

액막 보조 레이저 세척에서 액체 기화의 역할

이주철* · 장덕석* · 김동식†

(2002년 7월 25일 접수, 2003년 1월 3일 심사완료)

Role of Liquid Vaporization in Liquid-Assisted Laser Cleaning

Joochul Lee, Deoksuk Jang and Dongsik Kim

Key Words : Laser Cleaning(레이저 세척), Liquid Film(액막), Vaporization(기화), Interferometor(간섭계), Reflectance(반사율), Laser Flash Photography(레이저 섬광사진법)

Abstract

Liquid-assisted cleaning technology utilizing a nanosecond laser pulse is effective for removing submicron particulates from a variety of solid substrates. In the technique, saturated vapor is condensed on a solid surface to form a thin liquid film and the film is evaporated explosively by laser heating. The present work studies the role of liquid-film evaporation in the cleaning process. First, optical interferometry is employed for *in-situ* monitoring the displacement of the laser-irradiated sample in the cleaning process. The experiments are performed for estimating the recoil force exerted on the target with and without liquid deposition. Secondly, time-resolved visualization and optical reflectance probing are also conducted for monitoring the phase-change kinetics and plume dynamics in vaporization of thin liquid layers. Discussions are made on the effect of liquid-film thickness and dynamics of plume and acoustic wave. The results confirm that cleaning force is generated when the bubble nuclei initially grow in the strongly superheated liquid.

기호설명

- F : 레이저 플루언스 (J/m^2)
- i : 복소수 단위 $\sqrt{-1}$
- R_i : 액막 두께 변화에 따른 반사 신호의 변화
- R_s : 산란에 의한 반사 신호의 변화
- R_{s1} : Rayleigh 산란에 의한 반사 신호의 변화
- R_{s2} : Mie 산란에 의한 반사 신호의 변화
- T : 시간 (s)
- λ : 레이저 파장 (m)

1. 서론

액막 보조 레이저 세척(입자제거)은 상대적으로 낮은 레이저 플루언스(fluence)에서 고체 표면에

부착된 초미세 입자 제거에 효과적이므로 반도체, 정보저장기기 산업에서 매우 큰 잠재성을 지니고 있다. 따라서 효과적인 표면 세척 기술을 개발하고 액상의 기화에 따른 세척효율 증가의 물리적 기구를 밝히기 위해 많은 연구가 수행되어 왔다.⁽¹⁻¹⁰⁾

나노초 펄스레이저 유기 기화 과정에 관해 이전에 행해졌던 연구들을 통하여 투명한 액체에 잠긴 고체 표면의 급속한 가열($\sim 10^{10}$ K/s)로 인해 인접한 액체의 과열과 상폭발(phase explosion)을 발생시키고 그 결과 강한 압력파가 발생한다는 사실이 밝혀졌다.⁽²⁻¹⁰⁾ 따라서 액체의 폭발적 기화와 그에 수반된 압력 증진 효과가 입자 제거를 가능하게 하는 주요 인자로 제시되었으며 실제로 입자 제거에 필요한 레이저 플루언스의 한계값이 기포 생성 한계값과 비례하는 것으로 측정되었다.⁽⁸⁾ 한편, 레이저 세척에서 액막의 역할을 밝히기 위해서 일련의 광학적 분석 실험이 수행되었다.^(4,5,7-9) 특히 최근의 연구에서는 과열 액체에서 기포층의 생성과 성장 과정을 실시간, 반정량적(semi-

* 포항공대 기계공학과 대학원

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: dskim87@postech.ac.kr.

TEL : (054)279-2179 FAX : (054)279-3199

quantitatively)으로 측정하여 세척 공정에서 액막의 상변화 거동을 추정하는데 성공하였다.⁽¹⁰⁾ 광간섭계를 이용한 “유효” 증기층 두께의 측정 결과에 따르면, 강한 압력파는 생성된 기포가 파괴되면서 발생하는 수격 압력 때문에 발생하는 것이 아니라 초기 기포 핵들이 급속히 팽창하는 과정에서 생성될 가능성이 큰 것으로 판명되었다. 하지만 광간섭 신호는 수많은 미세 기포와 액체로 이루어진 2상 혼합물의 성질을 반영하는 것이므로 기포의 크기가 충분히 작아 Maxwell-Garnett 유효 매질을 이루거나⁽¹¹⁾ 기포가 병합되어 균일한 증기막을 형성하는 경우를 제외하고는 소위 “유효” 증기층의 물리적 의미가 모호해질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 방사 후 시편의 과도 변위를 측정하여 시간에 따른 압력장 변화를 추정함으로써 액막 보조 레이저 세척의 물리적 메커니즘을 보다 분명히 하고자 하였다.

