

액체의 레이저 유기 절연파괴를 이용한 신개념 표면 세정 공정

장덕석*, 이종명**, 김동식*

*포항공과대학교 기계공학과, ** (주)IMT 레이저그룹

A novel surface cleaning process using laser-induced breakdown of liquid

Deoksuk Jang*, Jong-Myoung Lee**, Dongsik Kim*

*Department of Mechanical Engineering, POSTECH

**Laser Group, IMT. Co. Ltd.

Abstract

The surface cleaning method based on the laser-induced breakdown (LIB) of gas and subsequent plasma and shock wave generation can remove small particles from solid surfaces. In the laser shock cleaning (LSC) process, a high-power laser pulse induces optical breakdown of the ambient gas above the solid surface covered with contaminant particles. The subsequently created shock wave followed by a high-speed flow stream detaches the particles. In this work, a novel surface cleaning process using laser-induced breakdown of liquid is introduced and demonstrated. LIB of a micro liquid jet increases the shock wave intensity and thus removes smaller particle than the conventional LSC method. Experiments demonstrate that the cleaning force and cleaning efficiency are also increased significantly by this method.

Key Words: Laser cleaning, laser-induced breakdown, shock wave, liquid jet, liquid droplet

1. 서 론

최근 반도체 산업 및 정보 저장 매체 산업 분야의 발달로 나노미터 수준의 입자 세정 공정에 대한 관심이 크게 증가되고 있다.¹⁻⁵ 현재 반도체 산업에서 대부분의 미세 입자의 세정은 습식 공정을 통하여 이루어지고 있다. 습식 세정 공정은 화학 용매를 사용하여 세정 대상 표면에 존재하는 오염물을 제거하는 방식으로 재현성이 높으며 제거될 오염물에 따라 화학용액을 선택적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 독성이 강한 폐용액의 처리와 관련한 환경적인 문제와 화학용액을 오염으로부터 유지하는데 드는 비용, 나노급 크기의 오염물 제거의 어려움 등의 문제점을 가지고 있다. 습식 세정 기술의 단점을 극복하고자, 극저온 공정(cryogenic cleaning)과 같은 건식 세정 방식이 개발되었으나, 세정대상 표면에 물리적인 손상을 줄 수 있는 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 레이저 충격파 세정(LSC; laser shock cleaning) 공정은 집속된 레이저 에너지로 공기 중의 분자들이 광학적절연파괴(optical breakdown) 될 때 발생하

는 유기 충격파(laser-induced shock wave)를 이용하여 표면을 세정하는 기술로서 세정 대상에 물리적 손상을 주지 않으며 강한 세정력으로 필요한 부분에 대한 선택적 세정이 가능하여 최근에 많은 연구가 이루어졌다.⁵⁻¹⁰ LSC 공정에서 입자 제거 효율은 충격파의 압력과 비례하는 것으로 알려져 있다.¹⁰ 따라서, LSC 공정을 통하여 높은 세정 효율을 얻기 위해서는 레이저의 펄스 에너지를 증대시킬 필요가 있다. 그러나 실질적으로 레이저 빔의 에너지의 무한한 증대가 불가능하며, 수 J/pulse에 달하는 고출력 레이저의 상업적 적용이 어렵다. 또한, 높은 펄스 에너지를 이용할 때에는 유기 플라즈마 및 충격파에 의한 강한 기계적/열적 효과에 의한 소재 표면의 변형이나 결함이 발생할 수 있기 때문에 레이저 에너지에 따른 플라즈마와 시편간의 거리, 조사 에너지 등의 변수들이 최적화 되어야 한다. 현재 일반적인 LSC 공정에서는 수백 mJ - 1 J/pulse의 에너지를 가지는 ns 레이저 빔이 일반적으로 이용되고 있으며, 동일한 레이저 에너지를 사용하여 유기 충격파의 압력을 증대시키기 위하여 shock tube¹¹ 및 평판 반사판¹² 등의

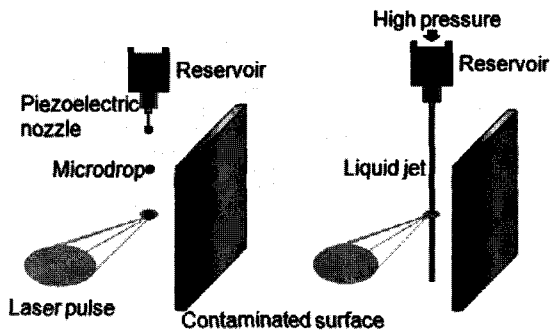


Fig. 1 Concept of laser-induced breakdown of liquid microdrop/liquid jet.

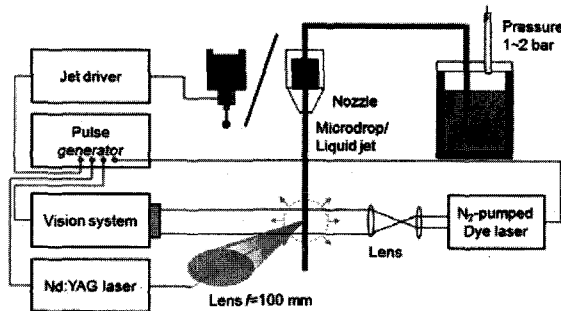


Fig. 2 Experimental setup for the cleaning process and in-situ visualization.

