Nd:YAG 레이저의 근적외선과 자외선 펄스를 이용한 NiP 하드디스크 기층의 세척

김동식 · C. P. Grigoropoulos**

Cleaning of NiP Hard Disk Substrate Using Near-Infrared and Ultraviolet Irradiation of Nd:YAG Laser Pulses

D. Kim, C. P. Grigoropoulos

*포항공과대학교 기계공학과, **University of California at Berkeley, USA

ABSTRACT

This paper introduces a cleaning process for removing submicron-sized particles from NiP hard disk substrates by the liquid-assisted laser cleaning technique. Measurements of cleaning performance and time-resolved optical diagnostics are performed to analyze the physical mechanism of contaminant removal. The results reveal that nanosecond laser pulses are effective for removing the contaminants regardless of the wavelength and that a thermal mechanism involving explosive vaporization of liquid dominates the cleaning process.

Key words: Explosive vaporization, Laser cleaning, Nd:YAG laser, NiP

1. 서 론

오염제어와 효과적 세척기구의 개발은 다양한 산업분야에서 매우 중요하다.[1] 특별히, 마이크론 이하 미세입자에 의한 오염은 반도체 기기와 데이터 저장 산업에서 중요한 문제로 부각되었다. 오염물질 중 미세 입자를 제거하는 경우에는 입자의 상대적으로 강한 접착력을 극복하기 위한 특수한 기술이 요구된다. 예를 들면, Fig.1에 순수한 Ni 표면에 부착된 알루미나 (Al_2O_3) 입자에 작용하는 접착력이 예시되어 있다. 계산하는데 있어 입자와 표면 사이 간극은 전형적인 분자 간격인 4Å으로 가정하였으며 알루미나와 Ni의 Lifshitz-Van der Waals 상수는 각각 4.0 eV 와 8.4 eV를 이용하였다. Fig.1에서 접착력은 중력 즉 알루미나 입자의 하중에 의해 무차원화 되었다. 그림에는 Van der Waals 힘, 정전기력, 대기 중 습기로 인한 모세관력 등을 구

분하여 나타냈고 정전기력은 입자와 표면의 과잉 전하에 의한 영상력 (image force)과 접촉 전압에 의한 이층력 (double layer force)을 따로 고려하였다.[2,3] 접착력과 관련하여 주목할 것은 오염된 고체표면 위에 액막을 분사하면 오염물질과 고체 표면간의 결합력이 약화된다는 것이다. 만일 한 입자가 액체 속에 잠기었다면, Van der Waals 힘은 전자기적 차폐효과로 감소되어진다. 게다가, 액체를 이용한 공정에서는 상 경계면이 없으므로 모세관 접착력이 존재하지 않는다. 그러므로, 액상 레이저 세척 과정은 건조세척과정에 비하여 여러가지 고유한 장점들을 지닌다.

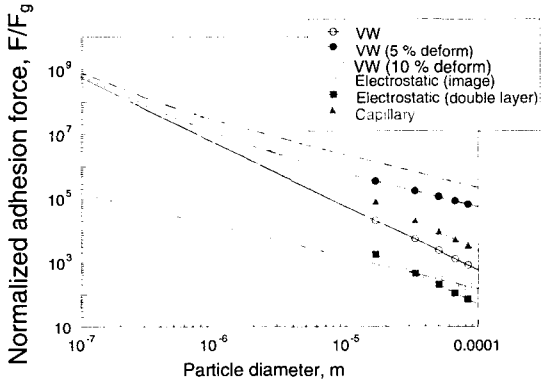

Fig. 1 Adhesion forces between a spherical alumina particle and a Ni surface (normalized by the particle weight). Van der Waals force has been estimated for 0, 5, or 10 % of volume deformation in the contact region

본 연구에서는 NiP 하드디스크 기층에 부착된 미세 알루미나 입자를 Q-switched Nd: YAG 레이저 (λ=1064 and 355 nm, FWHM=6 ns) 펄스로 제거하는 공정을 분석한다. 엑시머 레이저 (excimer laser)를 이용한 앞선 연구에서 나노초 레이저 펄스가 미세 입자 제거에 효과적이고, 세척효율은 레이저 플루언스 (fluence), 펄스 폭, 파장, 입사각, 생성된 액막의 두께, 그리고 분사 액체의 특성과 같은 요인들에 따라 결정됨이 밝혀졌다.[4,5] 본 연구에서는 NiP 하드디스크 표면을 세척하기위해 Nd:YAG 레이저를 이용하는데, 이는 고상 레이저를 이용한 세척이 엑시머 레이저를 이용한 세척에 비해 상대적으로 시설비용이 적고 장비의 유지가 쉽다는 장점을 지니기 때문이다. 따라서 본 연구의 목적은 레이저 세척 시험을 근적외선과 자외선 (λ=1064 nm and 355 nm)에서 시행함으로써 레이저 파장의 역할을 밝히고 고상레이저의 사용가능성을 판별하는 것이다. 한편 본 논문에서는 실험결과에 기초하여 액상 레이저 세척의 물리적 메커니즘 또한 분석된다.

