

## 고 출력 레이저에 의한 충격파 현상 연구 및 응용

이현희\* · 곽민철\* · 최지혜\* · 여재익†

(2008년 4월 8일 접수, 2008년 10월 1일 수정, 2008년 10월 15일 심사완료)

### High Power Laser Driven Shock Compression of Metals and Its Innovative Applications

Hyun-hee Lee, Min-cheol Gwak, Ji-hee Choi and Jai-ick Yoh

**Key Words:** Pulse Laser(펄스 레이저), Laser Ablation(레이저 삭마), Inverse Bremsstrahlung(역 제동 복사), Shock Wave(충격파), Plasma(플라즈마), Plasma Shield Effect(플라즈마 보호막 효과)

#### Abstract

Ablation occurs at irradiance beyond  $10^9$  W/cm<sup>2</sup> with nanosecond and short laser pulses focused onto any materials. Phenomenologically, the surface temperature is instantaneously heated past its vaporization temperature. Before the surface layer is able to vaporize, underlying material will reach its vaporization temperature. Temperature and pressure of the underlying material are raised beyond their critical values, causing the surface to explode. The pressure over the irradiated surface from the recoil of vaporized material can be as high as  $10^5$  MPa. The interaction of high power nanosecond laser with a thin metal in air has been investigated. The nanosecond pulse laser beam in atmosphere generates intensive explosions of the materials. The explosive ejection of materials make the surrounding gas compressed, which form a shock wave that travels at several thousand meters per second. To understand the laser ablation mechanism including the heating and ionization of the metal after lasing, the temporal evolution of shock waves is captured on an ICCD camera through laser flash shadowgraphy. The expansion of shock wave in atmosphere was found to agree with the Sedov's self-similar spherical blast wave solution.

---

#### 기호설명

- R : 충격파 반지름
- E : 레이저 에너지
- $t_{el}$  : 충격파 발생 후 경과 시간

#### 1. 서론

1970년 이래 레이저 삭마 현상은 레이저가 반복적으로 고른 에너지를 출력할 수 있다는 장점을 응용하여 많은 분야에 이용되고 있는 아주 뛰어난 기술이다. 최근에는 레이저 삭마 현상을 나노 및 마이크로 입자를 만드는 공정에 이용하고 있으며, 반도체 공학에서는 이 기술을 이용하여 얇은 필름을 제작하기도 한다.<sup>(1-3)</sup> 미국 및 일본 등을 중심으로 레이저 삭마 현상을 이용하여 초경량 비행체

---

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
항공우주신기술연구소

E-mail : jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-9334 FAX : (02)887-2662

\* 서울대학교 기계항공공학부

를 추진하는 새로운 개념의 연구가 진행 중이며 레이저 삭마 현상을 활용한 LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy)장비를 통해 미확인 물질의 성분 분석도 다양하게 연구되고 있다. 따라서 본 연구는 Nd:Yag 레이저에 의한 시료(알루미늄과 구리)의 air breakdown 현상과 이로 인해 발생하는 충격파에 대한 분석하여 다양한 분야에 이용될 수 있음을 뒷받침 한다.

## 2. 이론

### 2.1 역 제동 복사(Inverse Bremsstrahlung)

Fig. 1을 통해 알 수 있듯이 레이저가 한 점에 조사 되면 레이저 빔의 photon들에 의해 레이저 에너지가 기체 분자에 전달된다. 이러한 높은 열에 의해 기체 분자가 전자와 중성자 및 양이온 상태로 공존하는 플라즈마(Plasma) 상태로 붕괴(Breakdown)된다. 플라즈마 상태의 영역에서 광양자, 즉 레이저 에너지가 조사되면 분포되어 있던 전자와 양이온, 그리고 중성자의 활발한 운동을 더욱 가속시키게 되고 서로 충돌을 일으키게 된다. 이 때 충돌에 의해 전자와 양이온 및 중성자는 가지고 있던 에너지를 손실 하게 되고 감소된 에너지만큼을 외부로 방출시키게 된다. 이것을 제동복사(Bremsstrahlung)라고 하며 Fig. 1에 나타나 있다. 반대로 입자들의 가속에 의한 에너지의 흡수를 역 제동복사(Inverse Bremsstrahlung)라 한다. 엄밀히 말하자면 역 제동복사와 제동복사의 차이만큼의 에너지가 레이저 빔에 의해 변환되어 이온화된 원자로 흡수되는 에너지인 셈이다.<sup>(4)</sup>

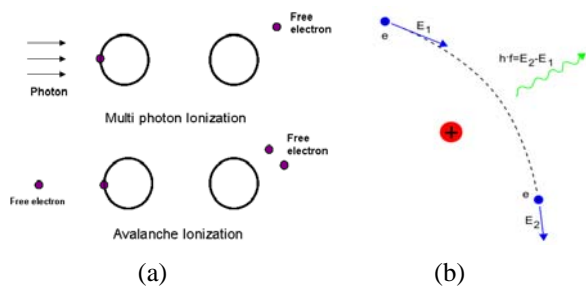


Fig. 1 Ionizing process by laser photon(a) and Inverse bremsstrahlung(b)

