

유리기층의 레이저 텍스처링에 의한 미소융기의 형성

김동식, 오부국
포항공과대학교 기계공학과

Microbump formation during laser texturing of glass substrates

D. Kim, B. Oh

ABSTRACT

Microbump formation during CO₂ laser texturing of glass substrates is examined in this paper. Experimental results show that different bump shapes (dome-shaped, with a central dimple, and with a peripheral rim) are generated depending on the laser fluence. A theoretical model for the process is suggested based on thermoelastic behavior but limited only to the dome-shaped bump. The dimensions (maximum height and base area) of the bump shows a logarithmic dependence on laser fluence as expected from the theory. Numerical computation reveals that the effect of thermal diffusion is not negligible for relatively long laser pulses.

Key words: bump formation, laser texturing, glass, thermal expansion, thermal diffusion effect.

1. 서 론

컴퓨터에서는 정보를 저장하고 읽는 장치로 하드디스크가 중요한 역할을 한다. 하드디스크에 저장된 데이터를 읽어내기 위해 헤드(head)가 접근하게 되는데 이런 과정은 안착지점(landing zone)에서 헤드를 기판으로부터 띄고 움직임으로서 가능하게 되는데 헤드와 기판사이에 표면이 매우 매끄럽기 때문에 생기는 stiction force 때문에 잘 이탈되지 않게 된다. 이것을 방지하기 위해 안착 지역 내에 여러 개의 미소융기를 만들어 놓음 으로서 그러한 현상을 방지하는 기술이 요구되어지고 현재 많은 NiP나 알루미늄계열의 기판에 대해서는 사용되고 있으나 내구성이

나 우수한 표면 조도를 가진 유리에 대한 연구가 미흡한 단계이다.¹⁾ 따라서 본 연구에서는 유리재질의 기초적인 실험자료를 확보하는 데에 의의가 있으며 CO₂ 레이저에 의한 유리 기층의 미소융기 생성의 기구를 이론적으로 파악하고 실험 결과와 비교해 봄으로써 미소융기 생성의 원인과 미소융기 형상의 변화에 대한 원인을 파악하고자 한다. 또한 본 연구는 Shiu 등 (1999) 의 모델에서 이론적 도입이 있었으나 열확산을 무시한 Shiu²⁾ 의 이론과 열확산의 효과를 고려한 경우의 수치계산결과와 비교를 통해 이론을 검토해 보았다.

2. 이 론

유리기판에 레이저를 이용해서 급격한 에너지를 조사할 경우 유리는 녹게 되고 레이저 조사 후 급격한 냉각을 경험하게 된다. 그러나 보통의 경우에 액체유리의 열팽창계수(β_l)가 냉각과정에서의 유리의 열팽창계수(β_g) 보다 크다. 따라서 이러한 개념을 수식화 하기 위해 Fig. 1~2로부터 다음과 같은 온도-체적 선도를 통해서 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.²⁾

$$\Delta V \equiv (\beta_l - \beta_g)V_0(T_g - T_g^*) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 ΔV 는 증가된 체적, V_0 는 초기체적, T_g^* 는 녹는점이고 T_g 는 탄성한도 온도로서 일단 이 온도를 넘어서 후 냉각하게 되면 다른 열팽창계수를 가지고 냉각과정을 거치게 된다. 또한 반경방향으로 대칭이라고 가정한다면 용기의 높이는 다음과 같다.

$$\Delta h(r) = (\beta_l - \beta_g)h_0(r)(T_g - T_g^*) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 가해지는 레이저빔의 형상은 가우시안 빔이며 단위체적 및 시간당 흡수되는 레이저 에너지 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$g(r, z) = a(1-R)\frac{2P}{\pi w^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right) \exp(-az) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 R은 반사율, w은 1/e2빔반지름, P는 레이저 출력, a는 흡수 계수 (absorption coefficient) 로서 $1/a = \lambda/4\pi\kappa$ (λ :레이저파장, κ : 재료의 extinction coefficient) 로 정의되고 광학적 침투깊이를 나타낸다. 또 열 확산의 효과를 무시하고 계산하면 다음과 같이 반경방향 좌표 함수로의 최대온도 (표면온도) 를 구할 수 있다. (τ_p : 펄스폭, ρ : 밀도, C_p : 비열) 또 표면온도를 경계조건으로 하고 깊이방향으로 감소하는 열생성항, 식(3),을 가지는 반무한 열전도 방정식을 풀어보면 $h_0(r) = 1/a \ln(T_{peak} / T_g)$