2. 실 험

실험장비의 개략도가 Fig.2에 나타나 있다. 세척장치는 엑시머 레이저를 이용한 것과 유사하다.[4] Q-switched Nd:YAG 레이저빔은 기층에 조사되어 액막 박막을 증발시킨다. 이런 급속한 상변화 과정은 레이저 플루언스, 펄스 폭, 기층의 흡수계수 그리고 레이저 입사각과 같은 몇몇 인자들의 영향을 받는다. 기존 연구 결과에 따르면 레이저 빔의 입사각이 클수록 입자 제거에 효과적이지만 반사율이 커지고 레이저 플루언스가 감소하여 큰 레이저 출력을 필요로 한다.[4] 따라서 본 실험에서 레이저 빔은 40°의 입사각으로 시편에 입사된다. 액막은 포화증기의 분사에 이은 응축과정을 거쳐 형성된다. 용기 내 액체를 포화점보다 약간 낮은 온도로 유지하기 위해 가열기가 사용된다. 용기내의 포화기체가 압력펄스를 받으면 노즐을 통해 분사되어 상온에 노출된 표면에 응축된다. 액막 증착을 위한 압력파는 약 200ms동안 지속된다. 그리고 200ms 시간이 더 지난 후, 액막 응축이 완료되면 Nd:YAG 레이저 펄스가 시편에 조사된다.

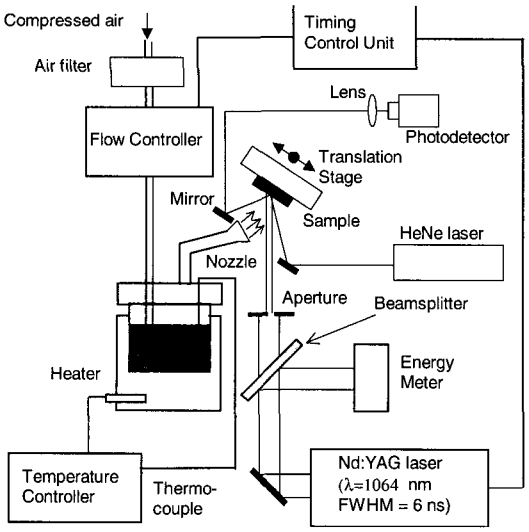

Fig. 2 Schematic diagram of the Nd:YAG laser (variable wavelength, FWHM=6 ns) cleaning systems.

Fig.2에 도시된 바와 같이, 레이저 세척의 물리적 기구를 밝히기 위해서 반사율 측정 실험이 수행된다. 실험에서는 HeNe 레이저 (λ=633 nm) 탐사광의 반사율이 입사각 10°에서 측정된다. 입사각은 결과 해석의 편의를 위하여 유사한 현상에 관한 기존 연구 범위 내에서 선택된 값이다.[6,7] 반사율 측정 실험은 액막의 상변화 거동을 분석하기 위한 것이므로 오염 입자를 부착시키지 않고 수행했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 입자제거 한계 플루언스

미세 알루미나 입자가 제거되는 한계 레이저 플루언스 (threshold laser fluence)는 레이저 펄스 조사 전후 현미경 영상을 해석함으로써 얻어진다. 오염 입자 (Al_2O_3)의 크기가 불균일하기 때문에 (평균 직경이 0.3 μm) 입자제거 한계는 입자 크기에 따라 달라진다. 큰 입자 또는 집체들은 상대적으로 낮은 레이저 플루언스에도 쉽게 부서지거나 분리된다. 작은 입자의 완전한 제거는 큰 입자들과 집체들의 제거에 필요한 것보다 훨씬 큰 레이저 플루언스를 필요로 한다. 실험 결과에 의하면 마이크론 이상의 크기를 갖는 입자의 제거에 필요한 최소 레이저 플루언스는 0.3 μm 입자의 완전한 제거에 필요한 플루언스보다 약 2배 낮다. 따라서, 본 논문에서 레이저 세척 한계 플루언스는 오염물질의 완전한 제거에 필요한 레이저 플루언스로써 정의한다. Fig.3 ~ Fig.6은 전형적인 레이저 세척 결과를 나타내고 있다. Fig.3과 Fig.5에 나타난 것처럼 낮은 레이저 플루언스에서는 일부 입자들만이 제거되고 레이저 플루언스가 임계값을 넘어가면 오염물질이 완전히 제거된다. 세척 한계 플루언스 F_{th}값은 파장 λ=1064 과 355 nm에 대하여 각각 86 과 63 mJ/cm^2 로 측정되었다.