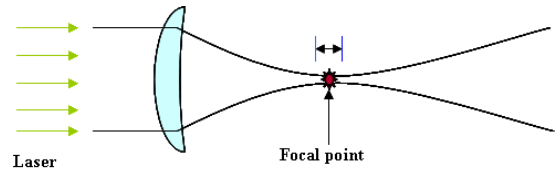


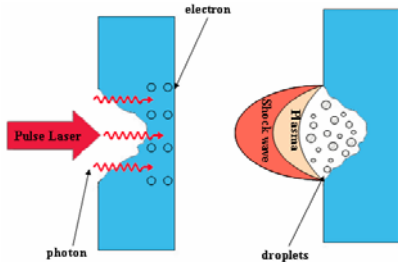
Fig. 2 Air breakdown by laser ablation

### 2.2 레이저 삭마 현상(Laser Ablation)

Fig. 2 처럼 삭마 현상은 기본적으로 펄스 시간이 나노초급 레이저의 세기가  $10^9 \text{W/cm}^2$  이상의 에너지를 시료의 한 점에 조사시키면 발생한다.<sup>(5)</sup> 즉, 펄스 레이저가 물체의 표면에 도달하게 되면 물체 표면 온도는 순식간에 물체 표면의 기화(Vaporization)온도를 넘어서게 된다. 또한 시료 표면은 레이저펄스가 가해지는 시간 동안 증발 온도를 넘어서게 되는데, 표면의 증발에 의해 열이 방출되는 속도가 레이저 펄스 시간보다는 오래 걸리므로 시료 표면 물질이 증발하기 전에 내부에서도 증발 온도에 도달하게 된다. 이로 인해 내부 물질의 온도와 압력은 임계점 이상으로 상승하여 시료는 순간 기화된 후 전자와 양이온상태로 공존하는 플라즈마상태로 붕괴된다. 이후 플라즈마의 전자와 양이온 및 중성원자는 에너지에 의해 더욱 가속되며 에너지를 흡수한다(역 제동복사). 결국 시료표면에 발생한 플라즈마 기체 근처의 압력은  $10^5 \text{MPa}$ , 온도는  $10^4 \text{K}$  이상으로 올라간다. 이 모든 과정은 가열 과정이 아니라 순간 가해지는 고 에너지로 인해 발생하였으므로 삭마된 부위와 주변에는 용융 현상이 생기지 않는다.

### 2.3 충격파 발생 원리

Fig. 3에 도출되어 있는 것처럼 펄스 레이저가 순간적으로 극소 부위에 고 에너지( $\sim 1 \text{GW}$ )를 조사하면 충격파가 발생하게 된다. 즉 레이저 빔이 시료의 표면에 도달하게 되면 붕괴에 의해 시료 표면이 기화되어 vapor가 발생하게 된다. 이러한 vapor는 레이저 빔의 에너지를 받아 이온화하게 되어 양자, 중성자 및 전자 상태로 존재하게 되고 이러한 물질이 서로 충돌을 일으키며 고온의 상태로 된다. 이러한 과정을 통해 고온에 도달하게 되어 플라즈마를 형성하게 된다. 붕괴와 이온화 과정을 통해 발생한 플라즈마의 발생된 시간은 레이저 빔의 조사 시간에 비해 상당히 길다. 이로 인해 플라즈마는 레이저 빔의 에너지를 흡수하여

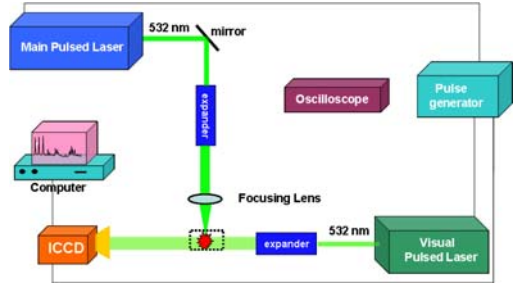


**Fig. 3** Schematic of shock wave generation of laser ablation

레이저 빔이 시료의 표면에 도달하는 것을 차단한다. 이러한 현상을 플라즈마 보호막 효과(plasma shield effect)라고 한다.<sup>(6)</sup> 레이저 빔의 에너지를 흡수한 플라즈마는 고온 고압 상태가 된다. 이러한 과정은 단열 과정을 통해 플라즈마가 형성된다고 할 수 있다. 이후 고온의 플라즈마는 주변의 공기와 상호 작용을 일으켜 고온 고압의 기체가 주변으로 팽창해 나가면서 충격파를 발생 시킨다. 이후 플라즈마의 에너지는 열전도 및 복사를 통해 주위의 기체와 충격파로 전달되며 플라즈마와 충격파가 분리되어 플라즈마는 소멸된다. 분리된 충격파는 극초음속(~4000m/s)의 속도로 전파 된다.<sup>(4,7)</sup>

**3. 실험 장비(Laser Ablation System)**

Fig. 4는 레이저 삭마 현상을 위한 장비를 나타낸 그림이다. 고 에너지 펄스 레이저빔(Nd:YAG Powerlite Precision II Plus, 5~10pulse duration, 3000mJ at 1064nm)이 레이저 라인 미러를 통해 90도 반사된다. 반사된 레이저 빔은 레이저 빔 확대경을 통해 3배로 확대된다. 레이저 확대경을 통과한 균일한 레이저 빔은 BK7 plano convex lens에 의해 금속 표면의 한 점에 매우 짧은 시간(~ns)동안 조사된다. 이후 삭마 현상에 의해 플라즈마가 생성된다. 발생한 플라즈마는 고온의 레이저를 흡수하면서 주위의 공기와 열역학적 반응을 하게 된다. 이후 레이저 빔이 조사된 반대 방향으로 충격파가 발생한다. 이러한 현상을 촬영하기 위해 시간적 분해 능력이 좋은 펄스 레이저(Minilite Dual Head Nd:YAG , 5 pulse duration, 25mJ at 532nm)를 가시화를 위한 에너지원으로 사용하였다. 조사된 검사 레이저 빔의 높이가 레이저 삭마 현상이



