

Nd-YAG 펄스레이저에 의한 실리콘 가공시 발생하는 증발반동압력 측정 및 분석

이동준 · 정성호

광주과학기술원 기전공학과

Measurement and analysis of recoil force during Nd-YAG laser ablation of silicon

D. J. Lee and S. H. Jeong

Department of Mechatronics, Kwangju Institute of Science & Technology

Abstract

Recoil force exerted on the substrate during a nanosecond laser ablation of silicon is measured. The ablation sample is placed at the end of a 400 μm thick and 13 mm long silicon cantilever. The vibration amplitude of the cantilever induced by the recoil force is measured in real time with a probe beam. By comparing the deflection amplitude of the cantilever with a theoretical model, the recoil momentum is estimated. For laser irradiance in the order of 10^{11} W/cm^2 , the recoil pressure reached a value over 40×10^9 Pa.

Key Words : Nd-YAG laser ablation, recoil force, silicon, cantilever

1. 서 론

펄스레이저에 의한 재료 가공시 가공표면에는 재료의 강렬한 증발이 일어나고, 그 증발하는 증기의 반발력으로 인해 증발반동압력이 생긴다. 이 증발반동압력은 가공

중 녹은 재료를 순간적으로 밖으로 밀어내게 함으로써 가공부의 키홀(keyhole)형성 또는 재료의 깨짐과 같은 여러 가공흔적의 원인이 된다. 특히 정밀한 재료 가공시 재

료의 손상을 피하거나 보다 매끄러운 표면 가공을 위해서는 그러한 흔적의 원인이 되는 증발반동압력값에 대한 정확한 예측이 요구된다. 증발반동압력에 대한 이론적 해석은 Anisimov¹⁾에 의해 처음으로 행해졌으며, 그는 Knudsen층에서의 증기 입자에 대한 질량, 모멘텀, 에너지보존을 적용함으로써 레이저 가공시 발생하는 증발반동압력을 다음과 같이 제시하였다.

$$P_r = 0.56 P_s(T_s) \quad (1)$$

여기서 P_r 은 증발반동압력, T_s 는 표면온도, P_s 는 T_s 온도에서의 포화증기압력을 나타낸다. 식(1)은 그동안 레이저 어블레이션(ablation)시 발생하는 증발반동압력을 설명하기 위한 일반적인 식으로서 많은 연구자들에 의해 받아들여져 왔다²⁻⁴⁾. 그러나 레이저와 재료간의 상호작용에 있어 증발반동압력의 중요성에도 불구하고, Anisimov 이후 이 분야의 이론적, 실험적 연구는 별로 많이 이루어지지 않았다. 90년대 후반 들어 Semak과 Matsunawa⁵⁾는 키홀형성과 용접면전과에 대한 정확한 모델링을 위해서는 증발반동압력에 의해 발생하는 용융물유동(melt flow)의 분석이 중요하다는 것을 지적하였으며, 더 최근 들어서 Chen과 Wang⁶⁾이 레이저 어블레이션시 발생하는 플라즈마가 재료에 조사되는 레이저빔의 에너지를 감쇠시킴을 고려하여, Anisimov의 식을 보완한 이론을 제안하였다. 최근 들어 MEMS와 같은 마이크로시스템에 대한 연구의 증가와 함께 레이저를 이용한 초미세가공에 대한 연구도 활발하며 이와 같이 미세구조 가공에 있어서는 증발반동압력에 의한 재료의 손상 등을 고려하여야 할 필요가 있어 이에 대한 연구가 요구되어지고 있다.