$$T_{peak}(r) = \frac{g\tau_p}{\rho C_p} = \frac{a(1-R)F_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right)}{\rho C_p}$$

where $\left(F_0 = \frac{2P\tau_p}{\pi w^2}\right) \dots\dots\dots (4)$

의 관계를 얻을 수 있고 이 식과 식(4) 를 식(2)에 대입하면 용기의 높이와 직경을 식(5)와 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

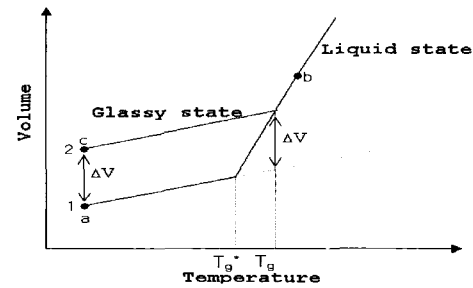


Fig.1. Phase (temperature-volume) diagram of glass

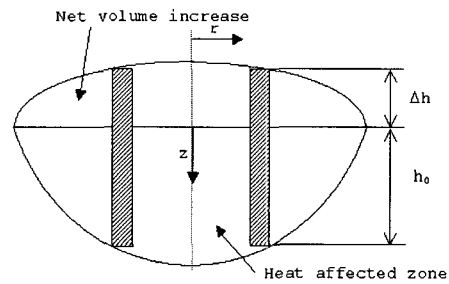


Fig.2. Heat affected zone and height of bump as a function of radius

$$\Delta h(r) = C \ln \left[\frac{F_0}{F_{0,th}} \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right) \right] \dots\dots\dots (5)$$

$$d_b = \sqrt{2}w \sqrt{\ln \left(\frac{F_0}{F_{0,th}} \right)} \dots\dots\dots (6)$$

윗 식에서 상수들은 다음과 같이 정리된다.

$$C = \frac{(\beta_l - \beta_g)(T_g - T_g^*)}{a}, \quad F_{0,th} = \frac{\rho C_p T_g}{a(1-R)}$$

3. 실험

미소용기에 관한 실험을 위한 장치가 Fig. 3 에 나 와있다. 출력원으로 연속파 CO₂ 레이저(Synrad Res earch Systems, Model F48-1, ($\lambda=10.6\mu\text{m}$, 4.4W) 가 사용되었으며 Acousto-optic modulator 를 이용 해 펄스를 만들어 주었다. 펄스폭은 각각 10 μs , 20 μs , 30 μs 이다. Beam expander 에 의해 20배 확장된 빔은 CO₂ 레이저 파장에 대하여 Au(gold) 거울과 ZnSe 렌 즈를 사용하여 실험을 수행하였다. 레이저 빔은 공간상 의 가우시안 형태의 에너지 분포를 가지고 있고 순도 96%의 TEM₀₀ 모드 임을 제작자의 사양을 통해 검 증하였으며 1/e² 빔직경은 유리 기층 표면에서 50 μm 이다. 이와 같은 실험을 거친 후 디스크의 표면 은 optical profilometer 에 의해 측정되었다.