**Fig. 4** Schematic of experimental apparatus

발생하는 검사체적보다 낮다. 따라서 검사 레이저 빔은 레이저 라인 미러들을 통해 레이저 삭마 현상이 발생하는 검사체적과 동일 선상에 놓이게 된다. 높이가 조절된 검사 레이저 빔은 확대경을 통해 5배 확대 되었다. 이렇게 확대된 레이저 빔은 충격파 현상이 발생하는 검사 체적을 통과한 뒤 ICCD카메라에 도달하게 된다. ICCD카메라 앞에 줌 렌즈를 설치하여 육안으로 실험 결과를 확인할 수 있도록 이미지를 확대시켰다. 또한 ND필터를 줌 렌즈 앞에 설치하여 레이저 삭마 현상 발생 시 발생하는 섬광 및 고 출력 레이저 빔에 의한 손상을 막았다.<sup>(8,9)</sup> 이러한 나노초 시간 컨트롤을 요구하는 장비들은 8채널 BNC 565 펄스 제너레이터를 통해 제어하였다.

**4. 실험 조건 및 방법**

**4.1 시료 및 대기 조건**

본 실험에서는 대기의 종류 및 압력의 변화에 따른 플라즈마 및 충격파를 연구하기보다는 같은 대기조건(일반 대기조건)에서 레이저 에너지 및 시료를 달리하여 실험을 실시하였다. 본 실험에서 사용된 10mm두께의 알루미늄과 구리의 열역학적 특성은 Table 1과 같다.<sup>(15)</sup>

**Table 1** Thermal properties of samples(Periodic table of the elements)

	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	열전도 (W/cm.K)	이온화 에너지(eV)	녹는점 (°C)
알루미늄	2700	2.37	5.9858	660.37
구리	8900	4.01	7.7264	1083

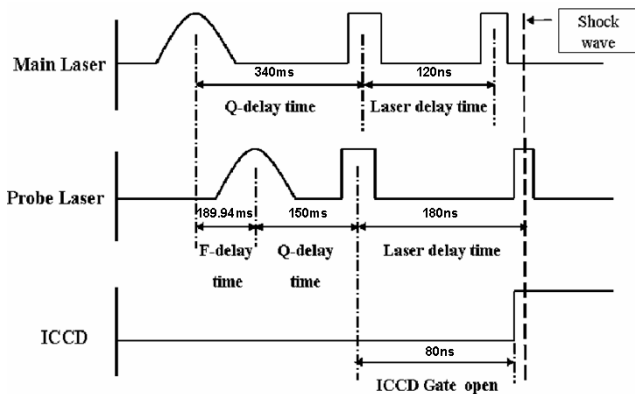


Fig. 5 Synchronization of visualization

#### 4.2 동기화(Synchronization)

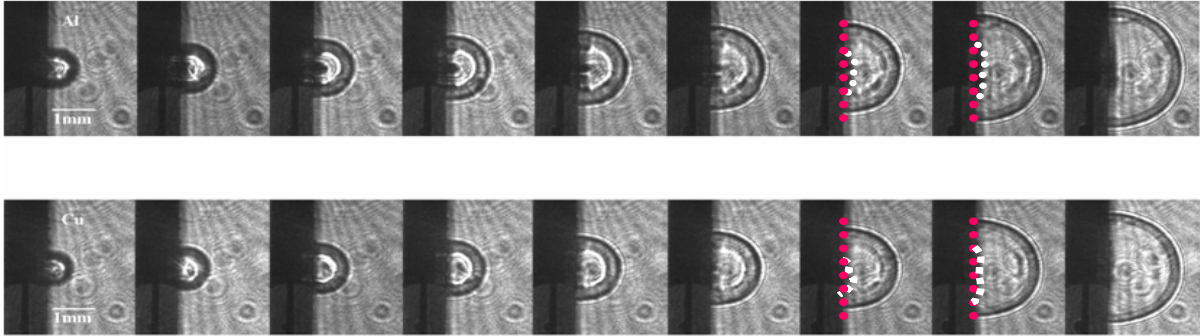
본 연구에서는 충격파 현상을 연구하기 위해서 고출력 Nd:YAG 레이저와 가시화 Minilite Dual Head Nd:YAG 레이저 및 ICCD Dicam Pro의 장비를 이용하고 있다. 본 연구에서 가장 중요한 부분은 두 대의 레이저와 카메라 장치의 동기화 과정이다. Fig. 5는 시간 동기화 과정을 보여준다. 고에너지원인 펄스 레이저와 가시화 레이저 사이에 아주 짧은 시간(~ns)적 간격이 존재하므로 시간 분해 능력이 우수한 펄스 제너레이터(BNC 565-8CG: RMS jitter 250ps, 500ps delay time)를 통해 시간적 동기화 및 신호를 제어하였다. 그리고 두 대의 Nd:YAG 레이저 조사 시 발생하는 내부 지연 시간은 Tektronix 회사가 제작한 TDS-2014 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 본 실험을 실시하기 전 동기화 과정에서 펄스 제너레이터의 채널1에 충격파 현상 실험의 시간적 기준을 정하였다. 즉, Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 충격파 발생의 에너지원인 고출력 레이저의 Flash lamp를 채널1에 연결하여 기준점을 잡았다. 채널2에 Flash lamp와 Q-switch 사이에 존재하는 Q-switch 내부 지연 시간(Delay time)인 340 마이크로초가 채널1을 기준으로 입력되었다. 이후 레이저는 120 나노초의 내부 지연 시간 후에 레이저 빔을 조사시킨다. 가시화 레이저를 동기화하기 위해 채널1로부터 340 마이크로초와 120 나노초를 합한 340.12 마이크로초 지점을 기준으로 잡고 역으로 동기화 과정을 계산하였다. 가시화 레이저는 내부 지연 시간인 180 나노초 후에 조사된다. 그리고 가시화 레이저의 Flash lamp와 Q-switch 사이에는 150 마이크로초의 Q-switch 내부 지연시간이