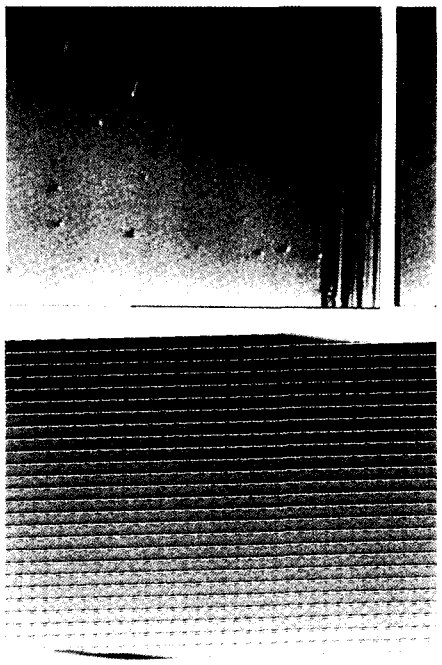

Fig. 3 Optical microscope photographs of a NiP hard disk surface contaminated with 0.3 μm-sized (average) alumina particles and the same spots after 10 steam Nd:YAG laser pulses (λ=1064 nm, 64 mJ/cm^2).

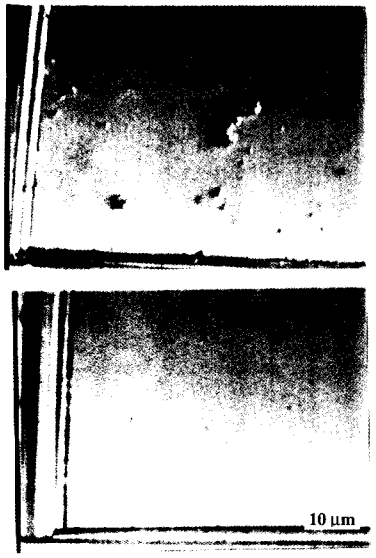

Fig. 4 Optical microscope photographs of a NiP hard disk surface contaminated with 0.3 μm-sized (average) alumina particles and the same spots after 10 steam Nd:YAG laser pulses (λ=1064 nm, 86 mJ/cm^2).

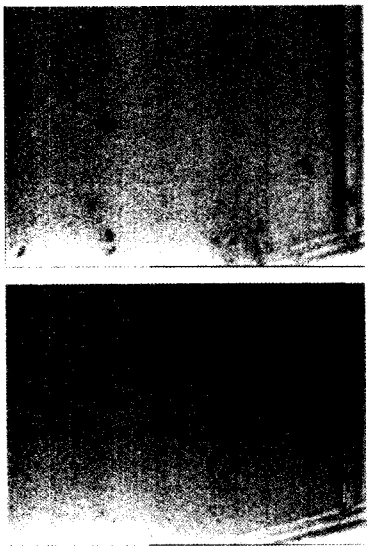

Fig. 5 Optical microscope image of a NiP hard disk surface contaminated with 0.3 μm-sized (average) alumina particles and the same spot after 10 steam Nd:YAG laser pulses (λ=355 nm, 44 mJ/cm^2).

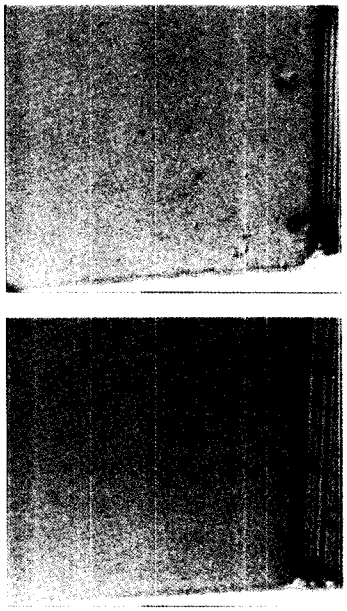

Fig. 6 Optical microscope image of a NiP hard disk surface contaminated with 0.3 μm-sized (average) alumina particles and the same spot after 10 steam Nd:YAG laser pulses (λ=355 nm, 63 mJ/cm^2).