기하학적 구조를 이용하는 방법이 개발되었다. 일반적으로 LSC 공정은 대기나 N₂, Ar과 같은 불활성 기체의 절연파괴를 통하여 충격파를 생성하고 있으나 액상에서 레이저 빔을 집광하여 높은 강도를 갖는 충격파를 생성할 수 있음이 알려져 있다.¹³ 그러나 오염 시편을 액상에서 세정할 때에는 세정 시편을 액체에 완전히 담그는 공정이 필요하며 이는 시편의 손상 및 재오염을 유발할 수 있는 단점을 지닌다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 레이저 빔이 집속되는 곳에 수백 마이크로미터의 지름을 가지는 액체 제트 또는 액적을 위치시키면 레이저 유기 충격파의 강도를 크게 증가시킬 수 있음을 보였다. 레이저를 이용한 액체 제트 또는 액적의 광학적 절연파괴에 대한 연구는 LIB 분광학 분야에서 다양하게 연구되었으나, 그 연구 대상이 유기 플라즈마의 emission 현상에 초점이 맞추어져 있어,¹⁴ 레이저 유기 충격파에 대한 연구는 미미한 실정이다. 본 연구에서는 미소 부피를 가지는 액체의 레이저 유기 절연파괴를 통하여 생성되는 충격파에 대한 실험적 분석과 이를 이용한 입자 세정에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험

Q-switched Nd:YAG 레이저(반치전폭 FWHM : 6 ns, 파장 λ : 1064 nm, 최대 펄스 에너지 : 520 mJ)를 100 mm의 초점 거리를 가지는 렌즈를 이용하여 집광하여 절연파괴를 유도한다. 증류수를 담고 있는 용기에 1-2 기압의 압력을 가해 액체 제트를 형성하였으며, 제트의 지름(D)은 다양한 크기의 노즐을 이용하여 수백 μm 범위에서 조절하였다. 미소 액적 생성을 위하여 50 μm 의 크기를 가지는 압전 (piezo) 노즐을 사용하였다. 노즐 끝에서 형성된 액적의 크기는 약 100 μm 의 크기를 가지며 수 m/s의 속도로 토출된다. 액적의 위치는 가시화 장치를 이용하여 관측하였으며, Nd:YAG 레이저 빔의 집속점에 위치하였을 때 레이저 빔을 조사하여 유기 충격파를 생성하였다. 액적/액체 제트의 절연파괴로 형성되는 충격파의 특성을 관찰하기 위하여 레이저 선평 사진법을 이용하여 충격파의 전파 정도를 수십 ns 간격으로 측정하였으며(Fig. 2), 가시화 실험은 N₂-pumped 색소(dye) 레이저(FWHM : 3 ns, λ : 640 nm)와 Nd:YAG 레이저를 동기화 하여 수행하였다. 압전압력 센서(반응 시간 : 1 μs , 센서의 지름 : 5 mm)를 이용하여 충격파가 가지는 압력을 측정하였다. 측정된 속도 및 압력은 기존의 대기 상에서 유도된 충격파와 비교 분석하였다. 본 공정의 세정 성능을 관찰하기 위하여 수십 - 수백 nm의 크기를 가지는 PS (polystyrene, 300, 90, 30 nm)와 Al₂O₃ (10 nm - 1 μm)입자를 이용하여 세정 실험을 수행하였다. 우선 입자들을 ultrasonic bath 및 magnetic stirrer를 이용하여 증류수에 분산시키고, 실리콘 웨이퍼(1 cm²)를 담근 후 건조시켜 웨이퍼 위에 입자를 고르게 분포시켰다. 입자가 부착된 세정 시편의 레이저 빔이 집속되는 곳과 일정 거리(d : 2-3 mm) 떨어진 곳에 위치시켜 플라즈마에 의한 열적 손상이 입지 않게 하였으며, 레이저 빔의 조사 조건을 달리하며 세정 실험을 수행하였다. 시편의 위치는 액체 제트/액적의 진행방향과 수평한 방향으로 고정하였다. 세정 시편의 세정 전/후 표면은 광학 현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석하였다. 레이저 충격파 세정공정은 충격파가 진행함에 따라 그 강도가 감소할 뿐 아니라 표면에 입사되는 충격파의 각도에 따라 그 세정력이 달라지므로, 표면의 위치에 따라 세정 효율이 달라진다. 본 실험에서 시편의 세정 후 입자 제거 정도를 관

찰할 때에는 세정 효율이 높게 나타나는 곳을 중심으로 수 mm² 영역의 임의의 곳을 선택적으로 측정하였다.

레이저 유기 플라즈마의 거리가 가까워 질 때, 세정 시편은 열적/기계적 손상을 입게 된다. 세정 시편의 세정 후 손상 정도를 관찰하기 위하여 원자현미경(AFM)을 이용하여 실리콘 웨이퍼의 표면을 관찰하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 공기와 액체 제트가 레이저 빔에 의한 절연파괴 될 때 발생하는 충격파와 잔류 액체가 분산되는 형상을 보여주고 있다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 공기의 절연파괴로 인한 충격파는 구형의 형태를 띠지 못하고 레이저 빔이 진행되는 방향으로 길게 늘어진 형상을 가지나, 액체 제트의 절연파괴로 형성된 충격파는 Fig. 3(b)에서 보듯이 레이저 빔이 진행되는 방향으로 그 강도가 매우 약하나 진행 반대 방향으로 반구형의 형태를 가지고 전파되는 것을 볼 수 있다. 레이저 빔(400 mJ)이 액체 제트에 조사될 때, 액체 제트는 모두 증발하지 못하며 잔존한 액체는 플라즈마의 강한 압력에 의해서 주변부로 퍼져나가게 된다. 이때, 발생하는 유동장은 크게 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 레이저 빔이 집중된 지점에 위치한 액체는 플라즈마의 의해 강한 압력을 받아 반대편으로(우→좌) 밀려나게 된다. 이러한 액체의 유동은 약 1000 m/s의 강한 속도를 가지고 전파 된다(Fig 3(b)의 1영역). 레이저 유기 플라즈마가 발생한 곳의 위/아래 쪽의 액체는 초반부에 빠른 속도로 좌측으로 전파되는 것과는 달리 좌우 방향으로 수십 m/s의 속도를 가지고 전파 한다(Fig. 3(b)의 2영역).

