# 고온 고압 환경에서 레이저를 이용한 알루미늄 입자 생성과 점화

이경철* · 타이라 쯔바사** · 구군모*** · 이재영* · 박정수**** · 여재익*†

# Aluminum ignition in laser-generated aluminum particles in high temperature and high pressure environment

Kyung-Cheol Lee*, Tsubasa Taira**, Goon Mo Koo***, Jae Young Lee*, Jeong Su Park****, Jai-ick Yoh*†

## ABSTRACT

Characteristic of aluminum ignition under high temperature and high pressure is studied using lasers. The laser ablation method is used to generate aluminum particles exposed to a high pressure by using a nanosecond pulsed laser where the range of ablation pressure varies between 0.35 and 2.2 GPa. A $CO_2$ laser is used to supply radiative heat to the aluminum target surface for providing high temperature ranging between 5000~9300 Kelvin. The ignition is confirmed using spectroscopy analysis of AlO vibronic band 484 nm wavelength. Also the radiative temperature is measured in various high pressure range for tracing the ignition temperature in high pressure conditions.

**Key Words** : Laser ignition, aluminum ignition, high pressure, high temperature

알루미늄 입자는 고엔탈피를 가진 물질로서 오래 전부터 고체 추진제나 폭약과 같은 고에너지 물질의 연소 성능을 향상 시기키 위한 첨가제로 널리 사용되어 왔다. 알루미늄이 입자의 형태를 한 첨가제로 사용되어온 이유는 점화되기 위해서는 많은 에너지가 소요되고 점화가 어렵기 때문이다. 따라서 이를 극복하고자 분말의 형태로 만들어 접촉면적을 증가시켜 점화 효율을 극대화 한 것이다. 이와 같은 용도로 사용하기 위해 알루미늄 입자의 점화와 연소 특성을 알기위한 연구가 진행되어 왔다. 특히 레이저를 이용한 점화 시간, 연소 시간, 점화 온도 측정 등의 연구가 진행되고 있다. 이중에 Marion는 외부 압력에 대한 점화 효과 연구를 수행하였으며, 외부 압력은 입자의 점화 온도 및 점화 지연 시간과 관계가 없으며, 점화 온도는 압력이 변해도 일정하다는 결과를 도출하였다[1]. 하지만 Marion의 실험은 압력 챔버를 이용한 외부 압력 조건은 0.1~4 MPa로 고에너지 물질에서 발생하는 압력에 비교하여 매우 낮은 영역에 한정되었다.

알루미늄이 혼합된 폭약이 폭발 할 때 발생하는 압력은 순간, 약 1 GPa에 달하며, 3000 K 정도의 고온을 발생시키고 먼저 폭굉파가 발생하여 방출 된 후 입자가 뒤를 이어 방출된다. 이때 입자는 고온 고압의 환경에 노출되는데, 이 같은 환경에서의 알루미늄 점화 연소 특성에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 Nd:YAG 레이저를 이용한 레이저 삭마 기법을 이용하여 폭발시 발생하는 폭굉파와 입자 방출 현상을 모사하였으며, 방출된 입자에 지속적인 열원을 공급하기 위해 $CO_2$ 연속 레이저를 이용하여 조사하였다. 이 때 점화와 연소 현상을 초고속 카메라를 이용하여 가시화하여 펄스레이저에 의해 발생한 플라즈마와의 차이를 비교하였으며, 알루미늄 점화와 연소를 확인하기 위해 분광기법을 이용하여 AlO 생성을 확인 하였다. 또한, 여러 압력 환경에서의 점화 온도를 측정하였다.

