

# 레이저 충격파 클리닝에서 발생되는 유동장의 실험적 해석

임현규 · 장덕석 · 김동식

포항공과대학교 기계공학과

## Experimental analysis of flow field for laser shock wave cleaning

H. K. Lim, D. S. Jang and D. S. Kim

Department of mechanical engineering, POSTECH

### Abstract

The dynamics of laser-induced plasma/shock wave and the interaction with a surface in the laser shock cleaning process are analyzed by optical diagnostics. Shock wave is generated by a Q-switched Nd:YAG laser in air or with N<sub>2</sub>, Ar, and He injection into the focal spot. The shock speed is measured by monitoring the photoacoustic probe-beam deflection signal under different conditions. In addition, nanosecond time-resolved images of shock wave propagation and interaction with the substrate are obtained by the laser-flash shadowgraphy. The results reveal the effect of various operation parameters of the laser shock cleaning process on shock wave intensity, energy-conversion efficiency, and flow characteristics. Discussions are made on the cleaning mechanisms based on the experimental observations.

**Key Words :** Laser cleaning Shock wave, Optical breakdown, Visualization

## 1. 서 론

최근 반도체 산업이나 정보 저장 산업

에서 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 건식, 비접촉식으로서 미세 입자 제거에 효과적이다<sup>3)</sup>. 또한 레이저 직접 어블레이션(ablation) 클리닝 방식에 비해 넓은 면적을 제거할 수 있으며, 기존의 화학적 습식 세정 방식에 비해 환경 친화적 측면에서 큰 장점을 가진다. 최근 화학적 클리닝 기법에 레이저 유기 충격파를 결합한 방식으로 열연강 표면에 10  $\mu\text{m}$  두께의 산화 스케일(scale)을 제거하는 연구가 보고 되고 있다<sup>4,5)</sup>. 이 공정에서는 레이저 유기 브레이크다운이 액상에서 일어나며, 액상에서 생성된 충격파는 클리닝 효율을 증대시킨다. 레이저 유기 충격파 클리닝 기법은 시편 손상 없이 실리콘 웨이퍼 위에 부착된 200 nm 급의 입자를 제거할 수 있으나<sup>6)</sup>, 충격파 형성 과정 및 시편과의 충돌현상 분석에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 유체 흐름을 이용한 입자 제거 연구는 과학적으로 흥미롭게 다루어졌으며, 최근 충격파 충돌에 의한 입자 제거 관련 연구가 발표되고 있다<sup>7-10)</sup>. 그러나 이런 연구들은 충격파 튜브에 의해 충격파를 생성시키며 LIB(Laser-induced breakdown)에 의해 생성된 충격파와 비교해 속도가 느리며 형상도 다르다. 본 연구의 주요 목적은 입사 레이저 에너지, 조사도, 주변 기체 등 주요 인자들에 대한 충격파 강도 의존도를 실험적으로 분석하고, 가시화 실험을 통해서 LIB에 의해 발생하는 충격파의 진행 특성 및 주변 유동장을 해석하는 것이다. 레이저 유기 충격파를 이용한 나노 입자 클리닝 기법에서 충격파의 속도는 세정 효율과 직접적인 연관이 있으므로 충격파 속도 측정은 충격파 클리닝 기구 해석에 있어서 중요한 실험으로 볼 수 있다. 또한 충격파 형상 및

시편 충돌 현상 가시화 실험은 레이저 유기 충격파 클리닝 모델링에 필수적이다.