액체의 절연파괴에 의한 충격파 생성 및 액체의 유동 모습은 조사되는 레이저 에너지에 따라 크게 두 가지 모습을 보인다. 레이저 에너지가 비교적 적을 때는(≤ 200 mJ), 입사된 레이저 에너지가 액체의 우측(레이저 입사방향) 면에서 액체와 공기를 절연파괴하며, 일부의 에너지는 렌즈와 같은 역할을 하는 구형의 액적에 의해 액적 좌측 편에 집광되어 절연파괴를 야기한다. 조사 에너지가 매우 낮은 경우 (≤ 100 mJ), 많은 부분이 렌즈 효과에 의해 액적 왼쪽 면에 집중되고

강한 절연파괴 현상을 유발한다(Fig. 4(a)). 절연파괴가 발생한 이후, 액적은 좌측면에서 발생한 플라즈마의 강한 압력에 의하여 레이저 빔이 조사된 방향(좌→우)으로 밀려나면서 수 μ s 이후 모두 증발하여 사라지게 된다. 레이저 에너지를 좀더 증가하면(약 100-200 mJ 영역) 액적은 두 곳에서 강한 압력을 받아 폭발하고, 잔류 액체가 우측으로 밀려가는 경향이 현저히 감소하며 기존 액적이 존재한 곳을 중심으로 주변으로 전파되고 약 수백 ns 이후 모두 증발하여 사라지게 된다. 레이저 조사 에너지가 200 mJ 이상으로 좀 더 증가할 때, 액적 앞쪽에서 공기를 절연파괴 할 때 발생하는 플라즈마의 크기가 점차 액적의 크기(80 μ m)보다 커지고 조사 에너지가 400 mJ에 도달할 때에는 수백 μ m의 크기를 가진다. 이때에는 공기를 절연파괴하여 발생하는 플라즈마의 강한 산란광으로 인해 가시화 기법을 이용하여 액적의 유동 현상을 관측할 수 없었다.

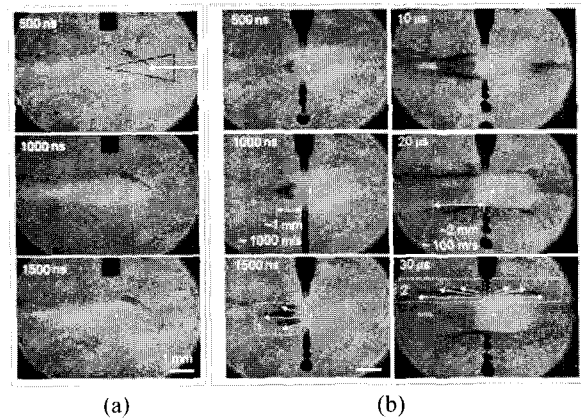


Fig. 3 Shadowgraphs showing LIB of liquid: (a) air and (b) liquid jet (jet diameter D : 260 μ m) at laser energy (pulse energy E : 450 mJ).

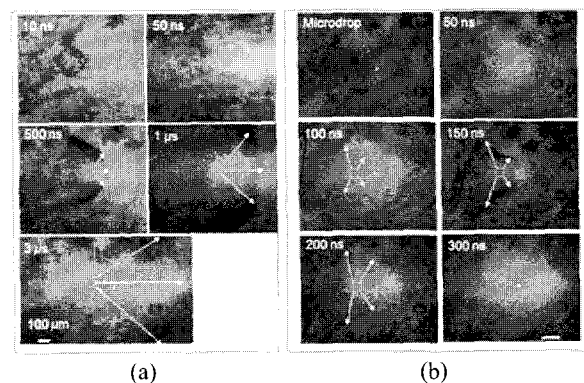


Fig. 4 Shadowgraphs showing LIB of liquid droplet at (a) E : 30 mJ and (b) E : 200 mJ.

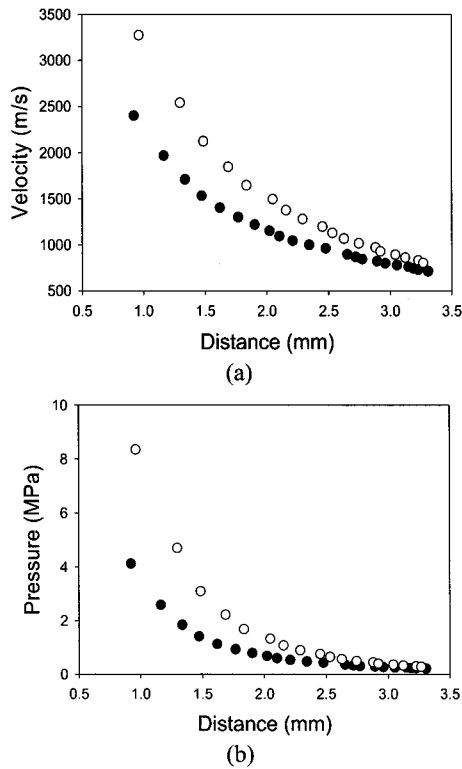


Fig. 5 (a) Shock velocity and (b) pressure produced by LIB of air (●) and water jet (○) (laser energy E : 440 mJ, D : 260 μm).