존재한다. 따라서 340.12 마이크로초에서 150.18 마이크로초를 뺀 시간인 189.94 마이크로초를 채널1을 기준으로 채널3에 입력한다. 그리고 채널4에 가시화 레이저의 Q-switch를 채널3을 기준으로 Q-switch delay time인 150 마이크로초를 더해 입력한다. 그리고 ICCD 카메라의 노출 시간은 채널4를 기준으로 하여 80 나노초를 더해 입력하였다. 채널 3을 제2의 기준으로 선정한 이유는 실험의 효율을 향상시키기 위해서이다. 본 연구에서는 한 번의 레이저 조사 후 발생하는 충격파 현상에 관한 이미지를 한 장 얻는다. 즉, 반복적인 실험을 통해 연속적인 충격파 현상 이미지를 얻는다. 따라서 본 연구에서는 10 나노초 단위로 충격파 이미지를 얻기 위해서 가시화 레이저의 조사 시간을 변경하면서 실험을 수행하였다. 단지 가시화 레이저의 Flash lamp가 연결되어 있는 펄스 제너레이터의 채널3을 제어함으로써 효율적으로 시간의 경과에 따라 플라즈마 및 충격파 이미지를 얻을 수 있었다. 비록 시간 경과에 따른 충격파 현상의 이미지를 얻기 위해 매우 많은 실험을 실시하여야 하지만, 다만 채널3만 조절함으로써 쉽고 정확하게 충격파 이미지를 얻을 수 있었다.

### 5. 실험 결과 분석

#### 5.1 충격파 현상 분석

고출력 레이저를 이용한 충격파 현상에 관한 연구를 수행하기 위해 먼저 동일한 레이저 에너지를 이용하여 시료를 바꿔 가면서 실험을 실시하였다. Fig. 6은 대기 조건에서 10mm 두께의 알루미늄과 구리에 레이저 삭마 현상을 통해 발생한 충격파를 Laser Flash Photographic 방법을 통해 시간의 경과에 따라 나타낸 연속 이미지이다. Fig. 6에서 충격파 주위의 weak fringes는 레이저 빔의 diffraction으로 인해 발생하였다.<sup>(8)</sup> Fig. 6을 보면 흰 부분이 시료표면 입자들의 이온이 레이저 에너지를 흡수하여 형성한 플라즈마이다. 이 실험 결과를 자세히 보면 플라즈마는 일정시간까지 planar형태로 진행하다가 spherical하게 발달되어 진행하며 이후 플라즈마(흰색 부분)는 에너지를 충격파에 전달한 뒤 소멸되며, 충격파는 플라즈마와 분리하여 진행된다는 사실을 알 수 있다.<sup>(10)</sup> 그리고 실험을 통해 알루미늄과 구리에 발생한 충격파가 An instantaneous



**Fig. 6** Sequent shock wave images of Aluminum(upper) and Copper(bottom) by 20mJ/pulse laser incident intensities shown in the increasing order of time elapse (30, 50, 70, 90, 120, 160, 200, 300, 400ns). Leading shock followed by the metal vapor / shocked air contact surface observed

mass-less point explosion Blast Wave 이론과 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있다.<sup>(11,12)</sup> 시간의 경과에 따른 충격파의 전파 거리를 측정함으로써 충격파의 시간적 변화를 Sedov's self-similar solution (식.2)과 비교 하였다.<sup>(13,14)</sup>

$$R(t) = \epsilon_s \left( \frac{2E_0 t_{el}^2}{\rho_a} \right)^{0.2} \quad (1)$$

$R$  = radius of shock wave front

$t_{el}$  = elapsed time.