## 2. 실 험

본 연구의 주된 내용은 광굴절 방식(probe-beam deflection)과 레이저 섬광 사진법(laser-flash photography)을 이용하여 충격파 속도를 측정하고, 충격파 진행 형상을 가시화하는 것이다. LIB에 의한 충격파 생성을 위해서 최대 출력이 다른 두 대의 Q-switched Nd:YAG 레이저(파장: 532 nm, 1064 nm FWHM: 8 ns, 5 ns)를 이용하였다. 레이저 유기 충격파의 특성을 파악하기 위해 연속파 HeNe 레이저(출력: 20 mW, 파장: 633 nm)를 이용한 광굴절 측정 장치를 구성하였다. 실험의 세부적인 장치를 도시한 개략도가 Fig.1에 나타나있다. 광학 브레이크다운(optical breakdown) 지점에서 떨어진 거리( $d$ ) 변화에 따른 충격파 속도를 측정하기 위해 HeNe 레이저와 광검출기, 칼날(knife edge) 및 렌즈를 일체형으로 만들어 수직 이동대 위에 얹는다. 렌즈를 통과한 레이저 빔이 초점에서 집속되면 주변 기체의 광학 브레이크다운이 일어나면서 플라즈마 팽창에 의해 구형 모양의 충격파가 형성된다. 형성된 충격파의 속도는 브레이크다운이 일어나는 지점에서 멀어질수록 낮아지므로<sup>11)</sup> 일정 간격으로 브레이크다운 지점과 HeNe 레이저 빔의 거리( $d$ )를 변화시킨다. 이 때, 충격파가 HeNe 레이저 빔에 도달하게 되면 빔은 굴절되고 광검출기가 감지한다. 그리고 충격파가 발생하는 초점에 노즐을 이용하여 0.2 MPa의 압력으로 세가지 다른 기체를 흘러주면서 LIB 임계값과 충격파 강도 변화를 확인한다. 플라즈마 생성 임계 조사도(irradiance)는 가칭 음파를 감지하여 측정하며, 광굴절 기법으로 기체가 주입된 초점

에서의 거리에 따른 충격파 속도를 측정한다. 충격파 가시화를 위해서는 질소 레이저에 의해 여기 되는 색소레이저(파장: 640 nm, FWHM: 4 ns)를 실험에 이용하였다. Nd:YAG 레이저 조사시점과 색소레이저의 조사시점을 변화시키면서 반복실험을 하게 되면 수나노초 단위의 시간 정밀도를 가지는 설파사진을 획득할 수 있다. 본 연구에 이용된 광굴절 및 가시화 방식은 기존의 다른 연구에서 이용된 것과 유사하다.<sup>12-14)</sup>

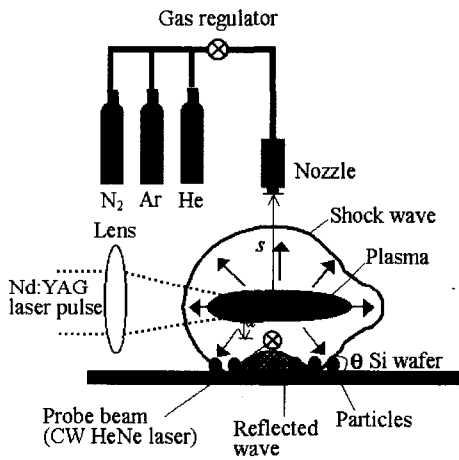


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set up.

### 3. 결과 및 고찰

Fig.2 는 초점에서의 거리( $d$ )에 따른 충격파 속도와 이로부터 계산된 충격파 압력을 보여준다. 주변 기체가 공기인 경우,  $d=2$  mm, 레이저 조사도  $0.023 \sim 2.3 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 에서 발생된 충격파 속도는 1000 ~ 5000 m/s 로 측정되었다.

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

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

( $t$ : 충격파 진행 시간,  $E$ : 흡수에너지,  $\alpha$ : 기체 의존 상수  $\sim 0.8$ ,  $\rho$ : 밀도,  $\rho_0$ : 대기 밀도,  $\eta$ : 에너지 변환 효율,  $V$ : 대기중 음속,  $M$ : 충격파 Mach 수,  $w$ : 상수  $\sim 2$ ,  $v$ : 충격파 형상 의존 상수  $\sim 3$ )

이론적인 충격파 속도는 식 (1)과 같이 similarity 해석 기법에 의해 얻어지며 실험 값에 접근하는 에너지 변환 효율은  $\eta = 0.65$  로써 Fig.2a 에서 실선으로 나타내었