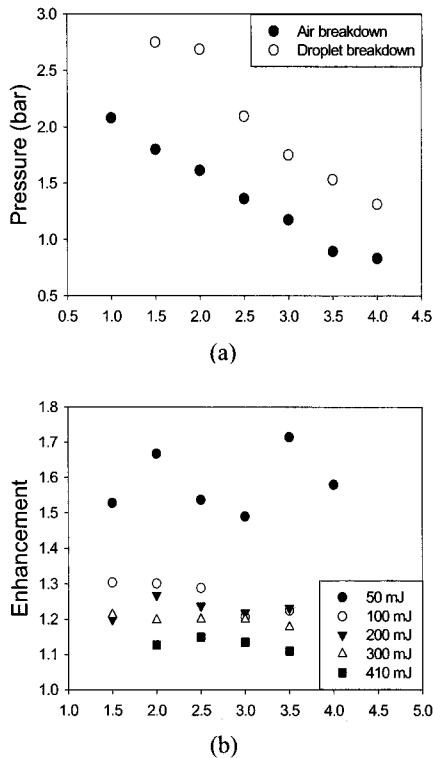


Fig. 6 (a) Pressure as a function of gap distances for LIB of air and microdroplet (droplet size: 80 μm , E : 50 mJ) and (b) pressure enhancement for different energies.

Fig. 5는 액체 제트를 절연파괴 시킬 때 발생하는 충격파의 전파 속도(Fig. 5(a))와 Blast wave¹⁵ 이론에 기초하여 계산된 충격파의 압력(Fig. 5(b))을 보여주고 있다. 액체 제트에 의해서 생성된 충격파의 속도가 공기 중에서 유도된 충격파에 비해서 약 1.5배의 속도를 가짐을 볼 수 있으며, 이 때 충격파의 압력은 $d \cong 1 \text{ mm}$ 에서 약 2배 정도까지 증가한다.

액적(지름 : 80 μm)의 절연파괴에 의한 충격파 또한 액체 제트를 절연파괴 하였을 때와 유사하게 약 1.2-1.5배 정도의 속도 증가를 보였으며, 속도 증가 정도는 조사되는 에너지가 낮을 때 높은 것으로 나타났다.

액체의 절연파괴 시에 생성되는 충격파의 압력을 압력 센서를 이용하여 측정하였다. piezo 압력계의 최대압력 측정은 압력계의 반응 시간 및 측정 영역을 고려할 때, 충격파의 정확한 최대압력을 측정하지는 못하지만, 실험 조건에 따른 압력의 변화 정도를 정성적으로 비교할 수 있다. 압력 측정 결과, 액체 제트의 절연파괴를 통해 생성된 충격파의 압력이 $d = 2 \text{ mm}$ 지점에서 약 1.6배 증가하였다. 액적의 경우, Fig. 5(b)에서 계산된 것과 같이 거리가 증가하면서 그 절대값은 감소하나 대기 상에서 유도된 충격파에 비하여 높은 압력을 가졌다(Fig. 6(a)). 액적의 절연파괴에 의해 발생하는 충격파의 압력은 대기의 절연파괴에 의해 발생하는 것에 비하여 증가하나 압력 증가 정도는 Fig. 6(b)에서 보듯이 거리 변화에 상관없이 일정한 것으로 나타났다. 이는 액적의 절연파괴 시에 발생하는 충격파의 압력은 생성 초반부의 액적 유/무에 의한 플라즈마 압력에 크게 의존하나 이후 전파 과정에서는 액적의 존재가 영향을 미치지 않으므로 증가분은 일정하게 유지되는 것으로 추측된다. 그러나 그 증가 정도는 레이저 에너지가 증가 할수록 낮아지는 것으로 나타났다. 펄스 레이저 빔에 의해 유지되는 플라즈마의 크기는 집중되는 레이저 에너지가 수십 mJ에서 수백 mJ로 증가할 때, 수십 μm 에서 수백 μm 로 함께 증가한다. 본 실험에서 사용된 액적의 크기는 80 μm 이며, 이는 조사 에너지가 낮을 때(수십 mJ) 발생하는 플라즈마의 크기와 유사하다.¹⁶ 조사되는 레이저 에너지가 적을 때(E : 50 mJ)에는 모든 에너지가 액적에 집중되어 액체를 절연파괴 시키는 데에 사용되어 공기 중에서 유도된 충격파에 비하여 높은 압력(1.6배)을 가진다. 그러나 레이저 에너지가 증가