$E$  = energy released at a point source at zero elapsed time

$\rho_a$  = ambient air density

Fig. 7은 20mJ/pulse의 삭마용 레이저 에너지에 대한 충격파 전파 거리와 Sedov's self-similar solution의 비교를 보여준다. 레이저 빔이 조사된 후부터 150 나노초 까지는 얇은 시료표면에서 발생한 플라즈마와 충격파는 planar형태로 진행한다. 이후 충격파가 플라즈마에서 분리되며 spherical하게 진행한다. 진행되는 충격파의 반지름은 Sedov's theory,  $t^{0.4}$ 에 거의 유사하게 비례 한다는 것을 알 수 있다. 또한 식 (1) 에서 유도하면 다음의 식을 유도할 수 있다. 실험을 통해 얻은 알루미늄과 구리의 충격파 거리를 위의 식 (2)에 대입하면  $\alpha$  (조사된 레이저 에너지  $E$ 와 충격파를 발생하기 위해 사용된 에너지  $E_0$  비율)를 구할 수 있다. 즉, 충격파를 발생시키기 위해 사용된 레이저 에너지를 측정할 수 있다. 알루미늄의  $\alpha$  (49%)값이

구리의  $\alpha$  (46%)보다 높다(Table 2). 이는 알루미늄의 열역학적 성질에 의한 것이다.

$$R(t) = \epsilon_s \left( \frac{2E_0 t_{el}^2}{\rho_a} \right)^{1/(2+\nu)} \quad (2)$$

$$E_0 = \alpha E$$

$$E_0 = \frac{R(t)^{(2+\nu)} \rho_a}{t^2}$$

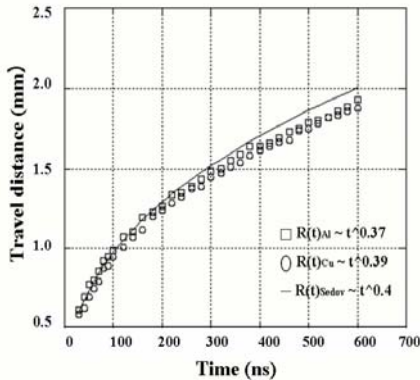
즉, 알루미늄의 열전도율은 구리의 절반 정도이다. 이는 같은 에너지를 조사하였을 경우 주위로 전달되는 에너지양이 적다는 것을 의미한다. 다시 말해 충격파를 발생시키기 위해 이용되는 에너지가 크다는 것을 의미한다. 그리고 알루미늄의 기화 에너지가 낮기 때문에 더 낮은 온도에서 기화가 발생한다. 그리고 표 3을 보면 알 수 있듯이 알루미늄의 1,2,3차 이온화 에너지가 더 낮다.<sup>(15)</sup> 알루미늄과 구리의 이온화는 식 (3)과 (4)에서 쉽게 알 수 있듯이 주위의 에너지 흡수를 통해 발생한다. 따라서 동일한 레이저 에너지를 조사할 경우 이온화 에너지가 낮은 알루미늄이 보다 쉽게 이온화 반응이 일어나 플라즈마를 형성 한다. 이렇게 형성된 알루미늄의 플라즈마 내부의 알루미늄 이온들은 구리의 이온보다 더 활발하게 역 제동복사(Inverse Bremsstrahlung)를 통해 레이저 에너지를 더 많이 흡수한다. 이러한 높은 알루미늄의 플라즈마 에너지는 주위의 공기에 전달되어 충격파를 형성한다. 이로 인해 알루미늄이 구리보다 더 강한 충격파를 형성하게 되는 것이다.

**Table 2** Thermal properties of samples(Periodic table of the elements)

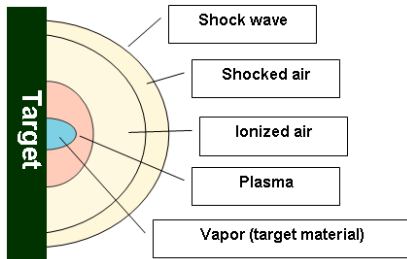
	$\alpha$ (%)	밀도 ( $kg/m^3$ )	열전도 ( $W/cmK$ )	이온화 에너지 (eV)
알루미늄	49	2700	2.37	5.9858
구리	46	8900	4.01	7.7264

**Table 3** Thermal properties of samples(Periodic table of the elements)

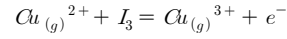
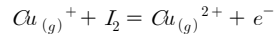
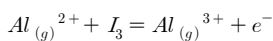
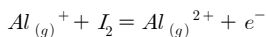
	알루미늄	구리
1차 이온화 에너지(eV)	5.9858	7.7264
2차 이온화 에너지(eV)	18.828	20.292
3차 이온화 에너지(eV)	28.447	36.83



**Fig. 7** Travel distance of shock wave for different materials



**Fig. 8** Structure of Shock wave

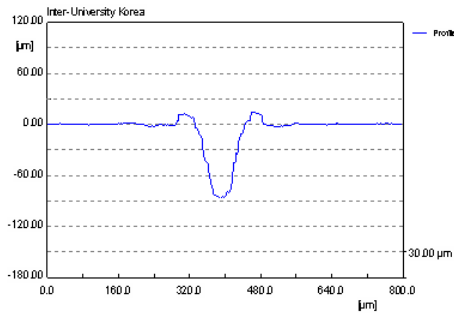


실험 결과를 보여주는 Fig. 7을 통해 알루미늄의 충격파가 더 큰 운동 에너지를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 충격파 내부를 조사하면 크게 4개의 층으로 존재한다. Fig. 8을 통해 알 수 있듯이 레이저 조사에 의해 시료의 입자가 기화를 통해 형성되는 기화 층과, 이온화 입자에 의해 형성되는 플라즈마, 플라즈마가 레이저 에너지를 흡수한 뒤 주위의 공기에 에너지를 전달하여 생성되는 이온화된 공기와 이로 인해 공기가 압축되는 영역과, 이러한 공기가 발생하는 충격파로 나누어진다.