세척 메커니즘의 분석에 있어 또 다른 중요한 핵심은 액막 두께의 영향이다. 실제 레이저 세척 장치에서는 수 μm 이하의 매우 얇은 액막 내에서 기화가 일어남에도 불구하고 이전의 연구들에서는 벌크액에 완전히 잠긴 시편을 대상으로 실험을 수행하였다.^(4-7,9,10) 이는 용액과 공기의 접촉면에서 농도차에 따른 자연 기화로부터 야기되는 측정상의 문제점들을 피하기 위한 것으로서 얇은 액막과 벌크액의 기화현상이 열역학적으로 유사하다는 압묵적 가정을 기반으로 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 공정 중 (오염 입자 없이) 액막의 거동과 기포 생성을 실시간으로 파악하기 위한 광학계측 실험을 수행하였다. 우선, 액체의 기화 과정과 두께 변화를 살펴보기 위해 광반사 신호를 실시간으로 계측하였다. 또한 레이저섬광사진법 (laser flash photography)을 이용하여 액막의 급속한 기화과정을 가시화하고 어블레이션 플룸 (ablation plume)과 충격파의 전파 양상을 분석하였다. 한편, 액막이 도포된 고체의 낮은 레이저 플루언스에서의 어블레이션 현상과 액막 보조 레이저 세척과정은 상당한 유사성을 지닌다.^(12,13) 따라서 레이저와 고체의 상호작용에서 액막의 역할에 대한 연구는 액체에 의해 펄스레이저 어블레이션 효율이 증진되는 현상의 이해에도 대단히 중요하다.

결론적으로, 본 논문은 레이저 세척 공정에서 액막의 역할과 관련하여 다음 두 가지 질문에 답하는 것을 주된 목적으로 한다.

(1) 액막 보조 레이저 세척 공정에서 급속한 가열로 생성되는 기포의 거동과 압력파 발생과는 어떤 관계를 갖는가?

(2) 액막 보조 레이저 세척 공정에서 나타나는 액체 박막의 기화 현상과 벌크 액체의 기화 현상은 본질적으로 (열역학적으로) 유사한 현상인가?

2. 실험

Fig. 1 에는 실험장치의 개략도가 나타나 있다. 가열된 액체를 포함한 용기에 정제된 압축공기 펌프가 가해지면 용기 상부로부터 포화수증기가 분사되고 시편에 입사된 포화 수증기는 표면에 응축되어 얇은 액막을 형성한다. 이 방법에서는 압축 공기압, 분사시간, 노즐 크기, 거리 등을 변화시켜 액막의 두께를 마이크로미터 이하의 정밀도로 조절하는 것이 가능하다. 표면 변위 측정 실험은 KrF 엑시머 레이저($\lambda=248\text{ nm}$, FWHM (full width at half maximum)=24 ns) 세척 공정을 대상으로 하였고 반사율 측정과 가시화 실험은 Q-switched Nd:YAG 레이저($\lambda=1064\text{ nm}$, 355 nm, FWHM=6 ns) 세척 공정을 대상으로 하여 수행하였다. 변위 측정 실험에 특별히 엑시머 레이저를 이용한 이유는 실험 결과를 기포의 동적 거동을 측정할 광간섭 실험 결과와 비교하기 위한 것이다.⁽¹⁰⁾ Michelson 간섭계를 기본으로 하여 광간섭 실험장치를 구현하였다. 연속파 HeNe 레이저 빔($\lambda=633\text{ nm}$; 20 mW)은 빔 분할장치 (beam splitter)를 통과하면서 두 개의 빔으로 갈라지게 된다. 이 중 하나의 빔은 시편에 의해서 반사되고 다른 하나의 빔은 거울에 의해 반사된 이후 다시 만나게 된다. 이때 두 빔의 경로차에 의해서 상쇄 및 보강 간섭을 일어나 빛의 강도가 변화하고 이를 광센서를 이용하여 측정하게 된다. 시편의 반사율 또한 연속파 HeNe 레이저 빔을 이용하여 측정하였다. 레이저섬광 음영각 사진 (laser flash shadowgraph) 영상을 나노초 단위로 촬영하기 위해 질소 레이저 여기 색소 레이저($\lambda=640\text{ nm}$, FWHM=4 ns)를 사용하였으며 색소 레이저에 의해 순간적으로 노출된 영상을 포착하기 위해서는 6 μm 공간 분석 능력을 갖춘 확대현미경을 장착한 CCD 카메라를 이용하였다. 각 기기들은 3 ns 의 시간 분해능을 갖는 시간 제어 장치에 의해 동조시켰다. 광간섭, 광반사 측정 장치 및 레이저섬광 사진법 실험장치는 참고문헌^(8,9)에 서술된 실험장치들과 대체로 유사하므로 자세한 규격의 서술은 생략하였다.

