

# 레이저 충격파 클리닝 공정에서 충격파 속도 측정 및 가시화

## Measurement of shockwave velocity and visualization in laser-induced shockwave cleaning

포항공과대학교 기계공학과 임현규, 김동식  
(주) IMT 레이저그룹 이종명

### I. 서론

최근 반도체 산업이나 정보 저장 산업에서 나노 크기의 불순물을 제거하기 위해 메가소닉 클리닝(megasonic cleaning), 극저온 클리닝(cryogenic cleaning), 레이저 충격파 클리닝(laser-induced shockwave cleaning) 기법 등이 연구되고 있다.<sup>1-3)</sup> 특히 레이저 유기 충격파 클리닝 기법은 비접촉이면서 환경 친화적이므로 기존의 화학적 습식 세정 방식에 비해 큰 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 유기 충격파 기술 개발의 기초 단계로서 레이저에 의해 유기된 충격파의 속도 측정과 생성 충격파의 형상을 가시화하였다. 레이저 충격파를 이용한 나노 입자 클리닝 기법에서 충격파의 속도는 세정 효율과 직접적인 연관이 있으므로 충격파의 속도 측정은 충격파 클리닝 기구 해석에서 있어서 중요한 실험으로 볼 수 있다. 이 실험에서는 절대위치(광학 브레이크다운 발생 지점)에서 떨어진 거리, 레이저 출력밀도(irradiance), 주변 가스(ambient gas) 변화에 따른 속도를 측정하였다. 또한 시간에 따라 변하는 충격파의 형상과 입자가 제거되는 지점인 시편 표면에 충격파가 충돌하는 현상을 가시화하였다.

### II. 실험

본 연구는 광굴절 방식(probe-beam deflection)과 레이저 섬광 사진법(laser-flash photography)을 이용하여 충격파 속도를 측정하고, 충격파 진행 형상을 가시화하였다. 실험에서는 최대 출력이 다른 두 대의 Q-switched Nd:YAG 레이저(파장: 532 nm, 1064 nm FWHM: 8 ns, 5 ns)를 이용하였다. 레이저 빔을 공기 중에 집속시켜 유도된 충격파가 연속파 HeNe 레이저(출력: 20 mW, 파장: 633 nm) 빔에 도달하게 되면 밀도 변화에 의해 빔은 굴절하게 되고 광검출기(Si PIN)가 굴절되는 시점을 감지한다. 이 실험의 세부적인 장치를 도시한 개략도가 Fig.1에 나타나있다. 광학 브레이크다운(optical breakdown) 지점에서 떨어진 거리 변화에 따른 충격파 속도를 측정하기 위해 HeNe 레이저와 광검출기, 칼날(knife edge) 및 렌즈를 일체형으로 만들어 수직 이동대 위에 엮는다. 초점 렌즈를 통과한 레이저 빔이 집속 되면 주변 가스의 절연 브레이크다운(dielectric breakdown)이 일어나면서 플라즈마 팽창에 의해 구형 모양의 충격파가 형성된다. 형성된 충격파의 속도는 브레이크다운이 일어나는 지점에서 떨어질수록 낮아지므로<sup>4)</sup> 일정 간격으로 브레이크다운 지점과 HeNe 레이저 빔의 거리를 변화시킨다. 이 때, 앞에서 설명하였듯이 충격파가 HeNe 레이저 빔에 도달하게 되면 빔은 굴절되고 광검출기가 감지한다. 충격파 가시화를 위해 질소레이저에 의해 여기 되는 색소레이저(파장: 640 nm, FWHM: 4 ns)를 실험에 이용하였다. Nd:YAG 레이저 조사시점과 색소레이저의 조사시점을 변화시키면서 점점 커지는 충격파 형상과 시편과의 충돌에 의해 반사된 충격파를 볼 수 있다. 따라서 이런 과정을 반복하면서 수나노초 단위의 시간 정밀도를 가지는 섬광사진을 획득할 수 있다. 본 연구에 이용된 광굴절 및 가시화 방식은 기존의 다른 연구에서 이용된 것과 유사하다.<sup>5-7)</sup>