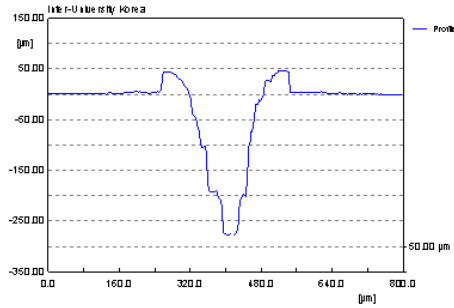
### 5.2 레이저 삭마된 깊이

본 실험에서는 고출력 레이저를 시료(알루미늄과 구리)에 조사시켜 발생하는 시료표면에서의 현상을 3차원 표면 형상 측정기를 이용하여 분석하였다. 고출력 레이저를 조사시키면 시료표면에서는 레이저 삭마효과에 의해 시료표면의 일부분이 뜯겨져 주위로 흩어진다. 이는 마치 화산 폭발하는 분화구와 비슷하다. 이렇게 삭마된 부위는 연속적으로 동일한 레이저 에너지를 조사시키면 삭마효과에 의해 점점 더 깊게 파이게 되며 결국 구멍이 생긴다. Fig. 9는 동일한 레이저 에너지를 조사시킨 횟수에 따른 시료 표면의 파인 깊이와 3차원 표면 형상 측정기를 이용하여 측정한 것이다. Fig. 10을 보면 동일한 레이저 에너지에 대해 알루미늄이 구리보다 더 깊게 파였다는 것을 알 수 있다. 이는 5.1에서 언급했듯이 알루미늄의 열전도율이 구리보다 낮기 때문이다. 즉, 구리는 열전도율이 알루미늄보다 뛰어나 조사부위 주위로 열을 보다 빨리 전달한다. 레이저 삭마현상은 극소부위에 에너지 밀도가 높을수록 잘 발생한다. 하지만 구리의 경우 주위로 열이 전달되어 극소부위에서의 에너지 밀도가 알루미늄보다 낮다. 이로 인해 구리의 레이저 삭마효과는 알루미늄보다 낮다. 그리고 Fig. 11을 통해 동일한 시료에 대한 삭마된 깊이를 알 수 있다. 동일한 시료에 다른 레이저

에너지를 조사했을 경우 400mJ이 1000mJ보다 최대 깊이는 더 깊게 나왔다. 하지만 Figs. 12, 13을 보면 레이저 삭마에 의해 구멍 주위에 쌓인 입자들은 1000mJ일 때가 400mJ보다 더 높게 나왔다. 이는 1000mJ일 때가 400mJ보다 삭마 현상이 더 활발하게 이루어지지만 플라즈마 보호막 효과 때문에 형성되는 우산과 같은 강한 경계층으로 인해 삭마된 입자들이 경계층 밖으로 활발하게 분출하지 못한다. 이로 인해 삭마된 입자들이 서로 충돌을 하여 구멍 주위나 구멍 안에 쌓이기 때문이다. 하지만 1000mJ일 때가 400mJ일 때보다 삭마된 넓이는 더 넓다. 이는 고 레이저 에너지 일수록 안정적으로 레이저 삭마현상을 발생시킨다는 사실을 보여준다.

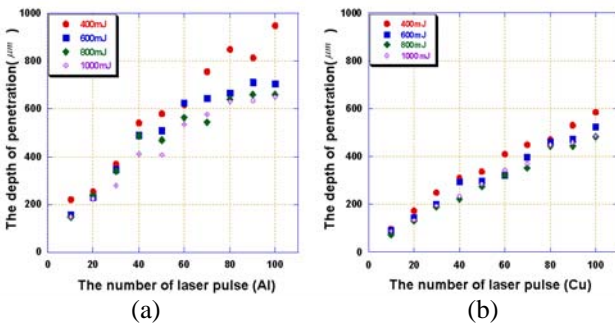


(a)

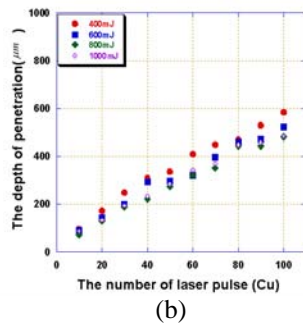


(b)

Fig. 9 Ablated profile of aluminum(a) and copper(b) by 400mJ/pulse laser



(a)

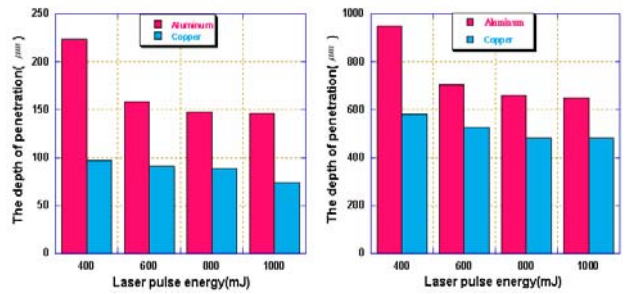


(b)

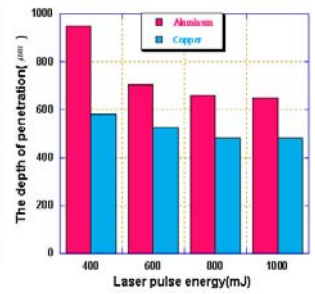
Fig. 10 Penetration depth of aluminum(a) and copper(b) according to different laser power