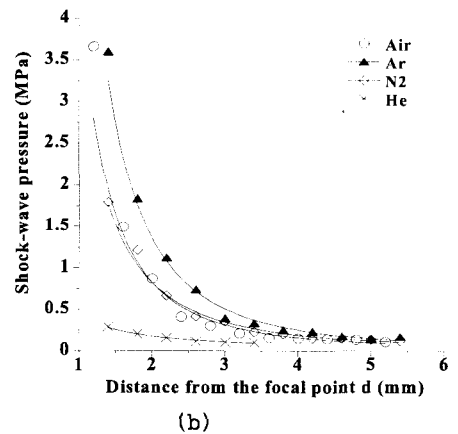
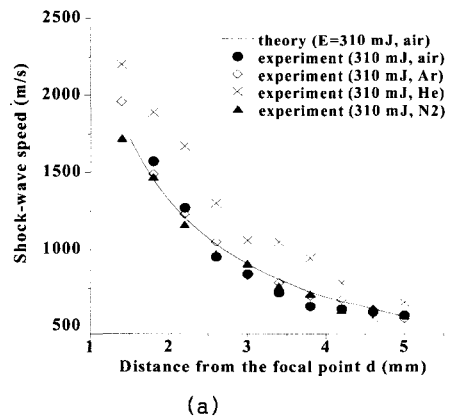


Fig. 2 (a) Variation of shock wave speed with distance from the focal point for four different ambient gases and (b) the estimate pressure in the downstream of the shock front (wavelength = 1064 nm, FWHM = 6 ns, incident energy = 310 mJ, Irradiance =  $1.3 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>).

다. Fig.2a 를 통해 충격파 속도는  $d$  가 증가할수록 급격히 감소함을 알 수 있다. 충격파 속도를 알면, 주변 기체를 이상 기체로 가정하여 수직 충격파의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식에 의해 유도된 Hugoniot 방정식으로 충격파 후류의 압력, 온도, 밀도, 입자 속도를 계산할 수 있다<sup>15)</sup>. 공기 중  $d = 3$  mm 지점에서 레이저 조사도를  $1.3 \times 10^{13}$  에서  $2.3 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 으로 증가했을 때 충격파 후류의 압력, 온도, 밀도, 입자 속도는 각각 0.3 ~ 5 MPa, 400 K ~ 2700 K, 3.5 ~ 5.5 kg/m<sup>3</sup>, 240 ~ 1800 m/s 으로 계산되었다. 레이저 조사도  $1.3 \times 10^{13}$ ,  $2.3 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 에 대한 충격파 후류의 온도가 1000 K 아래로 떨어지는 거리는 각각 1.5 mm, 5 mm 이다. 결국, 클리닝 공정에서 시편과 충격파 발생 지점까지의 거리가 상대적으로 멀게 설정하면 클리닝 시편에 열적 손상은 일어나지 않게 된다. 또한 Fig.2a 를 통해 공기, 질소, 아르곤에 비해 헬륨 기체를 주입한 경우 높은 충격파 속도를 보임을 알 수 있다. 이것은 헬륨 기체의 낮은 밀도 때문이다. Table.1 에 요약한 것처럼 헬륨은 상대적으로 높은 이온화 포텐셜(ionization potential)을 가지며 다른 기체에 비해 높은 LIB 임계값을 갖는다. LIB 임계값 측정 실험은 청정실에서 수행되지 않았으며, 주입 기체와 공기가 부분적으로 섞이게 되므로 순수한 기체에 대한 LIB 임계값은 Table.1 의 실험값과 다소 다를 수 있다. Fig.2b 에서 아르곤 기체는 다른 기체에 비해 상대적으로 높은 밀도를 가지므로 높은 압력을 보였다. 따라서 실제 클리닝에 아르곤 기체를 주입하는 것이 유리하다.

실험 결과, 레이저 조사도가 LIB 한계값보다 큰 경우, 충격파의 속도는 레이저 출력이나 조사도에 비례하는 것이 아니라 LIB 생성에 실제 이용된 흡수 에너지에 비례하는 것으로 나타났다. 여기서 흡수 에너지는 레이저 방출 에너지에서 초점을 지나 뒤로

Table 1 LIB threshold and ionization potential (first electron)

	Air	Ar injection	N <sub>2</sub> injection	He injection
Measured LIB threshold (W/cm <sup>2</sup> )	$1.7 \times 10^{12}$	$1.4 \times 10^{12}$	$2.1 \times 10^{12}$	$2.3 \times 10^{12}$
Ionization potential (eV)	14.8	15.8	15.6	24.6