### III. 결과 및 고찰

Q-switched Nd:YAG 레이저(파장: 532 nm FWHM: 8 ns)에 의해 유도된 충격파의 속도와 인입 레이저 출력밀도(irradiance)와의 상관도를 도출하기 위해 출력밀도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig.2는 레이저 출력밀도 증가에 따라 충격파가 브레이크다운 발생지점에서 14.5 mm 떨어진 지점까지 도달하는데 소요된 시간 변화를 보여준다. 그림에서 곡선은 측정값을 다항함수로 곡선맞춤한 결과이다. 대략  $5\sim 6 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 정도의 출력밀도에서 도달 시간이 수렴함을 볼 수 있다. 즉,  $6 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 이상으로 레이저 출력밀도를 증가시키더라도 충격파 속도에는 영향을 주지 않음을 실험결과를 통해 알 수 있다.

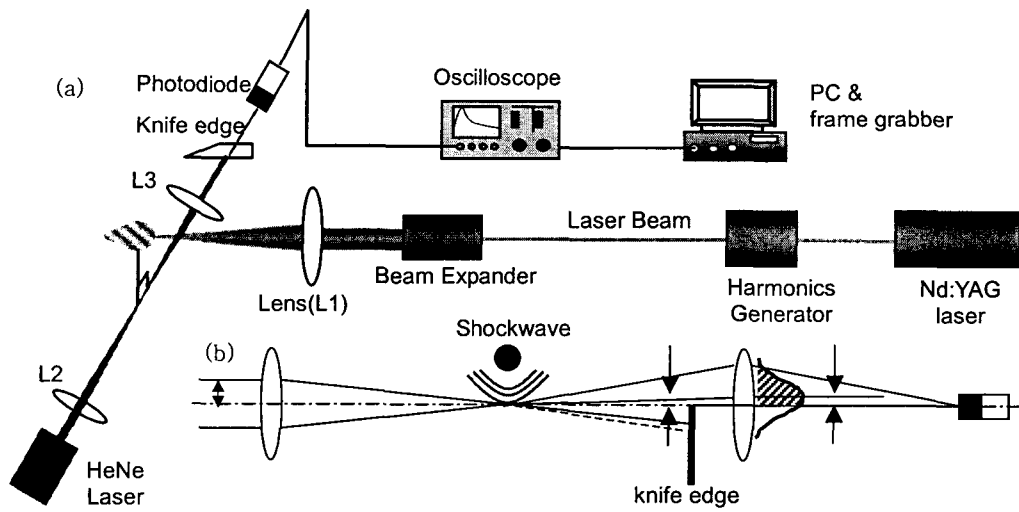


Fig. 1 (a) Experimental setup for shockwave-speed measurement and (b) geometry of deflected probe beam with Gaussian intensity distribution.

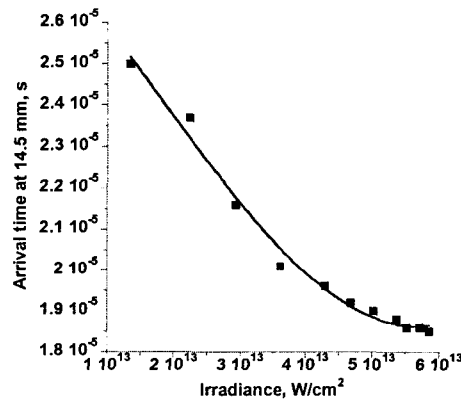


Fig. 2 Arrival time at 14.45 mm from the focal point as a function of irradiance (wavelength: 532 nm, FWHM: 8 ns).