펄스 레이저를 이용한 레이저 삭마 기법은 마이크로/나노 크기의 입자를 생성하기 위해 널리 활용되어 왔다. 레이저 삭마 기법을 이용한 알루미늄 입자의 생성 과정을 살펴보면, 펄스 레이저가 알루미늄 표면에 집광되어 조사되면, 삭마가 발생하여 알루미늄이 기화되고, 플라즈마가 발생한다. 그리고 삭마시 발생하는 압력에 의해 액적화 된 알루미늄 입자들이 외부로 방출된다. Figure 1은 산란 기법[2]을 이용해 레이저 삭마시 생성된 알루미늄 입자 방출을 확인하고자 수행한 가시화 실험의 개략도와 가시화 이미지 이다.레이저 삭마에 의한 알루미늄 입자 생성 실험

* 서울대학교 기계항공공학부
** Hokkaido University
*** University of Maryland College Park
**** 국방과학연구소
† 연락저자, jjyoh@snu.ac.kr
TEL : (02)880-9334 FAX : (02)-887-2662

에 사용된 펄스 레이저는 1064 nm 파장의 Nd:YAG 레이저이며, 출력은 0.1~1 J 이고 직경 1 mm로 집광하여 사용하였다. Figure 1의 가시화에 사용된 광원은 532 nm 파장의 펄스 레이저이다. 가시화용 532 nm 펄스 레이저는 삭마용 1064 nm 펄스 레이저와 시간차이를 두고 방출된 입자 위로 조사되고, 입자들에 의해 산란된 빛은 카메라로 들어가 이미지를 형성하게 된다.

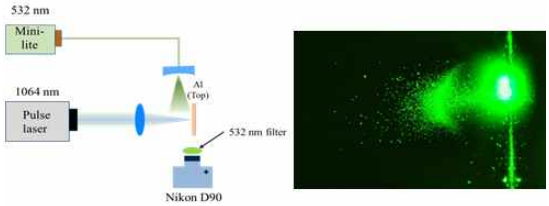


**Fig. 1** The schematic of visualization of aluminum particles generation using pulse laser and particles ejection 25 μs later after 0.1 J irradiation.

Figure 1의 오른쪽 사진은 이와 같은 방식으로 삭마 레이저 0.1 J 조사후 25 μs가 지나고 방출된 입자의 분포를 가시화한 것으로, 레이저 삭마에 의해 생성된 알루미늄 입자들은 조사면에 수직 방향으로 분출되어 사방으로 퍼져나가는 것을 확인 하였다.

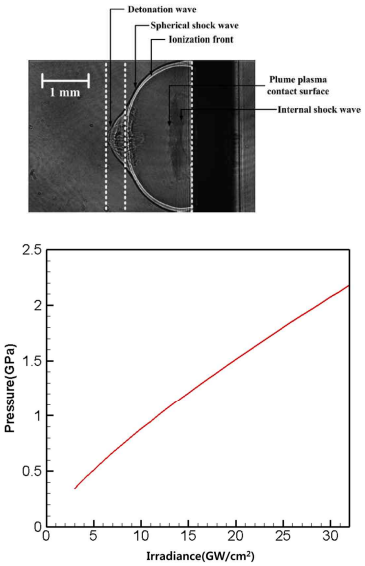


**Fig. 2** Laser supported wave structure[3] and calculated ablation pressure.

알루미늄 레이저 삭마시 얻을 수 있는 이점 중 하나는 레이저에 의한 폭굉 현상, 즉 LSD(Laser Supported Detonation)가 발생한다는 것이다. 참고 문헌 [3]에 따르면, 알루미늄의 레이저 삭마시 위의 FIg. 2와 같은 폭굉파와 충격파가 발생하고 이때 내부는 고압이 형성된다. 알루미늄 삭마시 Fig. 2와 같은 LSD가 먼저 발생하고 뒤이어 입자들이 방출된다. 이는 알루미늄 입자가 혼합된 폭약이 폭발하였을 때, 폭굉파가 먼저 발생하고 뒤이어 입자들이 방출되는 현상과 매우 유사하다. 알루미늄 레이저 삭마시 발생하는 압력을 알아보기 위해 다음 식 (1)을 이용하였다.

$$P = 1.18\left(\frac{A}{Z}\right)^{1/3}\left(\frac{I}{10^{14}\,W/cm^2}\right)^{2/3}10^3 \quad [GPa] \qquad (1)$$