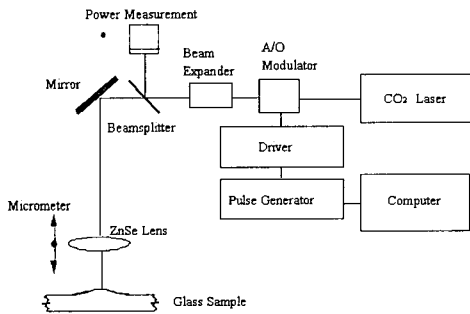


Fig.3. Experimental set up. Beam radius $w = 25\mu\text{m}$, wavelength of CO₂ laser = 10.6 μm , power (P)=4.4W, pulse duration (p)=10 μs , 20 μs , 30 μs

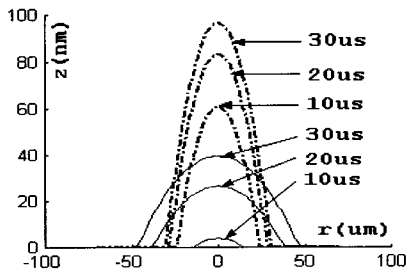


Fig.4. Calculated bump profiles for the different pulse widths, $p = 10\mu\text{s}$, 20 μs , 30 μs , and the beam radius, $w=25\mu\text{m}$ (dashed line), 40 μm (solid line). Laser power is fixed, 4.4W.

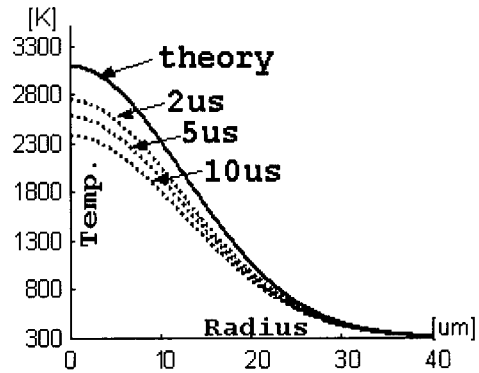


Fig.5. Temperature profiles for a different pulse widths at a fluence 2.24 J/cm². Solid lines are from the theory, and dashed lines from numerical computation

4. 결과 및 토의

레이저 플루언스에 따른 용기의 최대 높이를 실험 을 통해 얻음으로써 식(5)에 대해 곡선 맞춤 함으로써 적절한 C와 Fo,th를 얻을 수 있다. 여기서 물질에 따라서 C는 약 30-70 nm 의 범위를 가지고 Fo,th는 약 1-2 J/cm² 정도의 범위를 가진다.²⁾ C와 Fo,th는 한 계플루언스 (용기가 움푹 패이기 시작하는 플루언스) 보다 작은 여러 레이저 플루언스의 실험 값을 통해 얻게 되며 곡선맞춤 오차가 크지 않다.²⁾ Fig. 4 는 식(5)를 이용하여 레이저 펄스폭과 빔 반지름에 대해 서 수치계산 한 결과를 보여주고 있다. 앞서 제시 된 이론에서는 열확산의 효과를 무시하였지만 실제로 레이저조사 시간동안에 열은 기층 내부로 전도 되어 지므로 이 효과를 고려 해야 한다. 따라서 열확산을 고려한 경우에 대해 2 차원 열전도 해석을 함에 있어 Crank-Nicolson 방법과 ADI (Alternate Direct ing Implicit) 방법을 이용하여 차분화 하였고 계산 의 비교 도시를 위해 물성치는 모두 온도에 대해서 동일한 것으로 설정하여 계산하였다. Fig. 5 에 레이 저 플루언스가 일정하도록 레이저출력과 펄스폭을

변화시키면서 열확산을 고려한 경우의 표면의 온도 분포와 식(4)에 의한 온도분포를 비교 도시하였다. Fig. 5로부터 펄스폭이 짧을수록 이론과 근사하게 되어 가지만 상대적으로 긴 시간을 조사하는 경우에는 보다 많은 열이 기층 내부로 전도 되어지기 때문에 표면 온도가 더 낮은 결과를 보여주고 있다. 즉 Shiu²⁾에 의해 제안되고 본 연구에서 검토된 이론은 비교적 에 해당하는 3차원 결과를 보여준다. 이것으로부터 레이저 플루언스를 높임으로서 미소용기의 형상이 용기에서 움푹 패인 형상은 짧은 펄스폭을 가질 때 적합하다고 말할 수 있다.