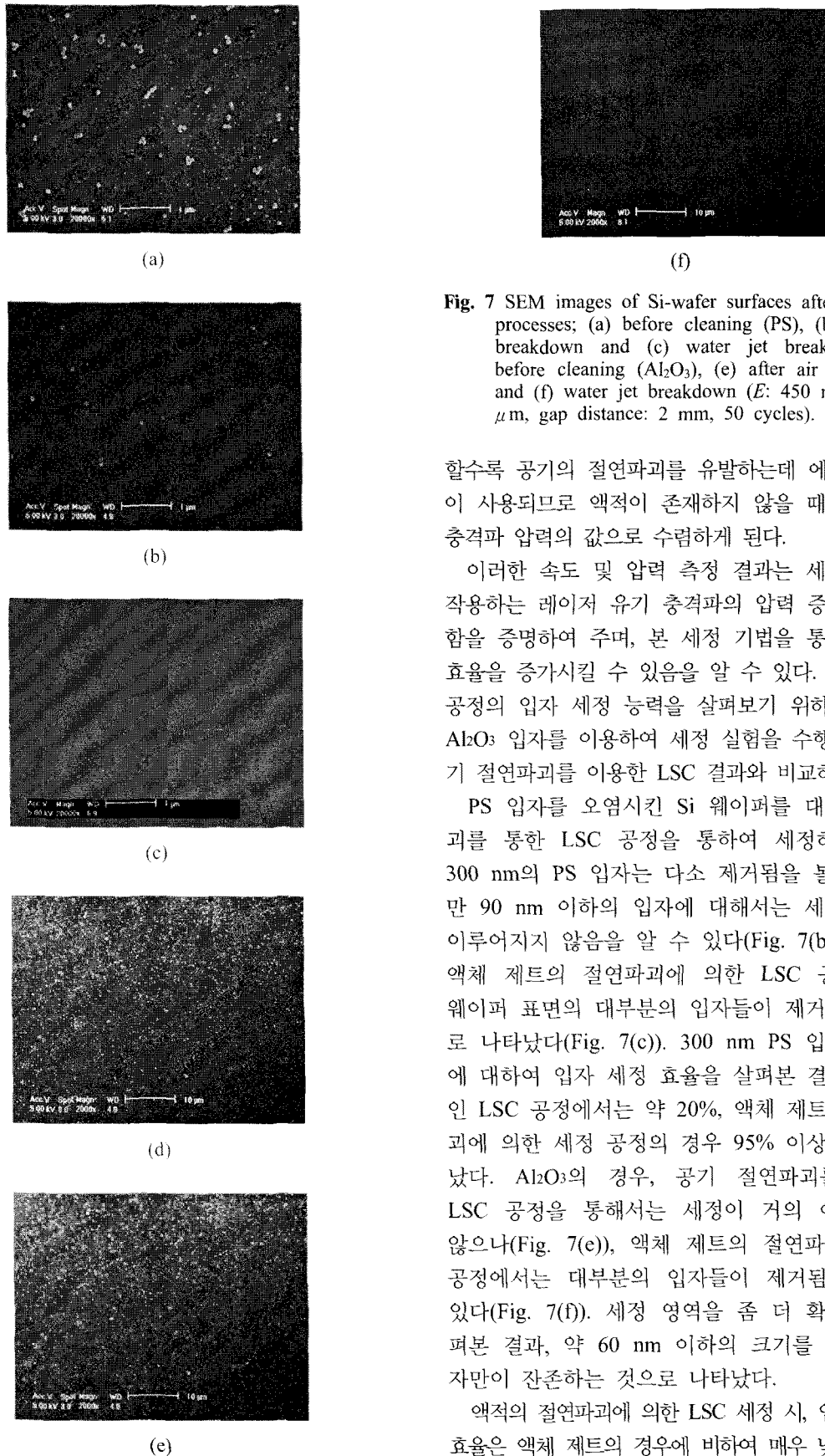


Fig. 7 SEM images of Si-wafer surfaces after the LSC processes; (a) before cleaning (PS), (b) after air breakdown and (c) water jet breakdown, (d) before cleaning (Al_2O_3), (e) after air breakdown and (f) water jet breakdown (E : 450 mJ, D : 260 μm , gap distance: 2 mm, 50 cycles).

할수록 공기의 절연파괴를 유발하는데 에너지가 많이 사용되므로 액적이 존재하지 않을 때 생성되는 충격과 압력의 값으로 수렴하게 된다.

이러한 속도 및 압력 측정 결과는 세정 시편에 작용하는 레이저 유기 충격파의 압력 증가가 발생함을 증명하여 주며, 본 세정 기법을 통하여 세정 효율을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 본 신개념 공정의 입자 세정 능력을 살펴보기 위하여 PS 및 Al_2O_3 입자를 이용하여 세정 실험을 수행한 후, 공기 절연파괴를 이용한 LSC 결과와 비교하였다.

PS 입자를 오염시킨 Si 웨이퍼를 대기 절연파괴를 통한 LSC 공정을 통하여 세정하였을 때, 300 nm의 PS 입자는 다소 제거됨을 볼 수 있지만 90 nm 이하의 입자에 대해서는 세정이 전혀 이루어지지 않음을 알 수 있다(Fig. 7(b)). 그러나 액체 제트의 절연파괴에 의한 LSC 공정에서는 웨이퍼 표면의 대부분의 입자들이 제거되는 것으로 나타났다(Fig. 7(c)). 300 nm PS 입자의 경우에 대하여 입자 세정 효율을 살펴본 결과 일반적인 LSC 공정에서는 약 20%, 액체 제트의 절연파괴에 의한 세정 공정의 경우 95% 이상으로 나타났다. Al_2O_3 의 경우, 공기 절연파괴를 이용한 LSC 공정을 통해서도 세정이 거의 이루어지지 않으나(Fig. 7(e)), 액체 제트의 절연파괴에 의한 공정에서는 대부분의 입자들이 제거됨을 알 수 있다(Fig. 7(f)). 세정 영역을 좀 더 확대하여 살펴본 결과, 약 60 nm 이하의 크기를 가지는 입자만이 잔존하는 것으로 나타났다.