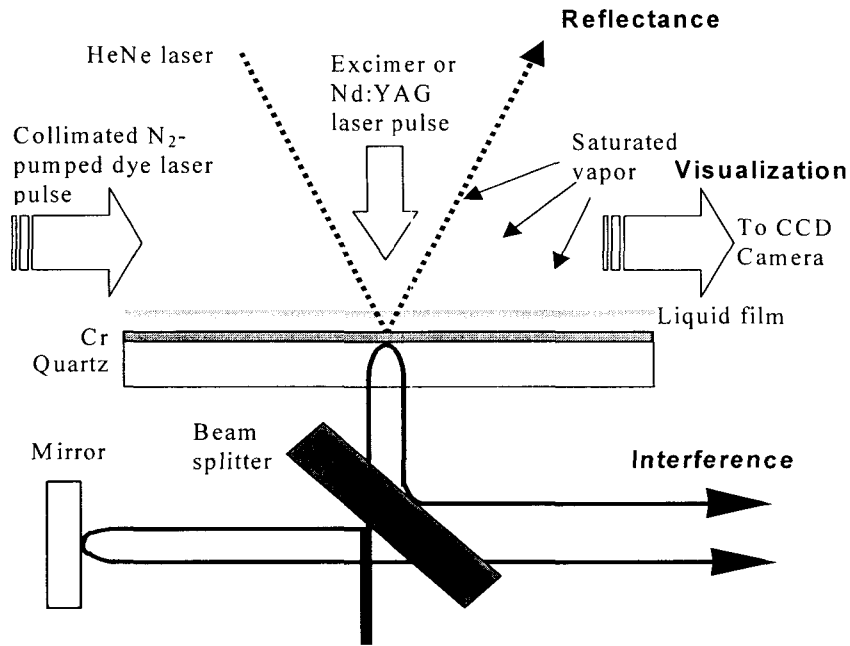


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

3. 결과 및 토의

3.1 시편 변위의 간섭 측정

Fig. 2(a) 와 (b)는 엑시머 레이저 펄스에 노출된 세척 시편의 과도적인 변위를 액체층의 유무에 따라 각각 나타낸 것이다. 변위 측정에 이용된 시편은 0.5 mm 두께의 수정 기판 위에 300 nm 두께의 크롬(Cr) 박막이 적층된 것이다. 먼저, 액체가 없는 “건식” 상태에서 레이저 펄스에 의해 유기된 표면 변위의 크기가 액체층이 있는 “습식”의 경우와 비교해 볼 때 매우 작음을 그림을 통해서 알 수 있다. 건식 상태에서 레이저 펄스에 의해 유발된 변위는 시편 표면의 열탄성 변형 또는 자연 산화막의 어블레이션에 의한 것인 반면 습식 조건에서의 시편의 상대적으로 큰 반동 운동은 액체의 기화 시 압력 충격으로 인해 발생한 것이다. 따라서 건식의 경우 시편의 변위는 레이저 펄스 공급과 더불어 증가를 시작해서 48 ns 후 레이저 펄스가 차단될 때 증가를 멈춘다. 반면에 습식의 경우는 레이저 펄스가 가해진 후 일정시간 동안 변위의 별다른 증가가 없다가 100~200 ns 이후 급격히 증가한 뒤 500~1000 ns 구간에서 증가가 둔화된다. Fig. 2(c)에는 55 ~70 mJ/cm² 레이저 플루언스 범위에서 액체의 기화 과정을 간섭계로 측정한 결과

도시하였다.⁽¹⁰⁾ 유효기포층은 레이저 펄스가 공급된 뒤 수십 나노초 이후부터 성장하기 시작하여 200~400 ns 동안 성장한 후에 서서히 소멸함을 알 수 있다. Fig. 2(a)에 도시된 변위 측정 결과를 기포층의 거동과 비교해보면 기포 핵이 성장하는 단계에서 압력파가 생성되어 시편에 반동력을 작용한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기포핵이 폭발적으로 성장하면서 압력파를 방출하여 세척 효과를 유발한다는 기존 연구의 가설을 입증해 준다.^(7,10)

3.2 광반사 신호 측정

액막 보조 세척 과정에서 액체의 응축과 기화 과정을 분석하기 위해 광학적 반사 신호를 측정하였다. 결정질 실리콘 시편 위에 도포된 액막과 기포에 의한 빛의 산란과 간섭 현상을 관측하기 위해서 17°의 입사각을 가지는 s-편광 (TE-polarized) HeNe 레이저 빔이 이용되었다. Fig. 3(a)와 (b)에는 isopropanol 과 물의 혼합액의 어블레이션 과정에서 얻어지는 전형적인 반사 신호의 경과가 서로 다른 시간 스케일로 나타나 있다. 우선, Fig. 3(a)에서는 레이저 펄스 조사 시점($t=0$)에 액막의 기화로 인해

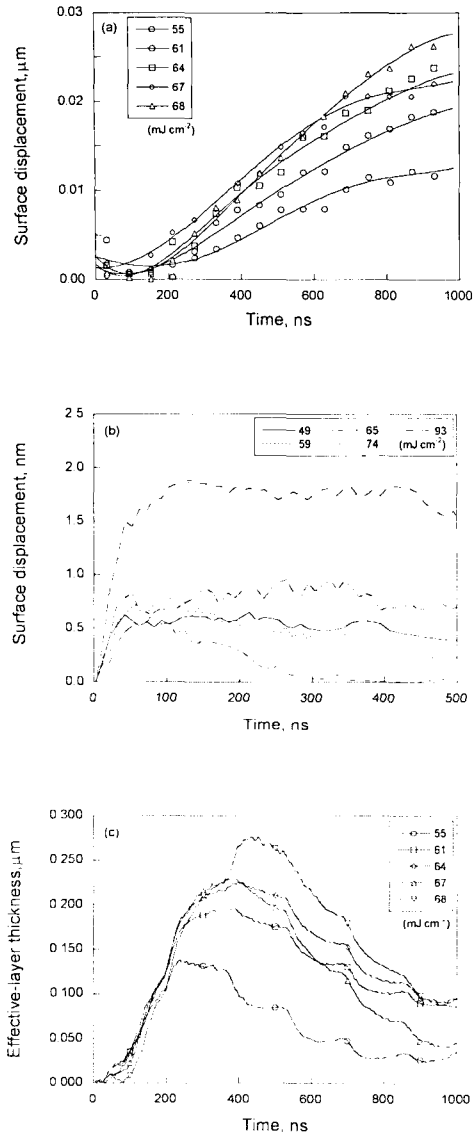


Fig. 2 Displacement of a cleaning target induced by an excimer laser pulse (a) with and (b) without liquid-film deposition on the laser spot (pure water). The variation of the effective layer thickness is displayed in (c) for comparison