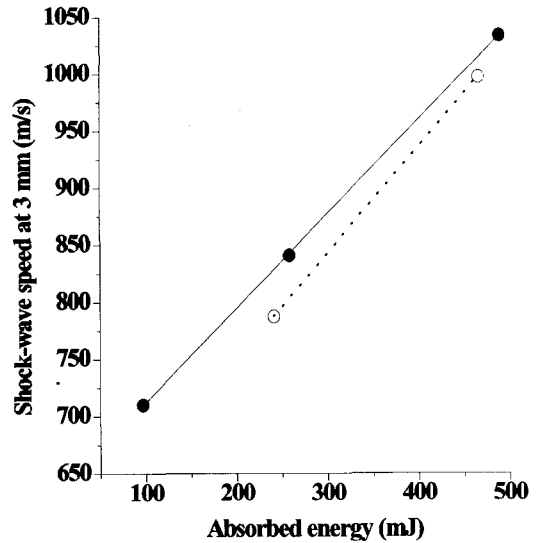


Fig. 3 Dependence of shock wave velocity on absorbed laser pulse energy (solid marker (f): optical setup with a focusing lens focal length ( $f$ ) = 100 mm, and open marker (⊞): laser beam is enlarged by a zoom beam expander with a magnification of  $\times 5$  before focusing, resulting in tighter focusing).

투과된 에너지를 뺀 값이다. Fig.3 은  $d = 3$  mm 에서 플라즈마 발생시 흡수 에너지 증가에 따른 충격파 속도 변화를 보여준다. Fig.3 에서 검은 점과 흰 점은 각각 다른 광학적 실험 조건에서 얻어진 값이다. 검은 점은 초점 거리가 100 mm 인 렌즈로 에너지를 집속하여 얻은 실험값이며, 흰 점은 레이저 빔을 집속하기 전에 빔 증폭기

(beam expander)를 이용하여 빔의 크기를 5배 확대하여 초점면에서 빔의 크기를 줄였을 때 얻어진 값이다. 원래 빔 크기와 빔의 크기를 증대 시킨 두 가지 조건에 대해서 약 310 mJ의 에너지를 조사하였을 때 조사도는 각각  $1.3 \times 10^{13}$ ,  $1.8 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 과 같이 크게 다르지만 최종적인 흡수에너지는 각각 258 mJ(투과율 18%), 241 mJ(투과율 21%)로 나타났다. 에너지가 약 580 mJ 일 경우 조사도는 각각  $2.45 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>,  $6.20 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 이고 흡수에너지는 각각 489 mJ(투과율15%), 466 mJ(투과율 21%)였다. 레이저의 조사도 및 빔의 크기는 흡수된 에너지의 양(투과율)을 어느 정도 변화시키지만 유기 충격파의 속도에는 큰 영향을 미치지 못함을 볼 수 있다. 충격파의 속도를 결정짓는 최대 요인은 흡수에너지의 양임을 알 수 있다.

위 실험에서 사용한 Nd:YAG 레이저의 최대 출력은 600 mJ 이다. 충격파 속도 포화 조건을 찾기 위해 보다 높은 에너지 출력을 갖는 레이저(IMT Inc., Nd:YAG 레이저, FWHM: 8 ns, 파장: 532 nm)를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig.4는 실제 충격파클리닝 실험 장치로부터 측정된 충격파 속도를 보여준다.  $d = 14$  mm에서의 평균 충격파 속도는 레이저 조사도  $2.1 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> (입사 에너지: 1.1 J, 초점거리: 160 mm, 대기 상태)에서 더 이상 증가하지 않았다. 그리고 레이저 조사도  $2.3 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> (입사 에너지: 1.2 J)에서의 충격파 속도는  $d = 2$  mm ~ 10 mm에서 5,000 ~ 1,000 m/s의 속도를 얻었다. Fig.5는 시간에 따라 증가하는 레이저 유기 충격파 전파 형상과 팽창된 플라즈마 사진을 보여준다. 가시적인 플라즈마는 대략 1 mm의 폭을 가지며, 수 mm 길이를 갖는다. 플라즈마 주위의 충격파는 진행하면서 구형의 형상을 가지며, 레이저 조사 방향의 반대쪽 충격파는 구형에서 조금 튀어나온 형상을 갖는다. 수직 방향의 충격파 속도 대비 레