액체의 절연파괴에 의한 LSC 세정 시, 입자의 세정 효율은 액체 제트의 경우에 비하여 매우 낮은 것으로

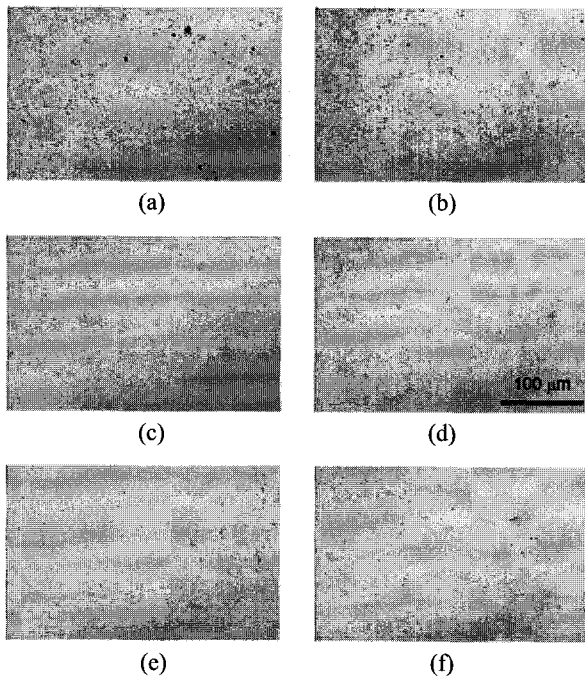


Fig. 8 SEM images of Si-wafer surfaces after the LSC processes for 300 nm PS particles (gap distance: 2 mm, 30 cycles); (a) before cleaning, (b) after water droplet breakdown (E : 410 mJ) and water jet breakdown (c) E : 410 mJ, D : 260 μm , (d) E : 100 mJ, D : 260 μm , (e) E : 410 mJ, D : 80 μm and (f) E : 410 mJ, D : 130 μm .

나타났다(Fig. 8(b)). Fig. 6(b)에 나타나 있듯이 410 mJ의 조사 에너지의 경우, 충격파 증가 정도가 1.1배 정도로 매우 낮기 때문에 세정 효율의 증가가 미미한 것으로 생각되어지며, 좀 더 높은 세정 효율을 얻기 위해서는 액적의 크기, 조사 에너지, 시편 위치(d) 등의 공정 변수를 최적화하여 충격파의 강도를 증가시킬 필요가 있다.

액체 제트(지름 : 260 μm)의 절연파괴에 의한 LSC 공정에서는, $E = 410$ mJ(Fig. 8(c))의 경우와 유사한 수준의 세정효율을 $E = 100$ mJ(Fig. 8(d))의 조건에서도 얻을 수 있다. 액체 제트의 절연파괴 시, 조사 에너지가 $E = 200$ mJ 이하일 때 발생하는 충격파의 강도는 $E = 410$ mJ에서 공기를 절연파괴 시킬 때 발생하는 충격파의 강도보다 낮으나, 세정 효율은 410 mJ의 경우와 유사하다. 따라서, 액체 제트의 절연파괴에 의한 LSC 공정에서 높은 세정 효율을 보이는 것은 충격파의 강도 증가와 더불어 추가적인 효과가 있는 것으로 추정된다. 액체 제트의 절연파괴 이후 수십 μs 시간 구간에서 형성되는 미소 액적의 거동은 오염물을 제거하는 또 다른 세정력을 제공

할 수 있다. 이때 발생하는 미소 액적의 거동은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 액체 제트 파괴 과정에서 생성되는 미소액적이 오염 시편에 충돌한 이후 증발되지 못한 액체는 표면에 얇은 액막을 형성하게 된다. 표면에 형성된 액막은 다음 레이저 조사 시에 충격파와 오염 시편의 충돌 양상을 변화시킬 수 있다. 이를 제거하기 위하여 레이저 빔의 펄스와 펄스 사이의 시간을 증가시켜 액막이 충분히 제거될 수 있게 설정한 이후 세정 실험을 수행한 결과, 펄스 반복율에 의한 입자 제거 효율의 변화는 나타나지 않았다. 또한 표면에 얇은 액막(수십 μm)을 형성한 이후 410 mJ의 에너지로 일반적인 대기 절연파괴에 의한 LSC 세정 실험을 수행하였으나, 300 nm 입자의 세정 효율은 높아지지 않았다. 이는 시편 표면의 액막 형성은 충격파 세정 공정에서 입자 세정에 큰 영향을 미치지 못함을 증명하여 준다. 둘째는 절연파괴 시에 형성된 미소 액적이 오염 시편의 표면에 충돌하면서 가해지는 힘이 세정력으로 작용할 수 있다. 레이저 에너지를 변화시켜 가면서 액체 제트를 절연파괴하여 2차적인 미소 액적의 유동을 유도 할 때, 다량의 미소 액적이 생성되는 100 mJ까지는 입자 세정 효율이 크게 증가하였다. 그러나, 액체 제트의 지름을 260 μm 에서 130 μm 이하로 줄였을 경우는 세정 시편과 충돌하는 미소 액적이 존재하지 않으며 세정 효율 또한 향상되지 않았다(Fig. 8(e),(f)). 따라서 미소 액적의 충돌이 본 세정 공정에서 입자를 제거하는 중요한 인자임을 알 수 있다.