반사율이 급격히 증가하는 전이(R_i) 현상을 볼 수 있다. 액체에 잠긴 고체 표면에서 레이저 조사에 의해 기화가 일어나는 경우와는 달리 액체 박막 내에서 발생하는 폭발적 기화는 액막의 두께를 감소시킨다. 그리고 이러한 액막 두께의 변화는 다중간섭 신호의 초기 위상에 따라 반사 신호를 증가시키기도 하고 감소시키기도 한다. 레이저로 인한 액막 두께의 변화는 액막의 원래 두께에 비해

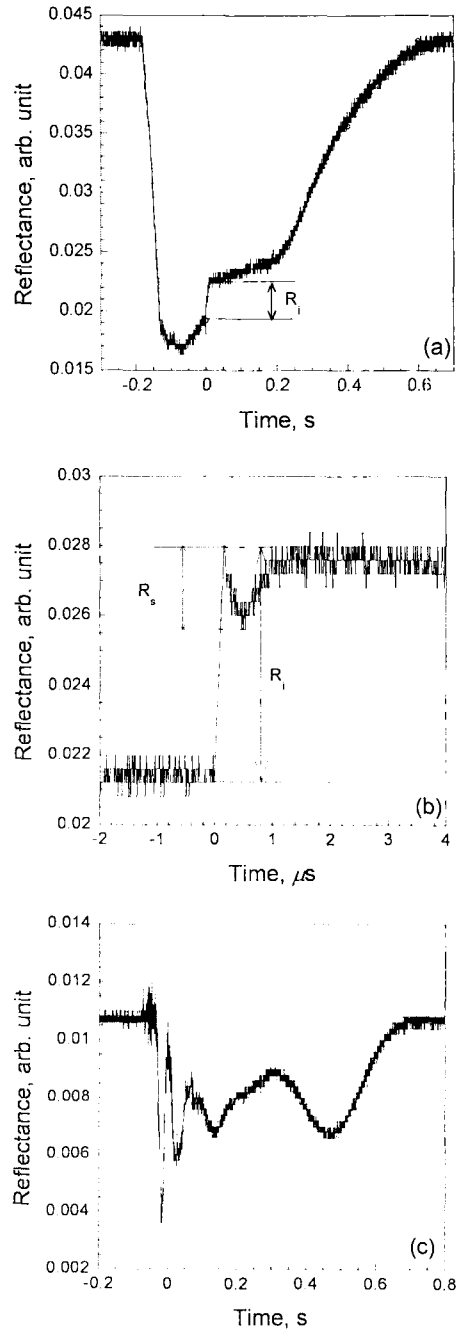


Fig. 3 Variation of optical reflectance by condensation and vaporization of liquid mixtures on a Si surface. In (a) and (b), a liquid film (1:10 isopropanol-water composition) is applied on a Nd:YAG laser (wavelength=355 nm) spot. The reflectance variation in (c) is generated by condensation and natural vaporization of liquid (1:4 isopropanol-water composition) without laser irradiation

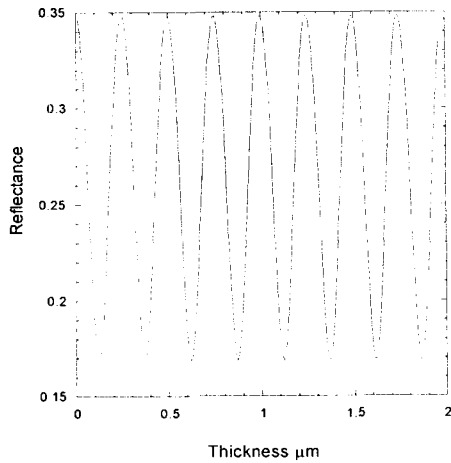


Fig. 4 Calculated reflectance change as a function of water-film thickness on a c-Si substrate ($\lambda=633$ nm, s-polarized, incident angle= 17°)