입계 출력밀도 이상( $\sim 6 \times 10^{13} W/cm^2$ )에서 초점거리로부터 떨어진 거리 변화에 따른 속도를 주변 가스(Air, Argon, He,  $N_2$ )를 달리하면서 측정하였다. 가스는 브레이크다운이 일어나는 지점에만 국부적으로 공급하고, 충격파가 최초 발생하는 지점(초점거리에서 2 mm 정도 떨어진 거리)에서 0.7 mm 간격으로 점점 거리를 멀게 하면서 충격파 도달 시간을 측정하였다. 각 지점에서의 도달시간의 차이와 거리를 알기 때문에 평균 속도를 계산할 수 있다. 이런 방법으로 Fig. 3과 같이 초점거리에서 떨어진 지점에서의 충격파 속도를 얻을 수 있었다. 이 결과를 통해 충격파의 속도는 거리에 따라 감소하며, 초점거리로부터 2 mm 떨어진 곳에서 대략 5000 m/s의 속도로 진행함을 알 수 있다. 이에 대한 충격파 압력은 대략  $2 \times 10^7 Pa$  정도로 예측할 수 있다.<sup>7)</sup> Fig. 3(a)를 통해 주변 가스를 공기에서 아르곤(Argon)으로 바꾸어도 실험값은 큰 차이를 보이지 않았다. 그래프에는 나타내지 않았지만 헬륨(He), 질소( $N_2$ ) 역시 큰 차이를 보이지 않았다.

그리고, 충격파 전파를 레이저 선편 사진법으로 가시화함으로써 시간에 따른 충격파 거동과 속도를 분석하였다. Fig. 4를 통해 레이저 조사 후 대략 60 ns 에서 플라즈마 팽창에 의해 충격파가 진행하기 시작하여 580 ns 에는 직경 2 mm 까지 성장함을 볼 수 있다. 입체적으로 볼 때, 충격파의 형상은 레이저가 진행하는 방향에서는 작은 곡률 반경(radius of curvature)를 가지고 나머지 방향(진행

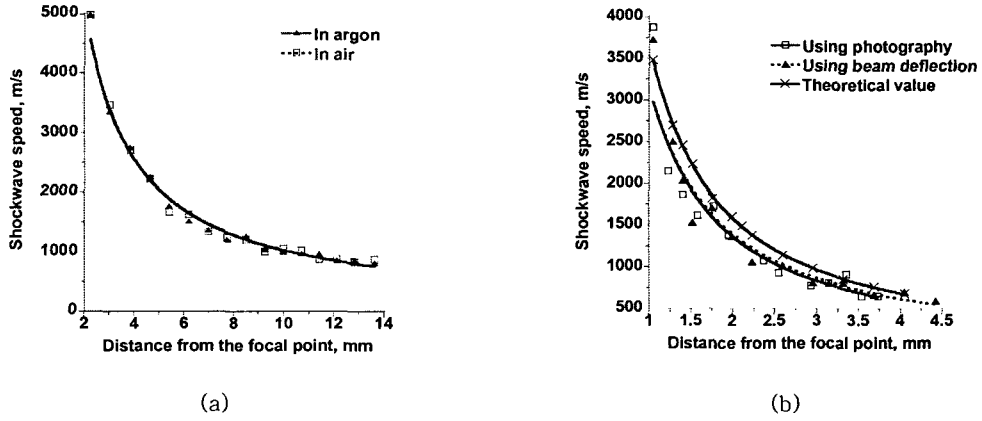


Fig. 3 (a) Variation of shock-wave speed with distance from the focal point (wavelength: 532 nm, FWHM: 8 ns, irradiance:  $1.59 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) and (b) comparison of the measured speed with theoretical prediction (wavelength: 1064 nm, FWHM: 6 ns, irradiance:  $1.52 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>).