5.2 레이저 삭마된 입자의 쌓인 높이

본 실험을 통해 Figs. 12, 13과 같이 알루미늄이 구리보다 레이저 삭마 부위 주위의 높이가 높다. 이러한 결과는 비록 레이저 삭마 주위에 열 용융 현상에 의해 발생한 burr에 영향을 받지만 레이저 삭마 현상에 의해 화산처럼 뜯겨져 분출한 미립자

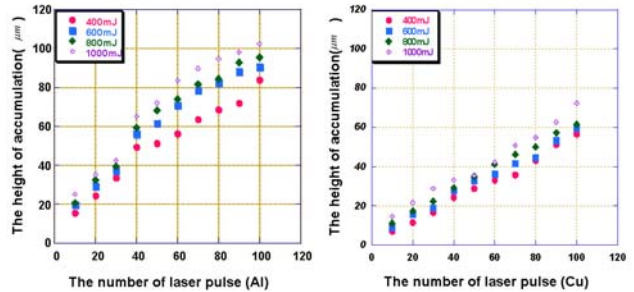


(a)

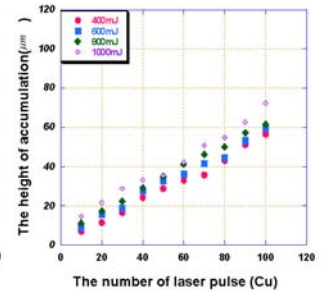


(b)

Fig. 11 Penetration depth according to 10 times laser pulse(a) and 100 times laser pulses(b)

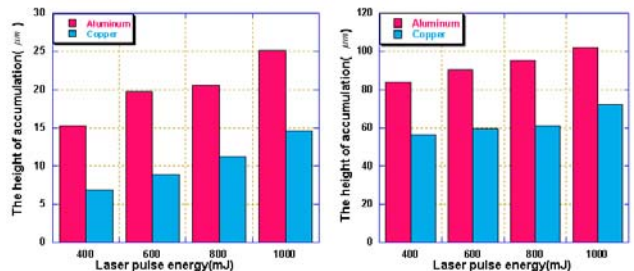


(a)

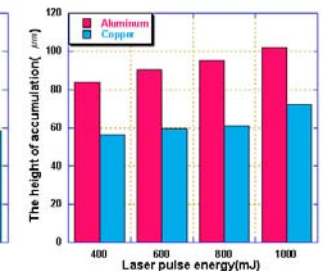


(b)

Fig. 12 Accumulation depth of aluminum(a) and copper(b) according to different laser power

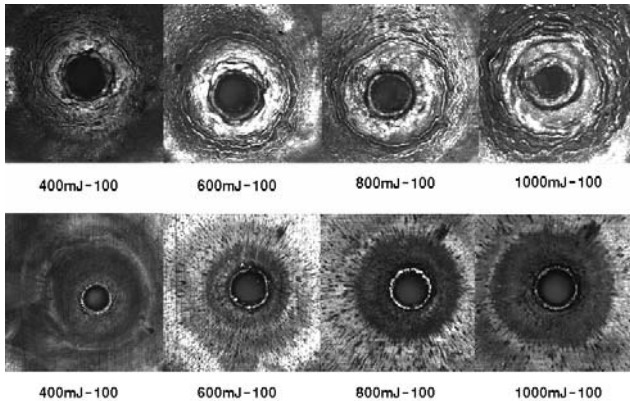


(a)



(b)

Fig. 13 Accumulation depth according to 10 times laser pulse(a) and 100 times laser pulses(b)



**Fig. 14** Surface profile of aluminum(upper) and copper(bottom) by laser ablation

들이 주위에 축적된 결과이다. 여러 번의 레이저 삭마 후 주위의 높이를 측정된 결과 알루미늄과 구리에서 작은 미립자들이 발견 하였고 이로 인해 두 시료 사이에 시료주위의 높이 차이가 발생 하였다는 사실로 알 수 있다. 그리고 Figs. 10, 12를 통해 알 수 있듯이 삭마된 깊이와 삭마 주위에 쌓인 입자 높이의 그래프가 상당히 일치 한다. 이는 삭마된 시료의 미립자들이 삭마주위에 축적되었기 때문이다.

5.3 레이저 삭마된 표면 형상

Figs. 14는 구리가 알루미늄보다 열을 더 많이 전달한다는 사실을 보여준다. 알루미늄의 경우 고 에너지가 한 점에서 삭마현상 발생 후 주위로 에너지가 전달되어 타원의 물결 모양처럼 일그러져 있는 모습을 보인다. 이에 반해 구리의 경우 고 에너지가 주위로 빠르게 전달되어 검게 탄 흔적을 볼 수 있다. 에너지가 높을수록 알루미늄은 보다 더 조밀하게 물결모양이 형성되며 구리의 경우 검게 탄 부분이 더 넓어진다. 그리고 시료의 파인 부분 주위의 경우 알루미늄은 다양한 크기의 입자들이 쌓여 불규칙한 높이를 형성하며 구리의 경우 매끄러운 모양으로 형성된다.