3.2 습식 레이저 세척의 물리적 기구 분석

나노초 레이저를 이용한 액체의 급속한 가열은 폭발적인 증발, 즉 상폭발 (phase explosion)을 야기시킨다.[8] 습식 세척과정은 상폭발과 유사한 열적 기구에 기초하여 설명되어질 수 있다. 본 연구 결과, 근적외선과 자외선 파장 모두가 입자 제거에 효과적이라는 사실은 레이저 세척이 광화학적 기구 (photochemical mechanism)에 의한 것이 아님을 나타낸다. 파장 355 nm에서 광자 에너지가 3.5 eV인 반면 파장 1064nm에서 광자 에너지는 1.2 eV에 불과하다.

두 파장에 대한 세척 한계 플루언스의 차이는 NiP 표면의 광학적 특성이 파장의 함수이기 때문이다. 본 연구에서는 NiP 표면의 반사율을 300nm ~ 1200nm 범위에서 ellipsometer를 이용하여 측정하였다. 실험결과, 표면 반사율 R

은 λ=1064nm에서 0.64이고 λ=355nm에서 0.39이다. 두 경우 모두 광학적 침투 깊이 (λ=1064nm에서 $1/\alpha = 4\pi k$=20nm 이고 λ=355nm에서18nm, α: 흡수율, k : 흡광계수)는 열적 침투 깊이 ($\sim\sqrt{4_{K\tau}}$= 300 nm , k : 열확산도, τ : 레이저 펄스 폭)보다 더 작다. 그러므로 열영향부 (heat-affected zone)의 온도 상승은 근사적으로 흡수율 ($A=1-R$)에 선형 비례한다. 세척 한계 플루언스가 레이저 조사에 의해 생성되는 최대 표면 온도에만 의존한다고 가정하면 자외선 파장에서의 세척 한계 플루언스에 대한 적외선파장에서의 세척 한계 플루언스의 비는 흡수율 비의 역수와 같아져야 한다. 본 입자 제거 실험에서 F_{th} (λ=1064 nm)/F_{th}(l=355nm) 비는 1.37로 측정된 반면 A (λ=355nm)/A(λ=1064nm) 비는 1.69이다. 두 값의 차이는 레이저 에너지의 불안정에서 주로 기인하는 것으로 추정된다. 한계 레이저 플루언스는 10개 펄스에 대한 평균값인데 실험에 이용된 Nd:YAG 레이저의 출력은 평균값을 중심으로 다소 진동한다. 기본 파장에서 레이저 펄스 에너지는 평균 값을 중심으로 최대 2%의 분산을 보이는 반면 3차 조화파의 경우 최대 측정 오차는 7%이다.

한계에너지에서 최대 표면 온도는 NiP (1200 K)의 용융점보다 낮다. 따라서 세척과정 동안 레이저로 인한 손상의 가능성은 배제될 수 있다. 레이저 세척 공정에 의한 표면 손상 여부는 전자현미경 사진 판독과 EDS (energy dispersive spectroscopy) 등을 통하여 판정하였다. 액막으로 덮인 표면의 손상 한계 플루언스는 약 115 mJ/cm^{2}이고 건조한 표면의 경우 약 100 mJ/cm^{2}로 측정되었다.

레이저 세척 성능에 영향을 미치는 많은 인자들 가운데 레이저빔 입사각은 결정적인 역할을 한다. 기본파장에서 수행된 실험결과에 따르면 경우 수직 입사각에서 0.3 μm 크기의 알루미나 입자를 완전히 제거하는 것은 불가능하다. 레이저 플루언스가 53 mJ/cm^2 이상이면 마이크론 입자들이 표면으로부터 떨어져 나가기 시작하지만 표면 손상 한계점에 이르기까지 미세 입자의 완전한 제거는 관측되지 않았다.