여기서 A는 알루미늄 원소 무게로서 26.98이며, Z는 평균 이온화 정도(average degree of ionization)로 220이고, I는 조사 에너지의 방사조도다. 삭마 레이저의 출력 범위 0.1~1 J을 직경 1 mm로 집광하여 조사시 발생하는 압력을 위의 식을 이용하여 계산해 보면, 발생하는 압력의 범위는 약 0.35~2.2 GPa 이며, 이는 폭약이 폭발 할 때 발생하는 순간 최고 압력과 유사한 범위이다.

레이저 삭마 기법으로 고압의 환경에서 발생한 알루미늄 입자에 10.6 μm 파장의 $CO_2$ 연속 레이저를 조사하여 고온의 환경을 동시에 제공함으로서 생성된 입자의 점화를 발생시킨다.

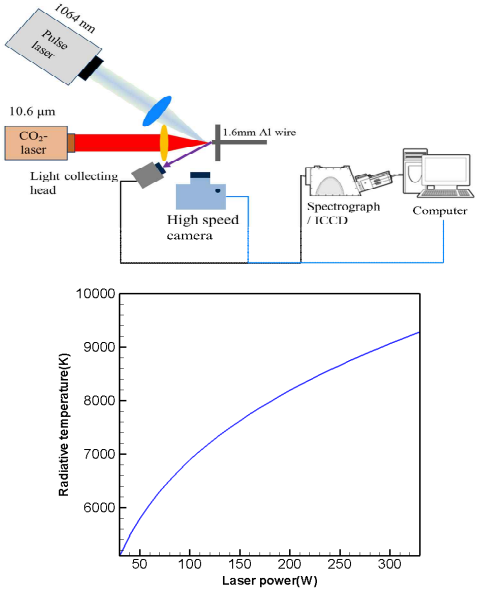


**Fig. 3** The schematic of ignition of aluminum particles using $CO_2$ laser under high temperature and high pressure condition and the range of radiative temperature.

Figure 3은 고온 고압 환경에서 알루미늄 입자 점화를 모사한 실험 개략도와 $CO_2$ 레이저 출력

에 따른 복사 온도를 계산한 결과이다. $CO_2$ 연속 레이저의 출력 범위는 30~330 W이며, 직경 1 mm로 집광하여 조사하면, 5000~9300 K의 복사 온도를 발생 시킬 수 있다. 실험에서는 알루미늄 입자의 점화와 연소를 초고속 카메라를 이용하여 관측하였다. 또한 레이저 조사 시 발생하는 빛 중 알루미늄이 방사하는 빛을 분광기로 검출하여 알루미늄 연소의 중간 산물인 AlO 종이 생성될 때 방출하는 파장 484 nm를 측정함으로서 고온 고압 환경에서 알루미늄이 점화 및 연소 되는 것을 확인하였다.

펄스 레이저와 $CO_2$ 연속 레이저를 같이 조사하게 되면 초기에 발생한 플라즈마에 의해 입자의 점화를 유관으로 확인하기 어려우며, 발생한 빛이 플라즈마인지 알루미늄 점화에 의한 것인지 판별하기 어렵다. 따라서 펄스에 의해 발생하는 플라즈마의 차별성을 확인해야 한다.

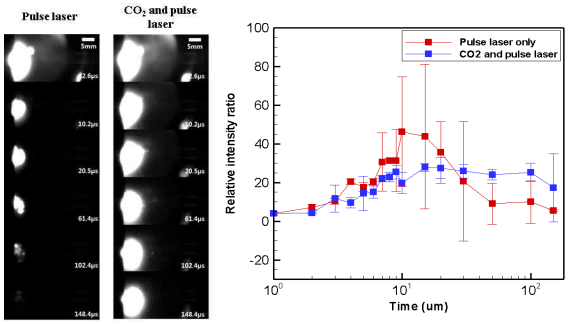


**Fig. 4** Comparison of image of high speed camera between the irradiation of pulse laser only and the irradiation of $CO_2$ and pulse lasers.