증발반동모멘텀의 실험적 측정은 일반적으로 펜듈럼(pendulum)을 이용하여 행하여

진다. 1960년대에, Gregg와 Thomas⁷⁾는 펜듈럼을 이용하여 10^{-5} Torr의 진공에서 7.5ns의 펄스폭을 가지는 루비 레이저로 여러 금속시편에 대해 증발반동압력을 측정했고, 그 결과 에너지강도(irradiance) $0.2 \times 10^9 \sim 40 \times 10^9$ W/cm² 범위에서 증발반동압력이 $6 \times 10^5 \sim 10^6$ bars의 값을 가짐을 보고하였다. 1990년대에는 Kuznetsov⁸⁻⁹⁾가 역시 펜듈럼을 이용하여 0.3 ms의 펄스폭을 가지는 레이저로 여러가지 재료에 대해 증발반동압력을 측정하였으며, 이를 토대로 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\frac{J}{S} = a \left(\frac{E}{S} \right)^n \quad (2)$$

여기서 J 는 증발반동모멘텀, S 는 레이저초점의 면적, E 는 레이저 펄스에너지, a 와 n 은 측정데이터로부터 결정되는 값들이다. Kuznetsov에 의하면, 단위면적당 증발반동모멘텀 J/S 는 시편과 주위압력에 따라 달라지는데, 예를 들어 티타늄을 1 Pa의 진공에서 어블레이션시켰을 때 에너지강도 $3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$ W/cm²에 대해 증발반동압력이 $1.3 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^6$ Pa이었다. Kuznetsov의 실험에서 구해진 재료에 따른 증발반동압력값은 Gregg와 Thomas의 결과 값보다 적어도 4개 차수 정도 더 작게 나타났다.

본 연구에서는 나노초펄스레이저에 의한 실리콘 가공시 발생하는 증발반동압력을 측정하였으며, 펜듈럼을 사용하는 대신에 실리콘 재료의 캔틸레버를 이용하였다. 어블레이션 시편으로는 실리콘을 사용하였으며, 시편은 캔틸레버 끝단에 붙여진 상태에서 표면에 수직인 방향으로 레이저빔이 조사된다. 이때 증발반동압력에 의해 캔틸레버에 처짐이 발생하고, 그 처짐은 프로브 레이저빔과 사분할포토다이오드(QPD)로 측정된다. 이 측정된 값을 캔틸레버의 이론적 모델링을 통해 얻은 식에 대입함으로써

증발반동모멘텀을 구할 수 있다.

2. 실험방법

Fig.1(a)은 실험장치의 개략도를 보여준다. 실리콘 시편의 어블레이션을 위해 Nd-YAG레이저(Continuum, Surelite II, 5ns pulse at FWHM, $\lambda=532\text{nm}$)를 사용하였으며, 캔틸레버의 처짐을 측정할 프로브빔으로 He-Ne레이저를 사용하였다.

증발반동압력에 의해 캔틸레버의 처짐이 발생하면, QPD(UDT, SPOT-9D)로 조사된 He-Ne레이저빔 초점의 위치가 변하게 되고, 이때 QPD신호는 디지털오실로스코프

(Tektronix, TDS3032B)를 통하여 관찰되고 저장된다. 또한 Nd-YAG레이저의 펄스 에너지는 에너지미터(Molelectron, J50)로 측정하였으며, 레이저 가공시 발생하는 충격파와 증기유동은 쉐도그래피(shadowgraphy) 방법을 이용하여 다이(dye)레이저(Spectra-Physics, DYE-120, N2-laser pumped, $\lambda=650\text{nm}$)와 디지털카메라(Nikon, D-100)로 촬영하였다. Nd-YAG레이저와 다이레이저 사이의 시간차는 디지털딜레이제네레이터(SRS, DG535)로 조정하였으며, 포토다이오드(Newport, 818-BB-22)와 디지털오실로스코프(Tektronix, TDS2014)로 측정였다.