액체 제트(지름 : 260 μm)의 절연파괴에 의한 LSC 공정에서는, $E = 410$ mJ(Fig. 8(c))의 경우와 유사한 수준의 세정효율을 $E = 100$ mJ(Fig. 8(d))의 조건에서도 얻을 수 있다. 액체 제트의 절연파괴 시, 조사 에너지가 $E = 200$ mJ 이하일 때 발생하는 충격파의 강도는 $E = 410$ mJ에서 공기를 절연파괴 시킬 때 발생하는 충격파의 강도보다 낮으나, 세정 효율은 410 mJ의 경우와 유사하다. 따라서, 액체 제트의 절연파괴에 의한 LSC 공정에서 높은 세정 효율을 보이는 것은 충격파의 강도 증가와 더불어 추가적인 효과가 있는 것으로 추정된다. 액체 제트의 절연파괴 이후 수십 μs 시간 구간에서 형성되는 미소 액적의 거동은 오염물을 제거하는 또 다른 세정력을 제공할 수 있다. 이때 발생하는 미소 액적의 거동은

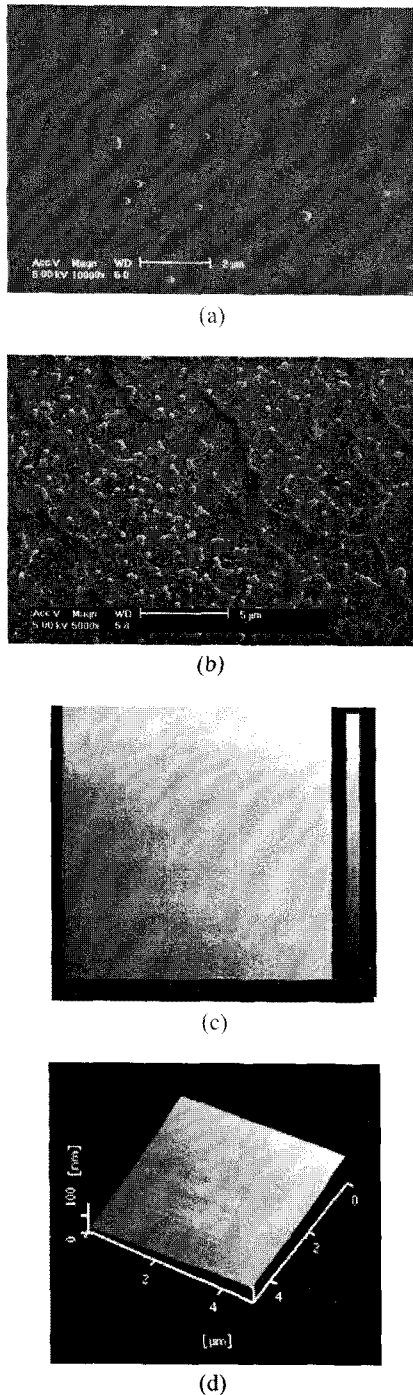


Fig. 9 (a), (b) SEM images of melted PS particle ($d = 1.5$ mm, E : 450 mJ, 50 cycles) and (c), (d) AFM image of a Si-wafer surface after LSC ($d = 2$ mm, E : 450 mJ, 50 cycles).

크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 액체 제트 파괴 과정에서 생성되는 미소액적이 오염 시편에 충돌한 이후 증발되지 못한 액체는 표면에 얇은 액막을 형성하게 된다. 표면에 형성된 액막은 다음 레이저 조사 시에 충격파와 오염 시편의 충돌

양상을 변화 시킬 수 있다. 이를 제거하기 위하여 레이저 빔의 펄스와 펄스 사이의 시간을 증가시켜 액막이 충분히 제거될 수 있게 설정한 이후 세정 실험을 수행한 결과, 펄스 반복율에 의한 입자 제거 효율의 변화는 나타나지 않았다. 또한 표면에 얇은 액막(수십 μm)을 형성한 이후 410 mJ의 에너지로 일반적인 대기 절연파괴에 의한 LSC 세정 실험을 수행하였으나, 300 nm 입자의 세정 효율은 높아지지 않았다. 이는 시편 표면의 액막 형성은 충격파 세정 공정에서 입자 세정에 큰 영향을 미치지 못함을 증명하여 준다. 둘째는 절연파괴 시에 형성된 미소 액적이 오염 시편의 표면에 충돌하면서 가해지는 힘이 세정력으로 작용할 수 있다. 레이저 에너지를 변화시켜 가면서 액체 제트를 절연파괴하여 2차적인 미소 액적의 유동을 유도 할 때, 다량의 미소 액적이 생성되는 100 mJ 까지는 입자 세정 효율이 크게 증가하였다. 그러나, 액체 제트의 지름을 260 μm 에서 130 μm 이하로 줄였을 경우는 세정 시편과 충돌하는 미소 액적이 존재하지 않으며 세정 효율 또한 향상되지 않았다(Fig. 8(e),(f)). 따라서 미소 액적의 충돌이 본 세정 공정에서 입자를 제거하는 중요한 인자임을 알 수 있다.

충격파 세정 시에 유기 플라즈마와 세정 대상물 사이의 간격(d)이 가까워 질 때 시편의 표면은 고온, 고압의 플라즈마에 의해서 열적/기계적 손상을 입을 수 있다. PS 입자를 이용하여 입자 실험을 수행하는 과정에서 $d < 1.5$ mm 일 때, 구형의 PS 입자가 Si 웨이퍼 표면에 녹아 구형의 형상이 찌그러지거나 여러개의 입자가 뭉쳐서 웨이퍼 표면에서 융착되는 현상이 관찰되었다(Fig. 9(a),(b)). 그러나 SEM 및 AFM 촬영 결과 $d \geq 2$ mm 이상일 때는 세정 이후 Si 웨이퍼에 손상이 관찰되지 않았다(Fig. 9(c),(d)).