Fig. 6에 수치계산 결과와 실험결과를 같이 도시하였다. 그리고 Fig. 7는 Fig. 6로 바꾸고 최대 플루언스에서 가운데 돌출된 곳에 움푹이 생기는 현상이 관찰되었다. 이것은 레이저 플루언스에 따라서 용기의 형상이 단순한 형태로 스케일만 커지는 것이 아니라 다양한 형상을 가진다는 것을 알 수 있다.

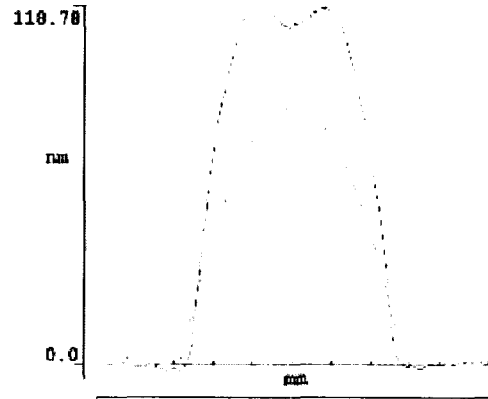
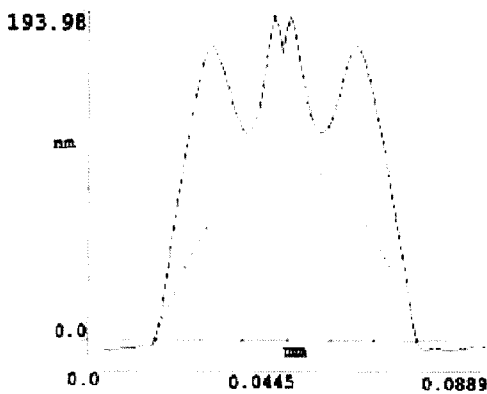
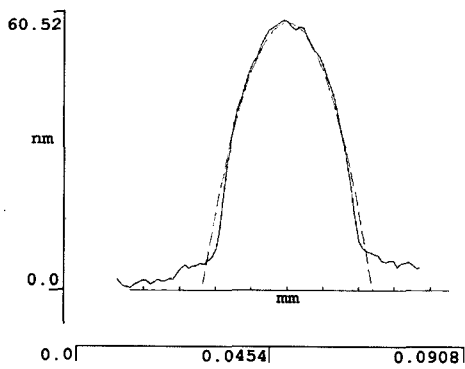


Fig.6. Comparison between predicted (dashed line) and measured bump profile (solid line) at pulse duration $p=10\mu s, 20\mu s, 30\mu s$, for energy= $44\mu J, 88\mu J, 132\mu J$ respectively.

즉 본 연구에서 적용된 이론만으로는 다양한 플루언스에 대해서 다양한 용기형상을 설명할 수 없다. 그리고 수치계산에 의한 것과 비교해 볼 때 한계 플루언스 이하에서는 비교적 경향과 크기가 일치하는 것을 볼 수 있으나 한계 플루언스 이상이 조사될 경우 결과가 부정확해지는 것을 볼 수 있다. 즉 본 연구에서 적용된 이론은 각 재질의 한계 플루언스 이하에 대해서 유효하다고 볼 수 있다. 따라서 Fig. 6로부터 펄스폭이 $10\mu s$ 인 경우에는 용기의 현상을 열팽창계수의 차이로 설명을 할 수 있지만 $20\mu s, 30\mu s$ 인 경우에 생기는 복잡한 형상이 생기는 정확한 원인은 아직 밝혀지지 않고 있으며 가장 유력한 것으로 용기 내에 생긴 온도차로 인해서 액체유리와 공기의 접촉면에서의 표면장력의 차이로 인한 유동 즉 마랑고니(Marangoni)³⁾ 효과 때문이라는 것과 실제로 응용된 유리가 유동을 일으킨다면 점성을 고려해야 하므로 그러한 점탄성(viscoelasticity)⁴⁾ 효과와 용기의 표면에서 증발되는 영향 같은 것으로 설명할 수 있을 것이다. 그리고 균열을 방지하기 위해 화학처리를 통해 $100-150\mu m$ 의 강화된 즉 강한 압축응력 층을 가지는 유리가 보통의 하드디스크에 사용하게 되는데 이런 경우에 대한 실험을 통해서 미소용