캔틸레버는 상업용으로 나와있는 P형 {111}웨이퍼로, [110]방향을 길이방향으로 하여 길이 13 mm, 폭이 1.8 mm, 두께가 $400\ \mu\text{m}$ 인 크기로 다이싱 및 폴리싱 작업을 통하여 만들어졌다. 실리콘시편은 가로×세로가 $1.8\ \text{mm}\times 1.8\ \text{mm}$ 크기로 캔틸레버 자유단 끝에 글루(glue)로 붙여진다(Fig.1(b)). Nd-YAG레이저빔의 초점 크기는 낮은 에너지로 어블레이션 된 흔적으로부터 약 $50\ \mu\text{m}$ 정도로 평가되었다. 실험 시작에 앞서 자동이송장치(Suruga Seiki, K201-20MB)를 이용하여 Nd-YAG레이저가 조사될 부분을 날카로운 팁(tip)으로 정적으로 미는 것에 의해 QPD로부터의 전압신호를 변위신호로 바꾸어주는 보정작업을 수행하였다.

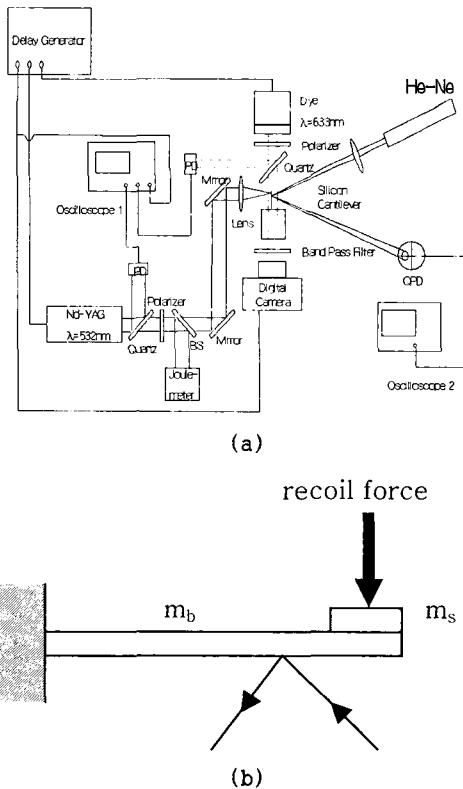


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the experimental system,
(b) Detailed configuration of the cantilever and ablation sample

3. 모델링

레이저펄스가 시편을 어블레이션시키는 순간 증발반동모멘텀은 캔틸레버를 가진시켜 자유진동을 유도하게 된다. 캔틸레버의 진폭은 증발반동모멘텀 크기에 의해 결정되며, 실리콘 캔틸레버의 감쇠를 무시할 경우, 다음과 같은 스프링-질량 시스템의 충

격응답으로 표현될 수 있다¹⁰⁾.

$$x(t) = \frac{J}{m_e \omega_n} \sin \omega_n t \quad (3)$$

여기서 J 는 증발반동모멘텀, m_e 와 ω_n 은 각각 캔틸레버-시편 시스템의 유효질량과 고유진동수를 나타낸다. 또한 캔틸레버의 최대진폭은 $X_{max}=J/ m_e\omega_n$ 이므로, 최대진폭을 알면 증발반동모멘텀 J 를 구할 수 있다. 캔틸레버-시편 시스템을 증발반동모멘텀이 가해지는 위치에 집중질량을 가지는 스프링-질량 시스템으로 변환했을때, 그 집중질량이 유효질량이 되고 $m_e=m_s+0.3m_b$ 와 같이 표현된다. 여기서 m_s 와 m_b 은 각각 시편과 캔틸레버의 질량을 나타내며, 위 식을 통해 구한 유효질량값은 9.85×10^{-9} kg이다. [110]방향에 대해 실리콘의 탄성계수는 168.0×10^9 Pa¹¹⁾이고, 모든 방향에 대해 동일한 값을 가지는 등방성을 가정하였다. 이렇게 구하여진 등가시스템, 스프링-유효질량 시스템에서 스프링강성 k 는 2731 N/m² 이고, 시스템의 고유진동수는 $f_{n,th}=2.65$ kHz이다. 이 값은 아래에서 실험적으로 얻어진 값과 비교될 것이다.