방향의 좌,우,상,하,뒤)에서는 상대적으로 큰 곡률 반경을 가지며 구형에 가깝다. 섬광 사진을 토대로 시간에 따른 충격파의 크기 변화를 통해 대략적인 충격파 속도를 얻을 수 있다. 이것을 Fig. 3(b)에 나타내었으며 이전의 광굴절 실험값과 비교해 거의 비슷한 속도를 얻었다. 한편, 레이저 브레이크다운을 점 폭발(point explosion)로 가정하면 상사법(similarity method)을 이용하여 충격파 도달시간  $t$ 를 아래와 같이 계산할 수 있다.<sup>4,7)</sup>

$$t = (2/5V)^{5/3} (E/\alpha\rho_0)^{1/3} M^{-5/3} (1 + \beta M^{-2}) \quad (1)$$

$$\beta = w(v+1)(v+2)/v(2+3v) \quad (2)$$

$$\rho/\rho_0 = (\gamma+1)(\gamma-1+2M^{-2}) \quad (3)$$

( $R$ : 충격파 반경,  $E$ : 레이저 펄스 에너지,  $\alpha$ : 기체의존상수 $\sim 0.8$ ,  $\rho$ : 밀도,  $\rho_0$ : 주위 밀도,  $V$ : 주위 음속,  $M$ : Mach 수,  $w$ : 상수 $\sim 2$ ,  $\gamma$ : 비열비)

위 식에서  $v$ 는 충격파 형상에 따라 결정되는 값으로 구형은 3의 값을 가지며, 이 식을 이용하여 계산된 값을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 이론값이 실험값 보다 높게 나온 것을 볼 수 있다. 이것은 조사된 레이저 에너지가 모두 플라즈마 팽창을 위한 운동 에너지로 전환된 것이 아니라 플라즈마 생성시 빛과 열 에너지 발생 등으로 에너지 손실이 생겼기 때문인 것으로 추정된다. 또한 레이저 발진 초기의 출력밀도가 기체의 브레이크다운 임계값에 도달하지 못하여 이전의 에너지는 기체에 흡수되지 않고 투과된다.<sup>8)</sup>

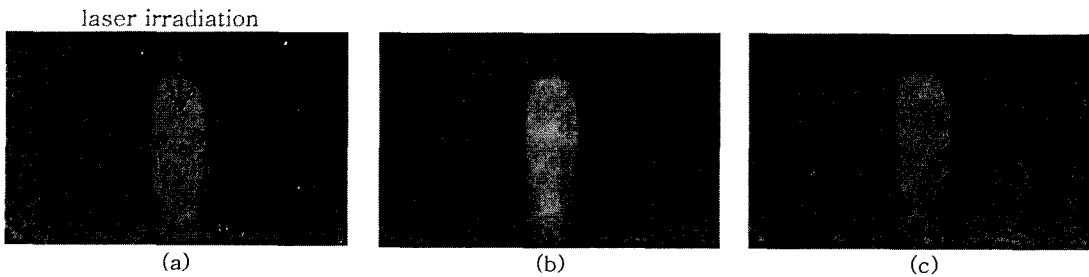


Fig. 4 Time-resolved images of shock-waves propagation (wavelength: 1064 nm, FWHM: 6 ns, irradiance:  $3.81 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>); (a) at 0 ns, (b) at 60 ns, (c) at 580 ns.