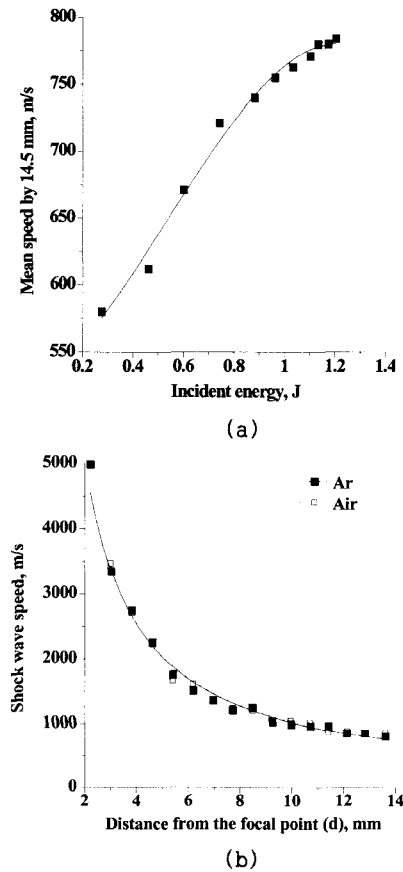
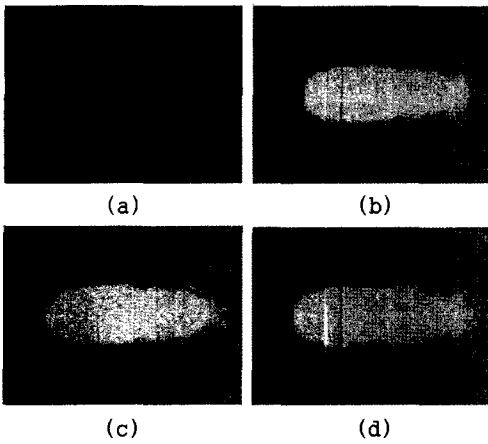


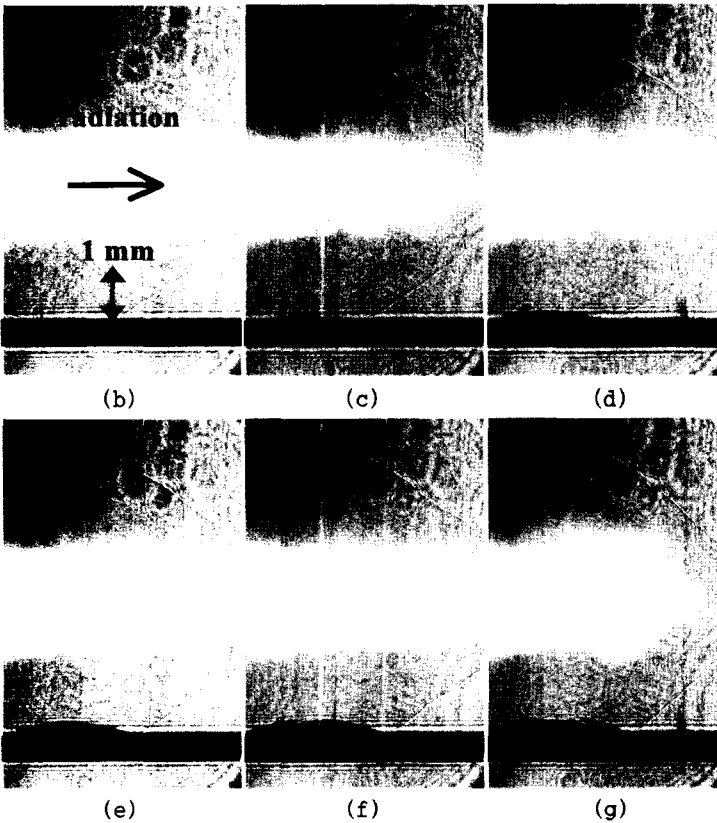
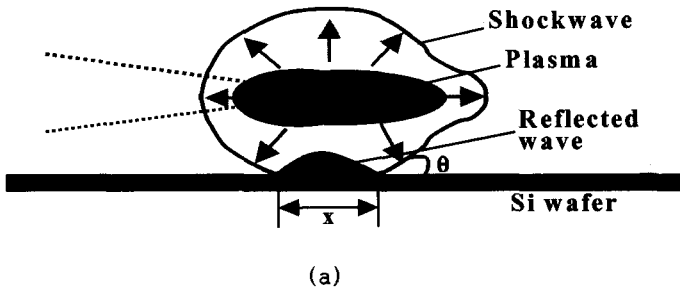
Fig. 4 (a) Mean speed by 14.45 mm from the focal point as a function of incident energy (wavelength = 532 nm, FWHM = 8 ns) (b) variation of shock wave speed with distance from the focal point (incident energy = 1.2 J, irradiance =  $1.59 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>).