6. 결 론

본 실험에서는 고 출력 레이저를 시료 표면에 조사시켰을 때 시료와 레이저 사이의 반응과 이로 인해 발생하는 플라즈마 및 충격파현상에 대해서 살펴보았다. 동일한 레이저 에너지에서 시료를 달

리하는 실험과 동일한 시료에 레이저 에너지를 달리하는 실험을 수행하였다. 이로 인해 얻은 실험 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알루미늄과 구리 시료에서 발생한 충격파가 Sedov's theory,  $t^{0.4}$ 에 거의 유사하게 비례하여 진행된다.

(2) 충격파는 planar로 진행하다가 일정 시간 경과 후 플라즈마는 소멸되고 충격파는 플라즈마와 분리되어 spherical하게 진행된다.

(3) 충격파 내부는 시료의 입자가 기화를 통해 형성되는 기화충과, 이온화 입자에 의해 형성되는 플라즈마, 플라즈마가 레이저 에너지를 흡수한 뒤 주위의 공기에 에너지를 전달하여 생성되는 이온화된 공기와 이로 인해 공기가 압축되는 영역과, 이러한 공기가 발생하는 충격파로 나누어진다.

(4) 동일한 레이저 에너지를 조사할 경우 알루미늄의 열전도율이 구리보다 낮기 때문에 시료 주위로 전달되는 에너지가 작아 알루미늄이 플라즈마 및 충격파를 발생하는데 필요한 에너지를 더 많이 소모한다.

(5) 알루미늄 시료에서 발생한 충격파가 구리 시료에서 발생한 충격파보다 빠르게 전파되어 진행된다. 이는 알루미늄의 이온화 에너지 및 기화 에너지가 구리보다 작기 때문에 동일한 에너지에서 보다 빠르게 이온화가 발생하며 이로 인해 고온 고압의 플라즈마 및 충격파가 형성되는 것이다.

후 기

본 연구는 학술 진흥 재단 기초 과학 지원 사업 (KRF-2006-311-D00038)과 국방과학연구소 고에너지물질특화센터 (HM-22)의 지원 하에 수행되었다. 가시화 장비구축에 도움을 주신 서울대학교 기계항공공학부 이준식 교수님과 이병희 박사 연구원에게 감사를 드린다.

참고문헌

(1) Allmen, M.V. and Blatter, A., 1995, Laser Beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications, 2nd Ed., Springer, Berlin.  
 (2) Sobol, E.N., 1995, Phase Transformations and Ablation in Laser Treated Solids, Wiley, New



- York.
- (3) Boyd, L.W., 1987, *Laser Processing of Thin Films and Microstructures*, Springer, New York.
- (4) Phipps, C., 2006, *Laser Ablation and its Applications*, Springer, New York, Chap.4.
- (5) Mazhukin, V.I. and Nossov, V.V., 2001, "Modeling of Plasma Dynamics at the Air-Water Interface: Application to Laser Shock Processing," *J. Applied Physics*, Vol. 90, No. 2, pp. 607~618.
- (6) Russo, R.E., 1995, "Laser Ablation," *J. Applied Spectroscopy*, Vol. 49, No. 9, pp. 14A~28A.
- (7) Chen, K.R., Leboueuf, J.N., Wood, R.F., Geohagan, D.B., Donato, J.M., Liu, C.L. and Poretzky, A.A., 1995, "Accelerated Expansion of Laser-Ablated Materials Near a Solid Surface," *Physics Review Letters*, Vol. 75, No. 25, p. 4706.
- (8) Zeng, X.H., Mao, X., Wen, S-B., Greif, R. and Russo, R.E., 2004, "Energy Deposition and Shock Wave Propagation During Pulsed Laser Ablation in Fused Silica Cavities," *J. Applied Physics*, Vol. 37, pp. 1132~1136.
- (9) Choi, T.Y. and Grigoropoulos, C.P., 2002, "Plasma and Ablation Dynamics in Ultrafast Laser Processing of Crystalline Silicon," *J. Applied Physics*, Vol. 92, No. 9, pp. 4918~4925.
- (10) Yoh, J.J., Lee, H.H., Choi, J.H., Lee, K.C. and Kim, K.H., 2008, "Ablation-Induced Explosion of Metal Using a High Power Nd:YAG Laser," *J. Applied Physics*, Vol. 103, No. 4, pp. 043511(1-6).
- (11) Jeong, S.H., Greif, R. and Russo, R.E., 1999, "Shock Wave and Material Vapour Plume Propagation During Excimer Laser Ablation of Aluminium Samples," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 32, pp. 2578~2585.
- (12) Aden, M., Kreutz, E.W., Schluter, H. and Wissenbach, K., 1997, "The Applicability of the Sedov-Taylor Scaling During Material Removal of Metals and Oxide Layers with Pulsed  $CO_2$  and Excimer Laser Radiation," *J. Applied Physics*, Vol. 30, pp. 980~989.
- (13) Sedov, L.I., 1959, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, Academic, Press New York.
- (14) Salleo, A., Genin, F.Y., Feit, M.D., Rubenchik, A.M., Sands, T., Mao, S.S. and Russo, R.E., 2001, "Energy Deposition at Front and Rear Surface During Picosecond Laser Interaction with Fused Silica," *Applied Physics Letters*, Vol. 78, pp. 2840~2842.
- (15) Masterton, William L. and Hurley, Celcile N., 2001, *Chemistry: Principles and Reactions*, Harcourt College Publishers.