4. 실험결과 및 고찰

Figure 2(a)는 오실로스코프로 측정된 캔틸레버의 충격응답이다. 이 신호에 대해 고속푸리에변환(FFT)을 수행하면, Fig. 2(b)에서 볼 수 있는 것처럼 시스템의 고유진동수 $f_{n,act}$ 은 약 2.35kHz로서 앞에서 구한 $f_{n,th}$ 과 12%이내에서 일치한다. 또한 반동력점(half-power points)을 고려한 계산에서 감쇠비는 약 0.0014 정도로서 매우 작으므로 식(3)의 적용이 타당함을 말해준다. 이제 식(3)에 실험적으로 구한 캔틸레버의 최대진폭을 대입함으로써 증발반동모멘텀

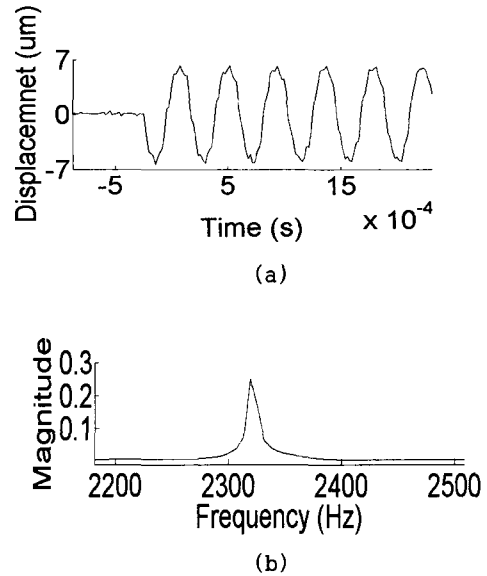


Fig. 2 (a) Measured deflection signal of the cantilever (b) measured natural frequency of the vibrating cantilever (E=18 mJ)

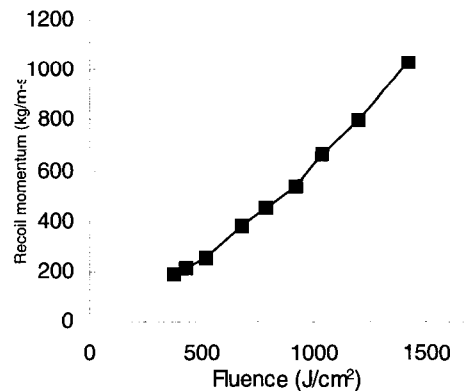


Fig. 3 Measured recoil momentum for different laser fluences

은 얻어질 수 있게 된다.

Figure 3은 레이저펄스에너지(fluence)에 대한 단위면적당 증발반동모멘텀(J/S)의 값을 나타낸다. 이때 에너지는 7.5~27.8 mJ까지변하며 빔 초점의 크기는 고정된 값으로 가정한다. 실험결과로부터 최대에너지에서 캔틸레버의 처짐은 12μm였다. Fig.3

의 데이터를 식(2)의 Kuznetsov의 실험식으로 나타낼 경우, a 와 n 값은 각각 0.336과 1.2978이다. Kuznetsov의 연구에서는 실리콘에 대한 실험결과가 포함되지 않아, 본 연구와 직접적인 비교는 불가능하다. 그러나 증발반동모멘텀과 레이저펄스에너지의 관계가 선형적인 경향을 보이는 것은 Kuznetsov의 결과와 마찬가지로 본 연구에서도 발견되었다.

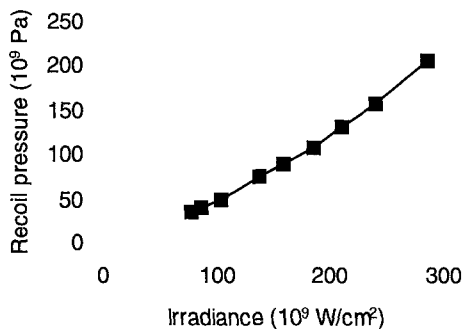


Fig. 4 Recoil pressure as a function of irradiance.