서 상대적으로 작으므로 장기간 동안의 반사 신호는 레이저 펄스 조사 여부에 관계없이 항상 유사한 형태를 띠게 된다. 레이저 펄스가 없을 경우는 액막이 공기 중에서 확산에 의해 자연적으로 소멸되므로 $t=0$ 에서와 같은 반사 신호의 불연속적 변동이 없고 Fig. 3(a)와 전체적으로 유사한 형태를 갖는다. Isopropanol 의 농도가 높은 혼합액의 경우는 같은 50 ms 의 증기 분사 동안 더 두꺼운 액막이 형성되게 된다. Fig. 3(c)는 이러한 액막 두께의 증가가 반사 신호에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이때, 입사된 탐사광은 액막 두께의 변화에 대응하여 다중간섭을 일으키므로 반사 신호는 상대적으로 선명한 간섭 무늬를 나타내면서 산란의 영향으로 전체적으로 감소하였다가 액막이 증발하면서 다시 회복되는 형태를 띤다. Fig. 4 에는 공기-물-실리콘으로 이루어진 계면에서 다중간섭 신호를 산란의 영향을 무시하고 이론적으로 예측한 결과를 액막 두께의 함수로 나타냈다. 계산에 사용된 물과 c-Si 의 복소수굴절율은 각각 $1.3317+1.534 \times 10^{-8}i$ 와 $3.882+0.019i$ 이다.^(14,15) 그림을 통해 액막의 두께가 변화하면서 나타날 수 있는 신호의 개형을 파악할 수 있을 뿐 아니라 Fig. 3(c)에 나타난 간섭 무늬의 개수와 비교해 보면 액막의 두께가 대체로 수 마이크로미터를 넘지 않음을 알 수 있다. 한편, 액막의 소멸이 등온상태에서 농도차에 의한 액체의 확산에 의한 것이라고 가정하면 액막의 두께는 반사 신호 회복시간의 제곱근에 비례하게 되고 반

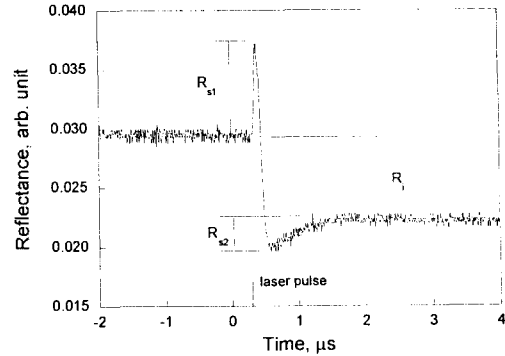


Fig. 5 Transition of the optical reflectance signal by Nd:YAG laser pulse irradiation on a Si surface coated with a 1:10 isopropanol-water mixture (wavelength: 1064 nm, laser fluence: 670 mJ/cm^2)

사 신호로부터 액막의 두께를 추정할 수 있고⁽¹²⁾ 이 경우도 통상적인 실험 조건 하에서 액막의 두께는 수 마이크로미터를 넘지 않음을 보일 수 있다. Fig. 3(c)의 경우에도 전체적인 반사 신호 곡선의 형태는 레이저 펄스의 유무와 관계가 없는데 이것은 액막의 제거가 주로 액체의 자연 기포 즉 주변 공기로의 확산으로 인한 것임을 의미한다.

Fig. 3(a)와 (b)에는 반사 신호의 천이(R_i)를 관찰할 수 있는데 이러한 반사율의 변동은 수백 ns 이 내의 비교적 짧은 시간 동안 일어나며 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 이행 시간 동안 일시적인 증가와 감소를 수반한다. 반사율의 변화를 측정하는 수백 nm 의 시간 구간에서는 액막의 표면 형상은 일정하게 유지된다. 따라서 반사율의 일시적인 변화(Fig. 3 에 표시된 R_i)는 액막의 표면 굴곡과 무관하다고 할 수 있고, 액막 내에서 생성된 기포에 의한 탐사광의 Rayleigh 또는 Mie 산란에 의한 것이다.⁽⁴⁾ Fig. 5 에는 액막이 도포된 c-Si 표면에서 레이저 조사로 인해 반사 신호가 급격히 감소하는 과정을 도시하였다. 그림에는 초기에 고액 계면에서 기포층이 성장하면서 Rayleigh 산란에 의해 반사율이 일시적으로 증가하였다가(R_{s1}) 기포의 크기가 빛의 파장에 근접하면 Mie 산란의 영향으로 반사율이 감소한(R_{s2}) 뒤 기포의 소멸과 더불어 다시 회복되는 과정이 잘 나타나 있다. Fig. 5 의 결과는 고액 계면에서 펄스레이저에 의해 유발되는 기포의 생성 과정은 액막의 두께와 무관함을 의미한다. 따라서 발생하는 압력파의 크기 즉 세척력의 크기 자체는 액막 두께의 영향을 크게 받지 않을 것임을 유추할 수 있다. 단, 플룸 또는 제거된

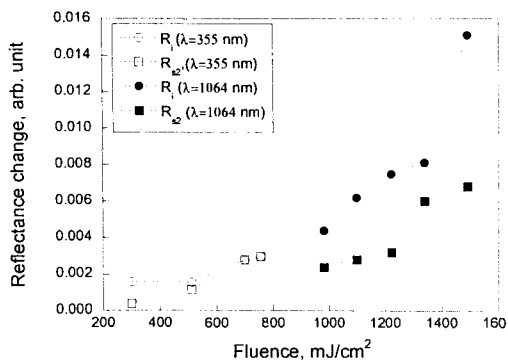


Fig. 6 Optical reflectance change induced by laser irradiation of the liquid film as a function of laser fluence

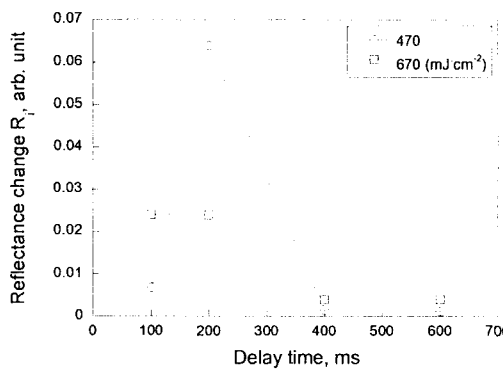


Fig. 7 Optical reflectance change for various delays times between onset of liquid film deposition and Nd:YAG laser-pulse irradiation

입자의 동적 거동은 액막 두께의 영향을 받을 것이므로 전체적인 세척시스템의 효율이 두께에 따라 변할 수 있음은 물론이다.