Figure 4는 0.26 J의 펄스 레이저를 조사 할 때, 즉 삭마용 펄스 레이저만 조사하였을 경우 발생하는 플라즈마와 330 W $CO_2$ 연속 레이저와 0.26 J 펄스 레이저를 같이 조사하였을 때 발생하는 플라즈마를 초고속 카메라로 촬영한 결과이다. 그리고 분광기를 이용하여 AlO 종의 생성 파장 484 nm 측정한 것이다. 펄스 레이저만 조사한 경우 초기 발생한 플라즈마는 3 μs 이 후 급격히 작아지고 점점 소진되어 150 μs에 거의 소멸 된다. 하지만 펄스 레이저와 $CO_2$ 레이저를 같이 조사한 경우 150 μs에서도 여전히 빛이 플라즈마의 형태로 존재하고 있는 것이 확인되었다. 그런데 펄스 레이저만 조사했을 때 플라즈마는 150 μs에 소멸됨으로 CO2와 펄스 레이저를 같이 조사해서 유지되는 빛은 플라즈마로 보기는 어려우며, 10 μs 이후부터 빛 속에서 방출되는 입자의 존재로 볼 때 알루미늄 입자의 연소로 발생한 불꽃으로 판단된다. 따라서 분광기를 이용하여 AlO 종의 생성 파장인 484 nm 파장의 빛을 측정하여 비교하였다. 펄스 레이저만 조사한 경우 발생한 AlO는 브레이크다운이 발생하여 생성된 플라즈마에서 알루미늄 원소가 재구성 되면서 순간적으로 발생하는 산화 현상으로서 입자 연소라고 보기에는 소진되는 시간이 매우 짧고, 특히 10 μs 이후 급격히 소진되어 150 μs에는 모두 사라진다. 하지만 $CO_2$와 펄스 레이저를 같이 조사한 경우는 AlO가 서서히 생성되어 11 μs에 최고에 도달하고 이후 지속적으로 유지가 되는 것이 확인되었다. 즉, 생성된 알루미늄 입자가 지속적으로 연소하며 AlO를 생성하는 것이며, 초고속 카메라의 결과와 일치한다.

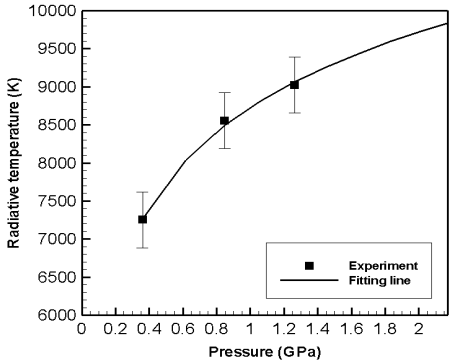


**Fig. 5** Radiative ignition temperature in high pressure condition.

Figure 5는 고압 환경 조건에서 알루미늄의 복사 점화 온도를 측정한 결과이다. 압력이 증가할 수 록 점화에 필요한 복사 온도 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 실험 결과는 고압에서 알루미늄의 녹는점과 끓는점이 증가하는 고유 특성과 일치하며, 고압 환경에서는 대기압 조건에서보다 더욱 높은 점화 온도가 필요한 것을 시사한다.

## 후 기

본 연구는 고압충격 폭발현상 해석기법 특화연구실의 HH-5과제와 국방과학연구소 위탁과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고 문헌

[1] M. Marion, C. Chauveau, I. Gokalp, “Studies on the ignition and burning of levitated aluminum particles”, Combustion Science and Technology, 1996, 115, pp.369-390.
[2] J. Koch, S. Schlamp, T. Rosgen, D. Fliegel, D. Gunther, “Visualization of aerosol particles generated by near infrared nano-and femtosecond laser ablation”, Spectrochimica Acta Part B, 2007, 62, pp. 20-29.
[3] C. H. Kim, J. J. Yoh, “Surface chemical