단위면적당 증발반동모멘텀과 레이저에너지에 각각 레이저펄스폭인 5ns으로 나누면, 증발반동압력과 에너지강도의 관계를 Fig.4와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서의 에너지강도 영역은 약 10^{11} W/cm 2 로서 Kuznetsov의 연구에서보다 5~6개 차수 더 높았고, Gregg와 Thomas의 실험보다는 1개 차수 정도 더 높게 나타났다. 또한 에너지강도에 따른 증발반동압력은 $40 \times 10^9 \sim 200 \times 10^9$ Pa로서 Kuznetsov의 실험에서보다 4~5개 차수 더 높았다. 물론 같은 시료를 사용하지 않았기 때문에 직접비교는 불가능하지만, 증발반동압력에 있어 본 연구의 값과 큰 차이를 보이는 것은 어블레이션전시 가공 메커니즘의 차이 때문인 것으로 보인다. 다시 말해서 Kuznetsov가 실험한 에너지강도 영역은 10^6 W/cm 2 정도로서, 시료의 증발현상이 플라즈마 형성의 가

능성이 적은 열적평형상태 하에서 일어났을 수 있으며, 본 연구에서 처럼 10^{11} W/cm 2 또는 그 이상의 에너지강도 영역에서는 활발한 플라즈마 형성과 상폭발(phase explosion)같은 열적비평형상태의 현상들이 발생하므로 이로 인해, 증발반동압력에 있어 큰 차이가 있는 것으로 생각된다.

본 연구에서의 결과와 Anisimov가 제시한 식(1)에 의한 결과를 비교하기 위해 Clasius-Clapeyron식을 이용하여, 시료의 포화증기압력(P_s)이 실험으로 측정된 증발반동압력과 같게 될 때의 온도(T_s)를 계산하였다. 측정된 가장 작은 증발반동압력인 40×10^9 Pa에 대해 T_s 는 15×10^4 K으로 계산되었으며, 이 값은 실리콘의 증발점온도 3514K¹³⁾와 비교해볼 때 매우 비현실적인 값으로 판단된다. 따라서 열적평형상태에서 설명이 가능한 Anisimov의 식은 이 연구에서와 같이 높은 에너지 상태에서는 적합하지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서 실리콘의 증발반동압력은 Gregg와 Thomas가 보고한 재료의 값과 거의 같은 차수를 가지며, 에너지강도 영역과 레이저펄스폭 또한 두 연구에서 유사함을 보인다. 본 연구에서는 재료의 증발이 레이저빔이 조사되는 시간동안만 일어난다고 가정하였다. 그러나 실제 증발시간은 레이저펄스폭보다 길 수도 있는데, 만약 가공시 재료의 포화임계온도 근처에서 유도투명화(induced transparency)와 같은 열적비평형현상이 발생한다면, 재료의 증발시간은 레이저펄스폭보다 2개 차수 정도 더 지속될 수도 있다. 이 경우 증발반동압력을 구하기 위해서는 레이저펄스폭 대신 실제 재료의 증발시간으로 증발반동모멘텀을 나누어야하며 이때의 증발반동압력은 Fig.4에서 제시된 값보다 작아지게 된다.

Figure 5는 웨도그래피 방법을 이용, 서로 다른 펄스에너지와 지연시간(t)에 대해

어블레이션 순간을 촬영한 것이다. Fig.5(a)에서 보는 바와 같이 낮은 에너지에서는 시편표면 아래로 어떠한 발광도 볼 수가 없다. 충격파가 선명하게 보이고 있으며, 증기와 압축공기의 경계(화살표로써 표시)가 나타난다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 경우보다 에너지강도가 약 두 배 정도 큰 경우이며 시편표면 위아래로 강한 발광을 관찰할 수 있다. 이 에너지 영역에서 증기의 이온화 및 시편의 강렬한 증발이 발생하는 것으로 보인다. 하지만 시편표면 아래쪽에서의 발광이 플라즈마에 의해 생성된 빛이 실리콘을 투과하여 보이는 것인지, 표면 아래의 재료가 여기상태에 도달함에 따른 것인지는 이 사진만으로 판단하기 어렵다. 또한 Fig. 5(c)에서 볼 수 있는 것과 같이 발광은 수 마이크로초까지 지속됨을 관찰할 수 있었다.