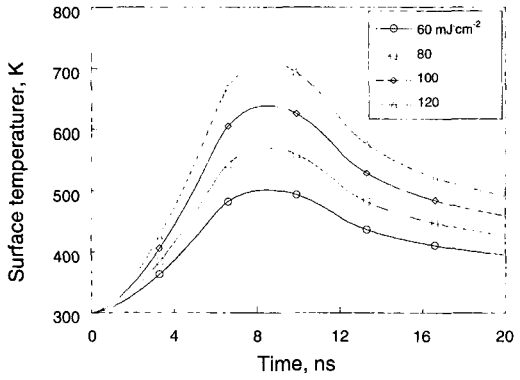

Fig. 7 The temporal variation of the NiP surface temperature irradiated by an Nd:YAG laser pulse for several laser fluences (λ=1064 nm, FWHM=6 ns, incident angle = 40°)

표면 온도의 상승을 열전도 방정식을 풀어서 수치적으로 계산하여 Fig.7에 시간의 함수로 나타내었다. 액막의 폭발적인 기화과정은 광학적 반사신호를 검출함으로써 연구할 수 있다. 반사신호는 빛의 산란 효과와 액체의 응축/기화 과정에서 간섭효과에 의해 주어진다. Fig.8(a)는 레이저펄스 조사가 없는 경우 액막의 증착/증발 과정 동안 얻어지는 전형적인 반사 신호를 보여준다. 그림에서 반사율이 처음 약 0.2s 까지 감소하였다가 증가한 후 0.5s 이후 다시 감소한 뒤 회복되는 다중간섭신호 (multiple beam interference signal)의 거동을 나타내는데 이는 액막 두께의 변화에 대응하는 것이다. 따라서, 액막 두께는 탐사광의 파장과 유사한 정도의 크기를 가짐을 알 수 있다. 액막의 두께는 반사

신호가 감소하였다가 회복하는데 걸리는 총 시간 τ(즉, Fig.8(a)에서 약 1s)로부터 추산할 수 있다. 기화과정이 상온 하에서 질량확산에 의해 지배 받는다고 가정하면 질량 유속 j_l은 아래와 같다.

$$j_l = -\rho D \partial m_l / \partial x|_{x=0} = \rho m_l \sqrt{D/t\pi}$$

(ρ: 밀도, D: 액체와 공기 사이의 이중확산 계수, m_l: 액체 농도, t: 시간, x: 공간좌표)

위 식을 적분하면 총증발시간 τ 동안의 총증발량은 $2\rho m_{ls}\sqrt{D_{l-air}\tau/\pi}$ 이 되며 액체-공기 간섭면에서의 질량농도는 $m_l = P_{sat}(T_\infty)/P_\infty$ (P_{sat}, 포화압력; T_∞, 주위온도; P_∞ 주위압력)으로 표시된다. 그러므로 액막이 순수한 물 (D=2.610^{-5}m^2/s)로 이뤄졌다고 가정하면 액막의 두께는 반사율 곡선으로부터 0.36 μm으로 추정된다. 위 해석에서 액막은 등온상태에서 순수한 질량 확산에 의해 제거된다고 가정하였으나 실제로는 액체의 분사작용에 의해 외부유동이 불가피하게 생성된다. 따라서 실제 액막 두께는 0.36 μm 보다 클 것으로 추정된다.

Nd:YAG 레이저 펄스가 조사되는 경우에도 Fig.8(a)와 유사한 반사신호가 대략 1초의 주기로 얻어지며 이것은 레이저 세척시 액막 제거가 레이저 펄스에 의해서가 아니라 주로 액체의 자연증발 (질량확산)에 의한 것임을 말한다. 그러나, 레이저 펄스 조사 직후 약 1ms동안 단기적으로 반사율이 급격히 감소한다. Fig.8(b)는 레이저 플루언스가 액막의 기화 한계점 보다 높은 경우, 레이저 조사 직후 나타나는 반사율의 감소를 보여준다. 액체의 기화 한계점보다 낮은 레이저 플루언스에서는 이러한 반사신호의 급격한 천이가 관찰되지 않는 반면 레이저 플루언스가 한계값 이상이면 폭발적 기화로 인해서 Fig.8(b)에 나타난 것과 같은 신호가 검출되었다. 반사신호를 측정한 결과, 액막의 기화 한계점은 파장 355 nm와 1064 nm의 경우 각각 27 mJ/cm^{2}와 52 mJ/cm^{2}이다. 파장 355 nm의 경우 레이저 에너지의 흡수율이 크므로 기화 한계점이 기본파장의 경우보다 낮게 나타난다. Fig.8(b)에서 단기적인 반사신호의 하락이 약 1ms의 주기에 걸쳐 일어남을 관찰할 수 있다. 한편, 시편이 액체에 완전히 잠긴 경우 생기는 반사율의 변화는 수 s 정도에 걸쳐 일어난다.[6,7] 그러므로 Fig.8(b)에서 반사율의 하락은 레이저 펄스 후에 용발물이 표면으로부터 분사되면서 빛을 산란시키기 때문임을 알 수 있다.