이저 진행 방향의 충격파 속도는 초점을 기준으로 대략 1.6배이다. Fig.6는 실리콘 웨이퍼(Silicon wafer)와 충격파의 충돌 현상을 가시화한 사진이다. 충격파는 시편과 대략 45°로 접촉하면서 진행함을 볼 수 있고, 시편으로부터 반사된 충격파의 모습을 관찰할 수 있다. 반사된 충격파의 속도는 입사 시에 비해 30% 낮은 값을 가진다. 고체 시편에 충돌하는 수직 충격파의 이론적인 반사 속도는 현재 실험과 동일 조건에 대해 30~50% 정도이다<sup>16)</sup>.



**Fig. 5 Time-resolved images of shock wave propagation**

(a) at 60 ns, (b) at 130 ns,  
 (c) at 310 ns, (d) at 580 ns  
 (wavelength = 1064 nm,  
 FWHM = 6 ns,  
 incident energy = 31 mJ,  
 irradiance =  $3.8 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>)



**Fig. 6 Time-resolved**

**images of shock wave impingement onto a Si wafer;**

(a) schematic description

(b) at 1500 ns,  
 (c) at 1620 ns,  
 (d) at 1770 ns,  
 (e) at 1830 ns,  
 (f) at 1890 ns and  
 (g) at 1980 ns  
 (incident energy = 310 mJ,  
 irradiance =  $1.52 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>)

이러한 실험 결과들은 레이저 유기 충격파 클리닝에서 클리닝할 시편의 위치를 결정하는데 있어 중요한 정보를 제공한다. LIB에 의한 충격파 생성지점과 시편 사이의 거리는 클리닝 시 중요한 공정 변수의 하나로 클리닝의 결과 및 클리닝 시편의 상태를 크게 변화시킨다. 충격파의 진행 형태는 그림에서 볼 수 있듯이 구 형태이고, 그 속도는 그 진행 거리에 따라서 크게 감소하게 되는데 이는 클리닝 효과를 떨어뜨리는 요인이다. 따라서 시편과 빔 초점 사이의 거리는 가까울수록 클리닝 효과가 좋지만, 광학 브레이크다운 시 상대적으로 고열, 고압이 발생하게 되므로 그 거리가 너무 가까우면 시편이 열적, 기계적 손상을 입게 된다. 시편의 위치는 이러한 열적, 기계적 손상을 입지 않도록 안정적인 범위(임계점)에서 결정되어야 하며 정확한 임계값은 레이저 에너지에 따라 다르지만 통상적으로 수 mm 정도이다.

충격파의 높은 진행 속도는 높은 세정력을 발휘한다는 것이 일반적으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 그러나 충격파 충돌에 의한 시편의 진동이 클리닝 공정에서 중요한 역할을 하는지는 불확실하다. 두께 0.5 mm를 갖는 실리콘 웨이퍼의 진동수는 실리콘 웨이퍼 진동에 의한 반사된 탐사광의 에너지를 감지하는 광학적 방식으로 측정될 수 있다. 획득된 신호를 FFT 처리하여 초기 600  $\mu$ s 동안 실리콘 웨이퍼가 150 Hz 과 250 kHz의 진동수를 가짐을 알 수 있었다. 그리고 실리콘 웨이퍼의 진동수는 레이저 조사도에는 무관하였다. 섬광사진에 의해 측정된 실리콘 웨이퍼의 변위는 대략 20  $\mu$ m 였다. 1 m 직경의 텅스텐 입자에 대한 관성력은  $\sim O(10^{-10} \text{ N})$  정도이며, 반 데르 발스 힘(Van der waals force)에 의한 부착력과 비교해 무시할 정도로 작았다. 따라서, 웨이퍼 진동에 의해 발생하는 관성력의 영향을 무시할 만하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 레이저 충격파 클리닝의 전형적인 공정 조건 하에서 여러 공정 변수에 대한 충격파 강도와 흐름 특징을 정량화하였다. 기본적으로 레이저 유기 충격파의 물리적 성질을 측정하였으며, 레이저 충격파 클리닝에서의 충격파 형상과 시편 사이의 충돌 현상을 광학적 기법으로 가시화하였다. Nd:YAG 레이저 유기 충격파 속도는 광굴절 기법을 이용하여 측정하였으며, 충격파 강도에 관련된 여러 공정 변수의 영향과 에너지 변환 효율을 확인하였다. 또한 시간에 따라 성장하는 충격파 형상과 시편과의 충돌 현상은 레이저 섬광 사진법으로 가시화하여 레이저 충격파 클리닝 기구 모델링을 가능하게 하였다. 실험 결과들 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 주변 기체의 광학 브레이크 다운에 의해  $\sim O(1 \text{ MPa})$  정도의 충격파가 생성되며, 충격파 속도는 플라즈마 팽창 속도의 한계에 의해 결국 일정한 속도에 이르지만 흡수 에너지에 따라 증가되었다.
2. 레이저 에너지가 집중되는 초점에 헬륨 기체를 주입하면, LIB 임계값과 충격파 속도는 증가하였다. 그러나 아르곤 기체는 높은 밀도를 가지므로 가장 높은 충격파 압력을 보였다.
3. 레이저 유기 충격파 클리닝에서 충격파와 시편과의 충돌에 의해 유도되는 시편 진동의 영향은 높은 속도의 충격파 영향과 비교해 볼 때 무시할 만 하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 나노핵심/기반기술사업 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

