

레이저를 이용한 마이크로/나노 알루미늄 입자 생성과 점화

이경철* · 여재익*†

Generation and ignition of micro/nano - aluminum particles using laser

Kyung-Cheol Lee* · Jai-ick Yoh*†

ABSTRACT

Ignition delay of micro/nano aluminum particles is caused by aluminum oxide shell. The method of minimizing this ignition delay is proposed in the study. Generating and heating of particles are processed at the same time. As soon as heated particles are produced, they immediately contact with oxygen. Chemical reaction is induced on the contact surface instead of crystallization of oxide shell. Finally particles are ignited. Aluminum particles are generated by laser ablation on an aluminum plate using Nd:YAG pulse laser. Injected particles are confirmed through visualization of particles using scattering method. CO₂ continuous laser supplies heat to aluminum plate and generated particles. Trace of burning particles is observed in the experiment.

초 록

금속 연료로 사용되는 마이크로/나노 알루미늄 입자를 산화피막에 의한 점화 지연을 최소화 하는 점화 방법을 제시 하였다. 알루미늄 입자를 생성시킴과 동시에 가열하여 입자가 생성된 직후 산소와 접촉시 격렬한 산화 반응을 유도하여 점화를 시키는 방법이다. 1064 nm 파장의 Nd:YAG 펄스 레이저를 이용한 레이저 삭마(laser ablation)를 알루미늄 시편에 발생시켜 입자를 생성하였으며, 산란 기법(scattering method)을 이용하여 입자를 가시화하여 생성을 확인하였다. 10.6 μm 파장의 CO₂ 연속 레이저를 사용하여 알루미늄 시편을 가열하고 생성된 입자의 점화 열원으로 사용하여 알루미늄 입자가 점화되고 연소되어 이동하는 궤적을 확인하였다.

Key Words: Laser Ablation(레이저 삭마), Micro/Nano-Aluminum Particle(마이크로/나노 알루미늄 입자), Aluminum Ignition(알루미늄 점화), Laser Ignition(레이저 점화)

1. 서 론

알루미늄은 고 연소 엔탈피를 가지며 저비용 물질로서 추진제나 폭발성 고에너지 물질에 입자 형태의 첨가제로 널리 사용되고 있다.[1-3] 때문에 알루미늄 입자의 연소에 관한 연구는 60년

* 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

대부터 꾸준히 진행되어 왔다. 알루미늄이 주연료로 사용되지 못하고 첨가제로만 사용되었던 이유는 알루미늄이 산소가 존재하는 환경에 놓이면 산소와 반응하여 산화피막(Al_2O_3)이 표면에 형성되어 접화가 어렵기 때문이다.[4, 5] 이 산화피막을 제거하여 알루미늄을 접화시키기 위해서는 약 2300 K 이상의 온도가 필요로 하는데 이는 접화에 과도한 에너지를 소모하게 된다. 또한 금속 연료는 입자의 크기에 따라 연소 시간이 결정되는데 입자의 크기가 큰 경우 제한된 연소실 공간 내에서 입자가 모두 연소되지 않은 채로 연소실을 빠져나가 연소 효율이 감소 될 수 있다.

이러한 접화 및 연소의 문제 때문에 최근 알루미늄 입자의 연소 특성 연구에서는 레이저를 알루미늄 입자를 접화하는데 사용하고 있다.[6-9] 레이저는 광학적으로 집광을 하면 에너지가 응축되어 금속을 빠르게 높은 온도까지 가열하기 용이하여 알루미늄 입자를 접화시키기에 적합하다.

하지만 입자화 되어있는 알루미늄을 이용한 연소 특성 연구는 기존 산화 피막이 형성된 입자로서 첨가제의 역할에 한정되어 있다. 때문에 여전히 접화에 높은 에너지가 소요된다. 본 연구에서는 레이저 삭마 기법을 이용하여 알루미늄 시편으로부터 마이크로/나노 크기의 입자를 생성하고 레이저로 가열하여 입자가 생성되면서 화학반응을 유도하여 접화가 발생하게 함으로서 개선된 알루미늄 입자의 접화 방식을 제안하고자 한다.

2. 레이저 삭마 기법을 이용한 마이크로나노 알루미늄 입자 생성

레이저를 금속 표면에 집광하여 조사하면 금속면이 삭마되며, 이어 플라즈마가 발생하게 된다. 이를 레이저 삭마 기법이라고 하는데, 레이저 삭마 기법을 이용하여 금속판에서 마이크로/나노 크기의 알루미늄 입자를 생성한다.[10, 11] Figure 1은 펄스 레이저를 이용한 알루미늄 입자

의 생성을 가시화하기 위한 실험 장치의 개략도이다.