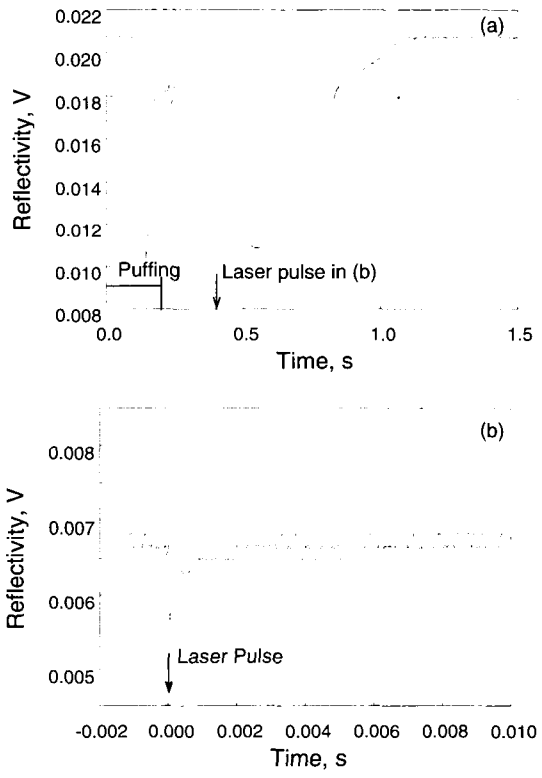

Fig. 8 HeNe laser (λ=633 nm) reflectance signal (a) during the puffing process without laser-pulse irradiation (puffing duration = 200 ms) and (b) with a Nd:YAG laser pulse (F=79 mJ/cm^2, λ =1064 nm, FWHM=6 ns).

습식 레이저 세척 과정에서 액막의 기화가 결정적인 역할을 하므로 액막의 기화 한계점과 세척한계점을 비교하는 것은 매우 흥미있는 일이다. 마이크론 크기의 입자 제거에 필요한 한계 레이저 플루언스는 Nd:YAG 레이저 빔이 수직으로 입사 되는 경우 53 mJ/cm^{2}로 측정되었다. 이 값은 동일 조 건 하에서 액막의 폭발적 기화가 시작되는 레이저 플루언스 즉 52 mJ/cm^{2}에 매우 근접하다. 이러한 사실은 습식 레이저 세척 과정이 전반적으로 열적 기구 (급격한 온도상 승으로 인한 폭발적 기화)에 의해 지배된다는 가설을 더욱 확고히 뒷받침 한다.

4. 결 론

본 연구는 습식 레이저 세척 기법이 NiP 하드디스크 기층으로부터 마이크론 이하 크기의 입자를 제거 할 수 있음 을 보여주었다. 근적외선과 자외선의 레이저 펄스 모두 표면으로부터 어떤 손상도 없이 0.3 μm 알루미나 입자를 제거할 수 있었다. 연구 결과, 습식 레이저 세척 과정에서 입자 제거와 액막의 기화 (기포 핵생성) 는 매우 강한 상호관계를 가지고 있음이 밝혀졌다. 즉 세척과정은 액체의 폭발적 기화와 관련한 열적 기구에 의해 대체적으로 주도된다고 결론 내릴 수 있다.

후 기

연구 결과의 정리에 도움을 준 포항공대 대학원 기계공학과 오부국에게 감사 드립니다.

참고문헌

1. Mittal, K. L. ed., *Particles on Surfaces 1: Detection, Adhesion, and Removal*, Plenum Press, New York, 1988.
2. Bowling, R. A., 1988, "A Theoretical Review of Particle Adhesion," in Ref 1, pp. 129-142.
3. Lee, L.-H., 1991, *Fundamentals of Adhesion*, Plenum Press, New York
4. 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.
5. 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.
6. Kim, D., Park, H. K., and Grigoropoulos, C. P., 1996, "Interferometric Study on the Growth of Pulsed-Laser-Generated Submicron Bubble Layer on a Solid Surface," ASME National Heat Transfer Conference, Houston, HTD-Vol. 326, pp. 69-77.
7. 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.
8. 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, pp. 169-181.