1. F. Zhang, A. A. Busnaina, M. A. Fury, S. Wang, "The removal of deformed submicron particles from silicon wafers by spin rinse and megasonics," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 29, No. 2, 2000, pp.199-203.
2. R. Shah, J. J. Wu, C. Yu, et al, "Cryogenic aerosol clean," *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Symposium on Ultra Clean Processing of Silicon Surfaces*, 1996, pp.23-25.
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*, Vol. 89, No. 11, 2001, pp.6496-6500.
4. D. S. Kim, H. K. Lim, "Laser decontamination of carbon steel surfaces," *ISIJ International*, Vol. 43, No. 8, 2003, pp.1289-1292.
5. H. K. Lim, D. S. Kim, "Laser-assisted chemical cleaning of thin oxide films on carbon steel surfaces," *Journal of Laser Application*, 2003, in press.
6. J. M. Lee, S. H. Cho, J. G. Park, et al, "Laser-induced shock wave removal of chemical-mechanical polishing slurries from silicon wafers," *Proceedings of 3rd International Symposium on Laser Precision Microfabrication*, 2002, pp.287-289.
7. G. T. Smedley, D. J. Phares, R. C. Flagan, "Entrainment of fine particles from surfaces by impinging shock waves," *Experiments in Fluids*, Vol. 26, 1999, pp.116-125.
8. G. T. Smedley, D. J. Phares, R. C. Flagan, "Entrainment of fine particles from surfaces by gas jets impinging at normal incidence," *Experiments in Fluids*, Vol. 26, 1999, pp.324-334.
9. G. T. Smedley, D. J. Phares, R. C. Flagan, "Entrainment of fine particles from surfaces by gas jets impinging at oblique incidence," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, 2001, pp.135-142.
10. X. W. Zhang, Z. H. Yao, P. F. Hao, H. Q. Xu, "Study on particle removal efficiency of an impinging jet by an image-processing method," *Experiments in Fluids*, Vol. 32, 2002, pp.376-380.
11. L. I. Sedov, *Similarity and dimensional methods in mechanics*, 1991, CRC Press, Boca Raton.
12. D. S. Kim, M. Ye, C. P. Grigoropoulos, "Pulsed laser-induced ablation of absorbing liquids and acoustic-transient generation," *Applied physics A*, Vol. 67, 1998, pp.169-181.
13. H. K. Park, D. S. Kim, C. P. Grigoropoulos, "Pressure generation and measurement in the rapid vaporization of water on a pulsed-laser-heated surface," *Journal of Applied Physics*, Vol. 80, 1996, pp.4072-4081.
14. A. M. Azzeer, A. S. Al-Dwayyan, M. S. Al-Salhi, et al, "Optical probing of laser-induced shock waves in air," *Applied Physics B*, Vol. 63, 1996, pp.307-310.
15. J. D. Anderson, *Modern compressible flow*, 1990, McGraw Hill, Singapore.