Fig. 6 에는 레이저 플루언스가 반사율 변화에 미치는 영향이 나타나 있다. 액막 두께의 변화를 나타내는 반사율 천이(R_i)와 기포의 레이저 빔 산란에 따른 단기간의 과도 신호(R_s) 모두 레이저 플루언스에 따라 증가한다. Fig. 7 은 일정한 레이저 플루언스에서 초기 액막의 두께와 반사율의 변화와의 관계가 나타나 있다. 이 실험에서는 액막 도포 개시 후 레이저 펄스가 조사되는 시점을 변화시키는 방법으로 액막의 두께를 조절하였다. 액

막은 포화 수증기의 응축에 의해 생성되며 공기 중으로의 확산으로 인해 서서히 기화되기 때문에 액막의 두께는 레이저 조사 시점에 따라 다르다. 액막의 두께는 액막 도포 시작 후 수백 ms 동안은 증가하지만 일단 액막의 응축 과정이 끝나면 감소한다. Fig. 7 은 레이저 플루언스가 일정함에도 불구하고 반사율의 변화가 액막의 두께에 의해서 변화됨을 보여주고 있다. 이번 실험에서 액막은 약 200 ms 까지 성장하고 이후 서서히 감소하게 된다. 액막이 성장하는 동안 간섭계에 의해서 측정되는 간섭무늬는 2 개이며 Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 액막의 두께는 약 $0.5 \mu\text{m}$ 의 최대값을 가진다. Fig. 7 은 액막의 두께가 최대값을 가질 때 반사율의 변화도 최대가 되는, 즉 반사율의 변화가 액막 두께에 비례하여 증가한다는 사실을 보여준다. 반사율의 변화 정도는 레이저 펄스에 의한 액막의 기화 과정의 특성을 반영하여 준다. 수 마이크로미터 이내의 액막의 기화 현상은 기포의 핵생성과는 달리 액막 두께와 같은 유체역학적 특성에 크게 의존함을 알 수 있다. 액막을 이용한 세척(입자 제거) 방법에서 시편으로부터 떨어진 입자들은 이후 플룸의 거동을 따라 이동하며 시편으로부터 제거되기도 하고 때로는 재부착 되기도 한다 따라서 플룸의 동적 거동을 결정하는 액막의 두께는 세척 과정과 효율에 영향을 미친다.⁽⁸⁾ 하지만 세척에 필요한 한계 플루언스는 대체로 두께 변화의 영향을 받지 않는다는 사실에 주목할 필요가 있다. 증기 분사 기간을 변화시키면서 수행한 한계 플루언스 측정 실험에 따르면 기포 핵생성 한계값(세척 한계값)은 수백 나노 미터에서 수백 마이크로 미터 범위에서는 액막 두께에 의존하지 않았다.

3.3 액막 보조 레이저 세척 과정의 가시화

입자를 부착시키지 않은 Si 웨이퍼 위에서 액막의 어블레이션 과정을 나노초 단위의 레이저섬광 사진법으로 가시화 하였다. 레이저로 인해 액막이 제거되는 연속적인 과정이 Fig. 8 에 나타나 있다. 도시된 음영각 사진들은 기화된 증기와 액적으로 구성된 어블레이션 플룸의 전파 양상을 보여준다. 액막의 어블레이션 과정에서는 약한 충격파가 생성되어 공기중의 음속과 유사한 340 m/s 의 속도로 전파되는 반면 플룸의 전파속도는 충격파와 압력파의 전파속도보다 훨씬 느리다. Fig. 9 는 음영각 사진에 나타난 플룸 전면의 위치를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 플룸의 전파 속도는 초기에는 isopropanol 과 물의 혼합 농도에 상관없이 유사하

