{max} 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta_{max} = \frac{1}{2} \left[\frac{(h + \beta L_2)^2 + 8\beta L_2^2}{(h - \beta L_2)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 다양한 액체와 고체의 조합에서 설계 변수의 변화에 따른 δ_{max} 변화의 경향을 살펴 볼 수 있다. Fig. 7에서 액체로는 물과 비전도성 유체 FC-72($\sigma=0.012$ N/m)를 이용하고, 고체로는 실리콘($E=190$ GPa)을 이용하였을 경우의 δ_{max} 를 L_2 와 박막 두께에 관하여 계산

한 결과를 도시하였다. 이때 h 는 $10 \mu\text{m}$, L_1 은 $800 \mu\text{m}$, 박막의 폭은 $40 \mu\text{m}$ 로 두어 마이크로 스케일에서 박막이 변형되는 현상을 예측하고자 하였다. 그림에서 A, B, C는 각각 박막 두께가 $7.5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, 그리고 $15 \mu\text{m}$ 임을 나타낸다. Fig. 7에서 δ_{max} 가 박막 두께에 매우 민감하게 영향받는 것을 볼 수 있는데 이는 식 (6)에 나오는 β 를 결정하는 k 가 두께의 세제곱에 비례하는 회전 관성을 포함하고 있기 때문이다. 액체의 영향은 표면장력의 차이에 의해 발생하며 표면장력이 크면 클수록 δ_{max} 가 커지는 것을 쉽게 알 수 있다. 또한 L_2 가 증가함에 따라 기포의 최대 반지름이 증가하여 δ_{max} 가 증가한다. Fig. 7에서 볼 수 있듯 박막의 전체 길이가 약 1mm 내외일 경우 수십에서 수백 마이크로미터의 박막 변형을 기포를 이용하여 발생시킬 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 액체에 열을 가하여 증발하는 수증기 기포의 성장으로 인하여 이와 인접한 고체 박막이 변형되는 현상에 대한 실험적 그리고 이론적 고찰을 수행하였다. 고속 카메라 촬영을 이용하여 시간에 따른 기포의 성장과 고체 박막의 변형을 녹화하고 측정하여 기포/평판의 접촉면은 일정 시간 이후에 일정하게 유지되지만 박막의 변형은 계속해서 증가하는 현상을 관찰하였다. 고체 박막의 탄성학적 거동과 기포내외의 압력차를 계산하여, 힘의 평형식으로부터 박막 변형과 기포/평판 접촉 반지름사이의 관계를 유도하였다. 실험결과와 이론식을 비교한 결과 초기 접촉 반지름이 증가하는 동안은 기포/액체의 자유 표면이 평형 접촉각을 유지하며 박막이 변형되다가, 접촉 반지름이 최대에 도달하면 접촉각

이 0으로 감소할 때까지 박막의 변형이 계속됨을 알 수 있었다. 이러한 발견에 근거하여, 주어진 액체/박막 시스템에 대하여 최대의 변형을 예측할 수 있는 식을 유도하였다. 이 식을 이용하여 물과 비전도성 유체 내에서 마이크로 실리콘 빔의 기포에 의한 최대 변형을 예측하였다.

참고문헌

- (1) Lin, L., Pisano, A. P., and Lee, A. P., 1991, Microbubble powered actuator, *IEEE Transducers '91*, Piscataway, NJ, USA, pp. 1041~1044.
- (2) Bergstrom, P. L., Ji, J., Liu, Y.-N., Kaviany, M., and Wise, K. D., 1995, Thermally driven phase-change microactuation, *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 4, pp. 10~17.
- (3) Xu, C., Hall, J., Richards, C., Bahr, D., and Richards, R., 2000, Design of a micro heat engine, *Proceedings of IMECE 2000 - MEMS* Vol. 2, pp. 261~267.
- (4) Beer, F. P., and Johnston, Jr., E. R., *Mechanics of materials*, McGraw-Hill.
- (5) Adamson, A. W., and Gast, A. P., 1997, *Physical chemistry of surfaces*, 6th ed. Wiley, New York.
- (6) Dussan V.. E. B., 1979, On the spreading of liquids on solid surfaces: Static and dynamic contact lines, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 11, pp. 371~400.
- (7) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill, Singapore.
- (8) Happel, J. and Brenner, H., 1965, *Low Reynolds Number Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.