4. 결론

본 연구에서는 액적 또는 액체 제트의 광학적 절연파괴를 이용한 표면세정 공정에 대한 실험적 분석을 수행하였다. 본 연구에서 제안한 신개념 공정을 통하여 생성된 레이저 유기 충격파는 대기 상에서 생성된 것에 비하여 실험 조건에 따른 차이는 있으나 전반적으로 1.2-1.5배의 속도 증가

를 보이며, 1.1-1.6배의 압력이 증가함이 확인하였다. 또한 세정 실험을 통하여 본 기법이 실질적으로 기존의 LSC 공정에 비하여 더 높은 세정 능력을 지님을 검증하였다. 300 nm 이하의 크기를 가지는 PS 입자를 이용하여 세정 실험을 수행한 결과, 기존 LSC 공정을 통하여 300 nm의 입자가 낮은 세정율로 일부 제거되나, 그 이하의 입자의 경우 세정이 이루어지지 않았다. 액적의 절연파괴를 통한 세정 공정에서는 높은 조사 에너지(> 300 mJ)에서는 충격파 강도 증가가 1.1 배 정도로 미미하여 높은 세정율의 증가는 보이지 않았다. 그러나 액체 제트의 절연파괴를 통한 세정 공정은 충격파 강도 증가(최대 1.6배)와 더불어 다량으로 발생한 미소 액적의 충돌 효과가 더해져 높은 세정 효율을 보였다. 세정 실험 결과, 300 nm와 90 nm의 PS 입자 대부분이 세정되며, Al₂O₃ 입자의 경우, 60 nm 이상 크기의 입자 대부분이 표면 손상 없이 제거됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 중견연구자 지원사업(핵심연구)의 부분적 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) A. C. Tam, W. P. Leung, W. Zapka and W. Ziemlich, "Laser-Cleaning Techniques for Removal of Surface Particulates," *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, pp. 3515-3523, 1992.
- 2) W. Zapka, W. Ziemlich, W. P. Leung and A. C. Tam, "Laser Cleaning," Removes Particles from Surfaces," *Microelectronic Engineering*, Vol. 20, pp. 171-183, 1993.
- 3) Y. W. Zheng, B. S. Luk'yanchuk, Y. F. Lu, W. D. Song and Z. H. Mai, "Dry Laser Cleaning of Particles from Solid Substrate: Experiments and Theory," *Journal of Applied Physics*, Vol. 90, pp. 2135-2142, 2001.
- 4) Y. F. Lu, Y. Zhang, Y. H. Wan and W. D. Song, "Laser Cleaning of Silicon Surface with Deposition of Different Liquid Films," *Applied Surface Science*, Vol. 138-139, pp. 140-144, 1999.
- 5) J. M. Lee and K. G. Watkins, "Removal of Small Particles on Silicon Wafer by Laser-Induced Airborne Plasma Shock Waves," *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, pp. 6496-6500, 2001.
- 6) J. M. Lee, S. H. Cho, J. G. Park, S. H. Lee, Y. P. Han and S. Y. Kim, Proc.3rd Int. Symposium on Laser Precision Microfab., pp. 287, 2002.
- 7) C. Cetinkaya, R. Vanderwood and M. Rowell, "Nanoparticle Removal from Substrates with Pulsed-Laser Induced Plasma and Shock Waves," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol.16, pp.1201-1214, 2002.
- 8) H. Lim and D. Kim, "Optical Diagnostics for Particle-Cleaning Process Utilizing Laser-Induced Shockwave," *Applied Physics A*, Vol. 79, pp. 965-968, 2004.
- 9) D. Jang, J. Lee, J. -M. Lee and D. Kim, "Visualization of Particle Trajectories in the Laser Shock Cleaning Process," *Applied Physics A*, Vol. 93, pp. 147-151, 2008.
- 10) H. Lim, D. Jang, D. Kim, J. W. Lee and J. -M. Lee, "Correlation between Particle Removal and Shock-Wave Dynamics in the Laser Shock Cleaning Process," *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, pp. 054903, 2005.
- 11) T. Dunbar, B. Maynard, D. A. Thomas, M. D. M. Peri, I. Varghese and C. Cetinkaya, "Pressure Amplification of Laser Induced Plasma Shockwaves with Shock Tubes for Nanoparticle Removal," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 21, pp. 67-80, 2007.
- 12) D. Jang, J. Oh, J. -M Lee and D. Kim, "Enhanced Efficiency of Laser Shock Cleaning Process by Geometrical Confinement of Laser-Induced Plasma," *Journal of Applied Physics*, Vol. 106, pp. 014913, 2008.
- 13) T. J. Dunbar and C. Cetinkay, "Underwater Pressure Amplification of Laser-Induced Plasma Shock Waves for Particle Removal Applications," *Applied Physics Letters*, Vol. 91, pp. 051912, 2007.
- 14) J. -S. Huang, C. -B. Ke, L. -S. Huang, K. -C.

- Lin and E. Tognoni, "The Correlation between Ion Production and Emission Intensity in the Laser-Induced Breakdown Spectroscopy of Liquid Droplets," *Spectrochimica Acta Part B*, Vol. 57, pp. 35-48, 2002.
- 15) L. I. Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, CRC Press, Boca Raton, 1991.
- 16) A. Vogel, K. Nahen, D. Theisen and J. Noack, "Plasma Formation in Water by Picosecond and Nanosecond Nd:YAG Laser Pulses-Part I: Optical Breakdown at Threshold and Super-threshold Irradiance," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 2, pp. 847-860, 1996.