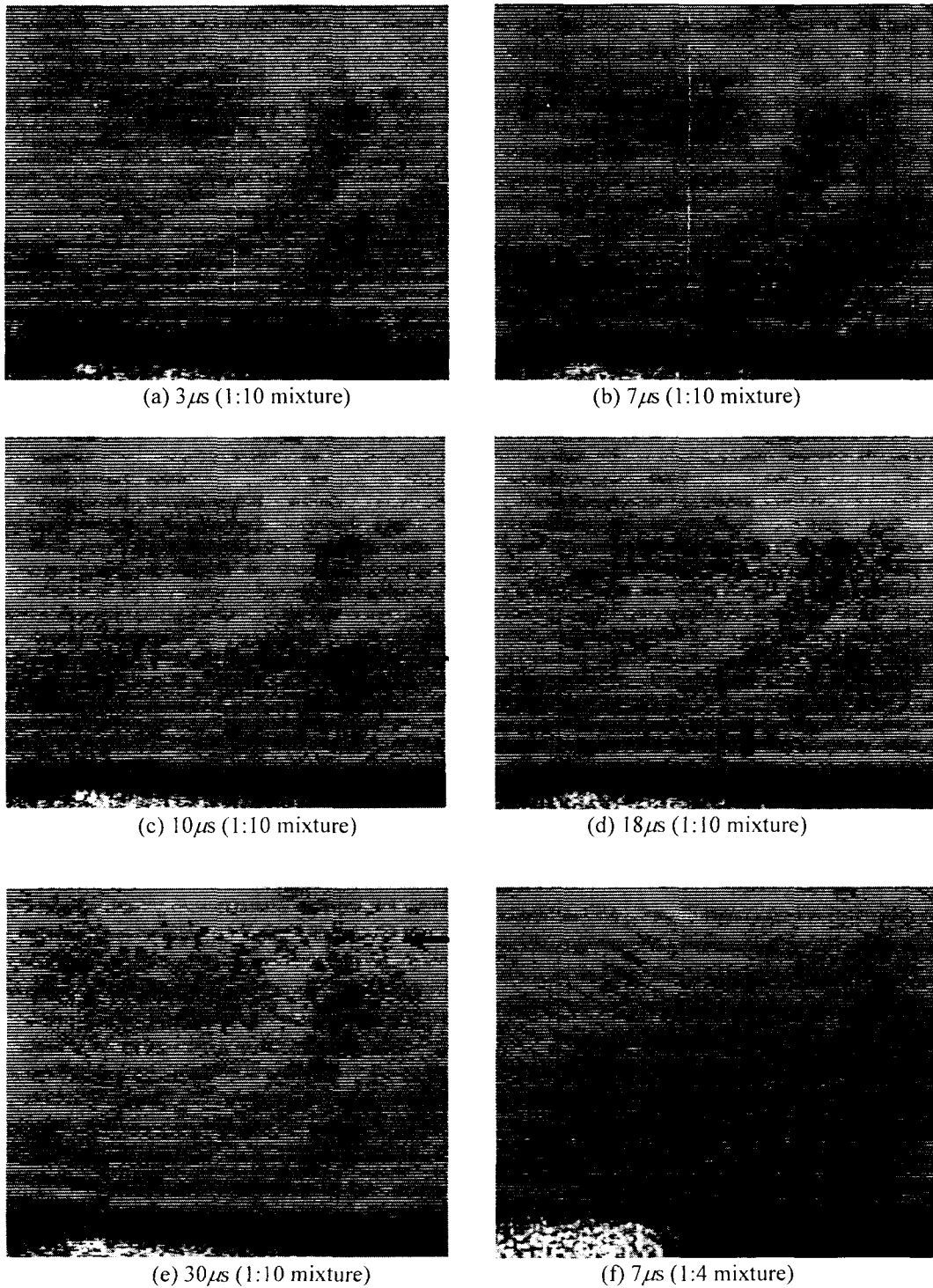


Fig. 8 Laser flash shadowgraphs illustrating vaporization of a liquid film (1:10 isopropanol-water mixture) at several delay times after Nd:YAG laser-pulse irradiation (width of image=1.2 mm, wavelength=1064 nm, laser fluence mJ cm^{-2})

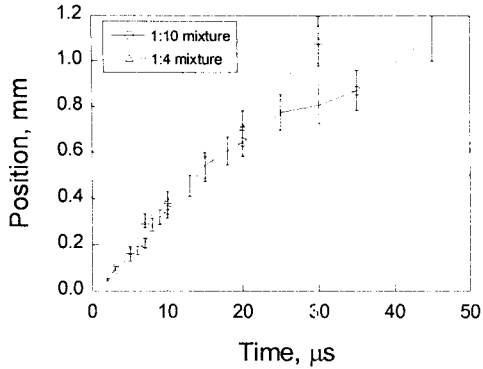


Fig. 9 Propagation of the liquid plume front in Nd:YAG laser induced ablation of a liquid film ($\lambda=1064$ nm, $F=887$ mJ/cm²)

지만 시간이 지나면 액막이 두꺼운 경우(1:4)에 전파속도가 느림을 알 수 있다. 1:4 와 1:10 혼합물 플룸의 평균 속도는 각각 25 m/s 와 36 m/s 이다. 본 연구에서는 레이저 플루언스와 초기 액막 두께를 다양하게 변화시키면서 어블레이션 과정의 가시화 실험을 반복 수행하였다. Fig. 8(f)에는 isopropanol 의 농도가 높은 수용액의 기화 현상이 나타나 있는데 이를 Fig. 8(b)와 비교하면 액체 플룸은 낮은 농도의 isopropanol 용액의 경우에는 1차원적으로 전파되지만 고농도의 수용액을 이용한 실험에서는 (즉, 액막의 두께가 두꺼운 경우에는) 크기가 큰 액적의 수가 증가하고 플룸이 2차원적으로 퍼져나간다는 것을 알 수 있다. 한편, 레이저 플루언스가 플룸의 거동에 미치는 영향은 액막 보조 레이저 세척의 일반적인 작동 조건 하에서는 액막 두께의 영향과 비교하면 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 액막 보조 레이저 세척의 물리적 메커니즘을 도포된 액막의 영향에 중점을 두고 일련의 광학적 실험을 통해 분석하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 레이저 펄스 방사 후 시편의 움직임을 광간섭계로 측정하여 액막 보조 세척 과정에서 압력 충격이 레이저에 의해 생성되는 기포핵 성장의 초기 단계에 발생됨을 증명하였다.
- (2) 기포핵 형성 한계값과 그에 대응하는 세척 한계값이 레이저 플루언스에 주로 영향을 받는 반면 액막의 거동은 주로 액막 두께의 영향을 받는다.