기의 높이가 강화 되지 않은 것보다 큰 것으로 알려지고 있다.²⁵⁾

본 연구의 이론적 모델을 보다 개선하기 위해 깊이방향의 열팽창만을 고려하는 것이 아니라 폭방향의 열팽창과 포와손비 (Poisson's ratio)와 관련된 열팽창효과를 고려해주어야 한다.

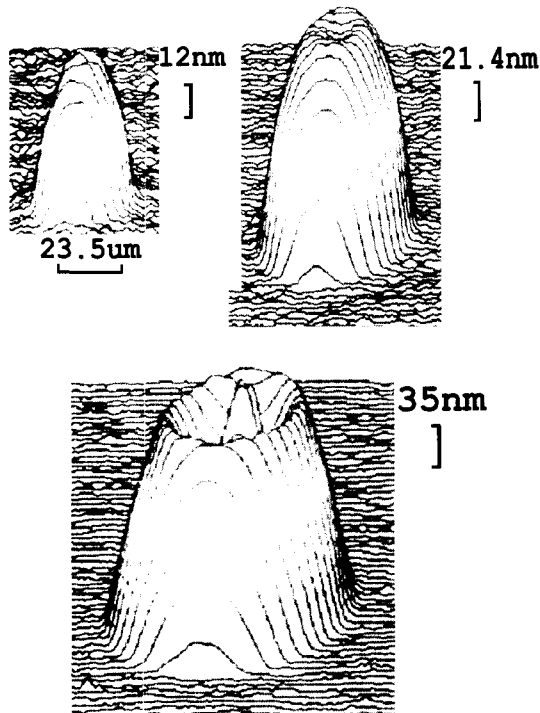


Fig.7. Three dimensional bump shape at pulse duration = 10 μ s, 20 μ s, 30 μ s

그리고 열 영향부 (heat affected zone) 바깥부분을 강체로 가정하였으나 실제로 열영향부 바깥에서도 팽창으로 인한 응력이 발생하고 변형이 생기기 때문에 열영향부 바깥부분을 강체가 아닌 탄성체로 수정하여야 하고 또 일단 액체가 되고 용기가 형성 되기 위해서 유동에 의한 점탄성 효과가 고려되어야 한다.

5. 결 론

레이저 텍스처링에 의한 유리기층의 미소용기 형상은 레이저 플루언스를 높임에 따라서 용기, 움푹패

인 용기, 주위에 환형의 골을 가지는 용기의 순으로 나타났다. 또 재료의 실험적 상수들을 얻는다면 용기가 움푹패이기 시작하는 한계 플루언스 이하에서는 액체유리와 냉각되는 유리의 열팽창계수의 차이로 용기의 형성이 된다는 것을 실험결과와의 비교를 통해서 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 교육부 BK21 과제와 서울대 마이크로 열시스템 ERC의 지원으로 수행되었다.

참고 문헌

1. Chen, S.C., Cahill, D.G., and Grigoropoulos, C.P., 2000, "Melting and Surface Deformation in Pulsed Laser Surface Micro-modification of NiP Disks," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 122, pp. 107-112.
2. Shiu, T.-R., Grigoropoulos, C.P., Cahill, D.G., and Greif, R., 1999, "Mechanism of Bump Formation on Glass Substrates during Laser Texturing", *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, pp. 1311-1316.
3. Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena (Hemisphere, Washington, DC)*.
4. Mack, C., 1969, "Deformation Mechanism of Nonlinear Viscoelasticity," *Journal of Rheology*, Vol. 13, pp. 59-82.
5. Tam, A. C., Brannon, J., Baumgart, P., and Pour, I. K., 1997, "Laser Texturing of Glass Disk Substrates," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3181-3183.