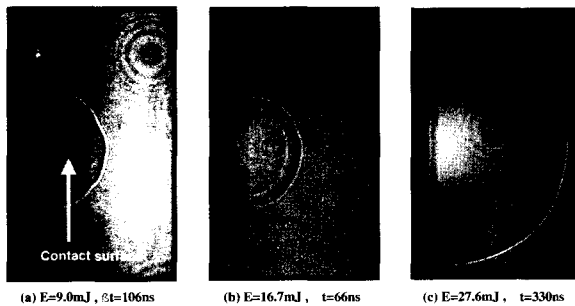


Fig. 5 Shadowgraphs of the laser ablation plume (a) $E=9.0$ mJ, $t=106$ ns, (b) $E=16.7$ mJ, $t=66$ ns, (c) $E=27.6$ mJ, $t=330$ ns,

5. 결 론

나노초레이저로 실리콘을 가공할 때 발생하는 증발반동모멘텀을 실리콘 캔틸레버와 프로브빔을 이용해 측정하였으며, 그 측정된 캔틸레버의 변위를 이론적 모델링에 의해 얻어진 식에 대입함으로써 10^{11} W/cm² 정도의 에너지강도 범위에 대한 증

발반동모멘텀을 구하였다. 이로부터 얻어진 증발반동압력은 $40 \times 10^9 \sim 200 \times 10^9$ Pa로 비교적 큰 값을 가졌다. 이처럼 큰 값을 가지는 이유는 높은 레이저 에너지에서 재료가 강렬하게 어블레이션 됨으로 인하여 플라즈마 형성과 상폭발 같은 열적비평형현상이 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 증발반동압력의 더 정확한 측정과 평가를 위해서는 어블레이션시 증발과정의 이론적 해석과 정확한 증발시간 측정을 위한 실험이 이루어져야 할 것으로 보여진다.

참고문헌

1. S.I. Anisimov, Sov. Phys. JETP, 27, 182 (1968)
2. V.A. Vatanov, F.V. Bunkin, A.M. Prokhorov, and V.B. Fedorov, Sov. Phys. JETP, 36, 311 (1973)
3. M. von Allmen and A. Blatter: Laser-Beam Interactions with Materials, Second Edition (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995) p.130
4. D. Buerle: Laser Processing and Chemistry, Third Edition (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000) p.201
5. V. Semak and A. Matsunawa, J. Phys D: Appl. Phys., 30, 2541 (1997)
6. X. Chen and H.X. Wang, J. Phys D: Appl. Phys., 34, 2637 (2001)
7. D.W. Gregg and S.J. Thomas, J. Appl. Phys., 37, 2787 (1966)
8. L.I. Kuznetsov, Quantum Electron., 23, 1035 (1993)
9. L.I. Kuznetsov, Proceedings of SPIE, 2703, 563 (1996)
10. W.T. Thomson and M.D. Dahleh:

- heory of Vibration with Applications,
Fifth Edition (Prentice Hall Upper
Saddle River New Jersey 1998) p. 90
11. M. Madou: Fundamentals of
Microfabrication (CRC Boa Raton
1997) p.159
 12. X.L. Mao and R.E. Russo, Appl.
Phys. A: Mater Sci. Process., 64, 1
(1997)
 13. J.H. Yoo, S.H. Jeong, R. Greif, R.E.
Russo, J. Appl. Phys., 88, 1638 (2000)