- (3) 액체 박막이 기화하는 경우에도 레이저에 의해 생성된 기포는 Rayleigh 또는 Mie 산란을 일으켜 반사율을 단기적으로 변화시키며 이 때 변화량은 레이저 플루언스에 비례한다. 이러한 결과는 액막 보조 레이저 세척 과정에서 발생하는 기화 현상과 벌크 액체에 잠긴 시편의 고액 계면에서 발생하는 폭발적 기화 현상이 열역학적으로 유사함을 입증한다. 따라서 벌크 액체를 이용한 연구를 통해 액막 보조 레이저 세척의 물리적 기구를 파악할 수 있다.
- (4) 액막 보조 세척 과정에서 생성되는 액체 플룸의 특성을 나노초 단위의 시간 분해능을 가진 가시화 장비를 이용해 분석한 결과에 따르면 어블레이션 플룸은 수십 m/s 의 속도로 느린 전파되며 액막의 두께가 커질수록 느려지고 2차원적 (반구형) 형태를 띠게 된다.

후 기

본 연구는 BK21 과제와 서울대학교 마이크로열 시스템 ERC 의 부분적인 지원을 받았다. 그리고 실험과 연구결과의 정리에 도움을 준 포항공대 대학원 임현규와 박명기에게 감사한다.

참고문헌

- (1) Mittal, K. L. ed., *Particles on Surfaces I: Detection, Adhesion, and Removal*, Plenum Press, New York, 1988.
- (2) Tam, A. C., Leung, W. P., Zapka, W., and Ziemlich, W., 1992, "Laser-Cleaning Techniques for Removal of Surface Particulates," *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, pp. 3515~3523.
- (3) Zapka, W., Ziemlich, W., Leung, W. P., and Tam, A. C., 1993; "'Laser Cleaning' Removes Particles from Surfaces," *Microe. Engin.*, Vol. 20, pp. 171~183.
- (4) Yavas, O., Leiderer, P., Park, H. K., Grigoropoulos, C. P., Poon C. C., Leung, W. P., Do, N., and Tam, A. C., 1993, "Optical Reflectance and Scattering Studies of Nucleation and Growth of Bubbles at a Liquid-Solid Interface Induced by Pulsed Laser Heating," *Physical Review Letters*, Vol. 70, pp. 1830~1833.
- (5) Yavas, O., Leiderer, P., Park, H. K., Grigoropoulos, C. P., and Tam A. C., 1994, "Enhanced Acoustic Cavitation Following Laser-Induced Bubble Formation: Long-Term Memory Effect," *Physical Review Letters*, Vol. 72, pp: 2021~2024.
- (6) Park, H. K., Grigoropoulos, C. P., Leung, W. P., and Tam, A. C., 1994, "A Practical Excimer Laser-Based Cleaning Tool for Removal of Surface Contaminants," *IEEE Transactions of Components, Packaging, and*

- Manufacturing Technology - Part A*, Vol. 17, pp. 631~643.
- (7) Park, H. K., Kim, D., Grigoropoulos, C. P., and Tam, A. C., 1996, "Pressure Generation and Measurement in the Rapid Vaporization of Water on a Pulsed-Laser-Heated Surface," *Journal of Applied Physics*, Vol. 80, pp. 4072~4081.
- (8) She, M., Kim, D., and Grigoropoulos, C. P. 1999, "Liquid-Assisted Pulsed Laser Cleaning using Near-Infrared and Ultraviolet Radiation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, pp. 6519~6524.
- (9) Kim, D., Ye, M., and Grigoropoulos, C. P., 1998, "Pulsed Laser Induced Ablation of Absorbing Liquids and Acoustic-Transient Generation," *Applied Physics A*, Vol. 67, No.2, pp. 169~181.
- (10) Kim, D., Park, H. K., and Grigoropoulos, C. P., 2001, "Interferometric Probing of Rapid Vaporization at a Solid-Liquid Interface Induced by Pulsed Laser Irradiation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 20, pp. 3843~3853.
- (11) Maxwell Garnett, J. C., 1904, "Colours in Metal Glasses and in Metallic Films," *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 203 (Ser. A), pp. 385~420.
- (12) Dongsik Kim and Ho Lee, 2001, "Enhancement of Pulsed-Laser Ablation by Phase Explosion of Liquid," *Trans. Of the KSME, B*, Vol. 25. No. 11, pp. 1483~1491.
- (13) Kim, D. and Lee, H., 2001, "Enhanced Ablation and Photoacoustic Excitation in Near-Threshold Laser Ablation of Liquid-Coated Surface," *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, No. 10, pp. 5703~5706.
- (14) Palik, E. D., ed., *Handbook of Optical Constants of Solids II*, p. 1071, Academic Press, Washington, 1991.
- (15) Palik, E. D., ed., *Handbook of Optical Constants of Solids*, p. 565, Academic Press, Washington, 1985.