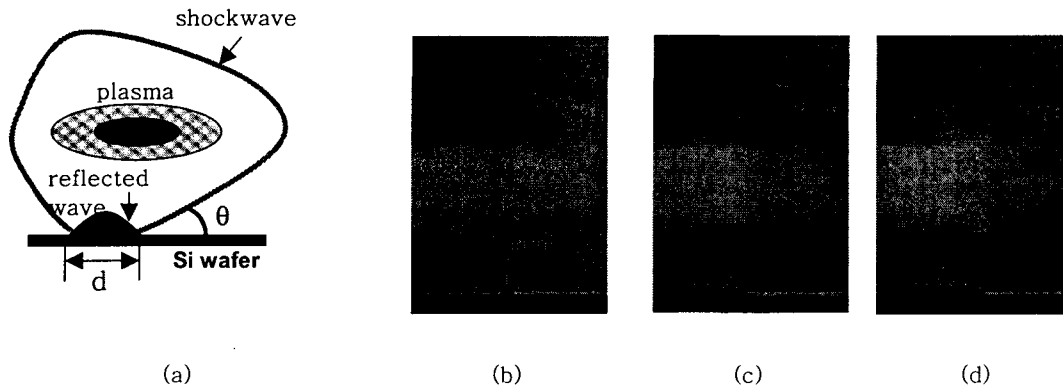


Fig. 5 Time-resolved images of shock-waves impingement onto a Si wafer (wavelength: 1064 nm, FWHM: 6 ns, irradiance:  $1.52 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>); (a) schematic description, (b) at 1470 ns, (c) at 1770 ns, and (d) at 1980 ns.

레이저 충격파 클리닝 기구를 해석하기 위해 시편과 충격파 사이의 충돌 현상을 가시화하였다. Fig.5는 충격파가 시편에 충돌한 후 시간에 따라 변하는 것을 보여준다. 충격파의 반사 속도는 입사 속도 보다 대략 30 % 감소함을 알 수 있었다. Fig.5의 실험조건에서 생성된 플라즈마는 시편 수직 방향으로 2 mm 정도의 크기를 갖는다. 또한 충격파와 시편이 닿는 접촉각  $\theta$ 는 대략  $45^\circ$  정도로 관측되었으며 충격파 접촉 면적( $\approx \pi d^2/4$ )은 충격파가 진행함에 따라 증가율은 감소하지만 점차 넓어짐을 볼 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서 광굴절 방식(probe-beam deflection)과 레이저 섬광 사진법(laser-flash photography)을 이용하여 레이저 유도 최대 충격파 속도( $\sim 5000$  m/s)를 측정하고 압력을 예측( $\sim 2 \times 10^7$  Pa) 하였으며, 충격파 진행 형상과 시편 충돌 후의 모습을 가시화하였다. 또한 임계 출력밀도 ( $\sim 6 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>) 이상에서는 충격파 속도가 더 이상 증가하지 않으며 일정한 속도로 수렴함을 알 수 있었다. 앞으로 본 기초 연구자료를 토대로 충격파의 진행과 충돌에 관한 수치 해석과 추가적인 실험을 통해 나노입자 제거 기구 해석을 수행할 것이다.

후 기 : 본 연구는 과학기술부 나노핵심기술개발사업(M1-0214-00-0134)의 지원으로 수행되었다.

#### V. 참고문헌

1. F. Zhang, A. Ahmed, Busnaina, A. Michael, Fury, S.Q. Wang : The removal of deformed submicron particles from silicon wafers by spin rinse and megasonics, Journal of Electronic Materials, 29, pp. 199-204 (2000)
2. R. Shah, J.J. Wu, C. Yu, et al : Cryogenic aerosol clean. Proceedings of 3rd International Symposium on Ultra Clean Processing of Silicon Surfaces, 23-25 (1996)
3. J. M. Lee, K. G. Watkins : Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock waves, Journal of Applied Physics, 89, pp.6496-6500 (2001)
4. L. I. Sedov : Similarity and dimensional methods in mechanics, 10<sup>th</sup> edn, CRC Press (1991)
5. D. Kim, M. Ye, C.P. Grigoropoulos : Pulsed laser-induced ablation of absorbing liquids and acoustic-transient generation, Applied Physics A, 67, pp. 169-181 (1998)
6. H. K. Park, D. Kim, C. P. Grigoropoulos, A. C. Tam : Pressure generation and measurement in the rapid vaporization of water on a pulsed-laser-heated surface, Journal of Applied Physics, 80, pp. 4072-4081 (1996)
7. A. M. Azzeer, A. S. Al-Dwayyan, M. S. Al-Salhi, A. M. Kamal, M. A. Harith : Optical probing of laser-induced shock waves in air, Applied Physics. B, 63, pp307-310 (1996)
8. Y. L. Chen, J. W. L. Lewis, C. Parigger : Spatial and temporal profiles of pulsed laser-induced air plasma emissions, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 67, pp91-103 (2000)