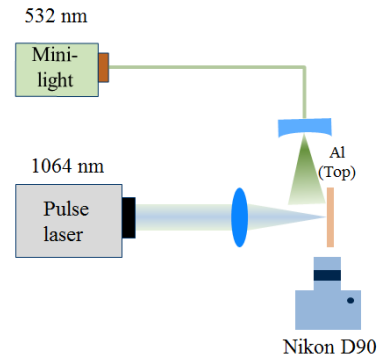


Fig. 1 Schematic of visualization of micro/nano - aluminum particle generation by laser ablation.

Figure 1에서 알루미늄 판은 1064 nm Nd:YAG 펄스 레이저를 직경이 1 mm가 되도록 집광하여 알루미늄 판에 조사하면 삭마되어 알루미늄 입자가 생성된다. 생성된 입자는 조사된 면에서 방출되고, 펄스레이저와 시간 지연을 두고 조사되는 532 nm 파장의 레이저에 의해 산란을 일으켜 점과 같은 형태로 가시화(light scattering method) 되게 된다.[12] Figure 2는 100 mJ 펄스 레이저 조사 후 25 μ s 뒤에 생성된 알루미늄 입자의 방출을 가시화한 것이다.

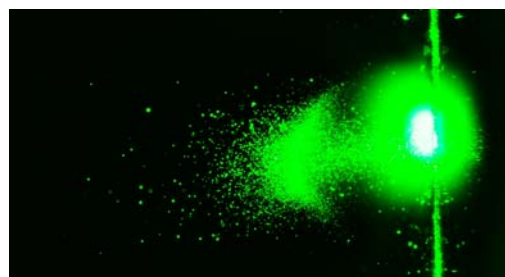


Fig. 2 Injection of produced particles 25 μ s later after 100 mJ pulse laser irradiation.

레이저 삭마 기법에 의해 생성된 입자는 조사면에 수직 방향으로 Fig. 2 와 같이 분출되어 사방으로 퍼져나간다.

3. 레이저를 이용한 마이크로/나노 알루미늄 입자 점화

레이저 삭마 기법을 이용하여 생성된 마이크로/나노 입자를 짧은 시간 안에 점화시키기 위하여 CO₂ 연속 레이저를 이용한다. 다음 Fig. 3은 레이저 알루미늄 입자 점화 실험 장치의 개략도이다.

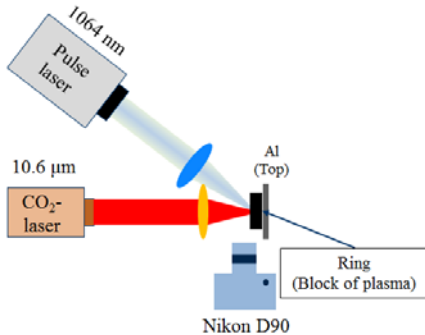


Fig. 3 Schematic of laser ignition of generated micro/nano - aluminum particles.

CO₂ 연속레이저는 직경이 1 mm 가 되도록 집광되어 시편(5x5x0.5 mm)에 지속적으로 조사되

며 시편을 가열하면서 동시에 생성된 알루미늄 입자를 바로 점화 시킨다. 레이저 조사면 앞에 높이가 1 cm인 링을 설치하여 레이저 삭마 현상 시 발생하는 플라즈마 빛을 차단하여 점화된 알루미늄 입자의 발화된 빛을 가시화 한다.

4. 결 과

레이저 삭마 기법에 의한 입자의 생성과 방출 형태를 보기위해 가시화를 수행하였다. Figure 4는 알루미늄 시편(5x5x0.5 mm)에 펄스 레이저 빔을 직경 1 mm로 집광하여 1 펄스를 조사한 후 시간에 따른 입자의 생성과 방출을 보여준다. Figure 4에서와 같이 레이저 조사 후 약 10 μs 이후 많은 양의 알루미늄 입자가 방출되어 나오기 시작하며, 약 15 ~ 20 μs 에 가장 큰 분포를 나타낸다. 또한, 레이저의 에너지를 높이면 더 많은 양이 생성 되고 넓은 분포를 나타낸다. 이는 레이저 삭마 기법을 이용하여 점화를 유도하기 위한 입자의 생성이 충분히 발생하는 것을 확인하였다.

생성된 알루미늄 입자는 방출되어 CO₂ 연속 레이저(가열 빔)에 의해 점화된다. 점화 현상의

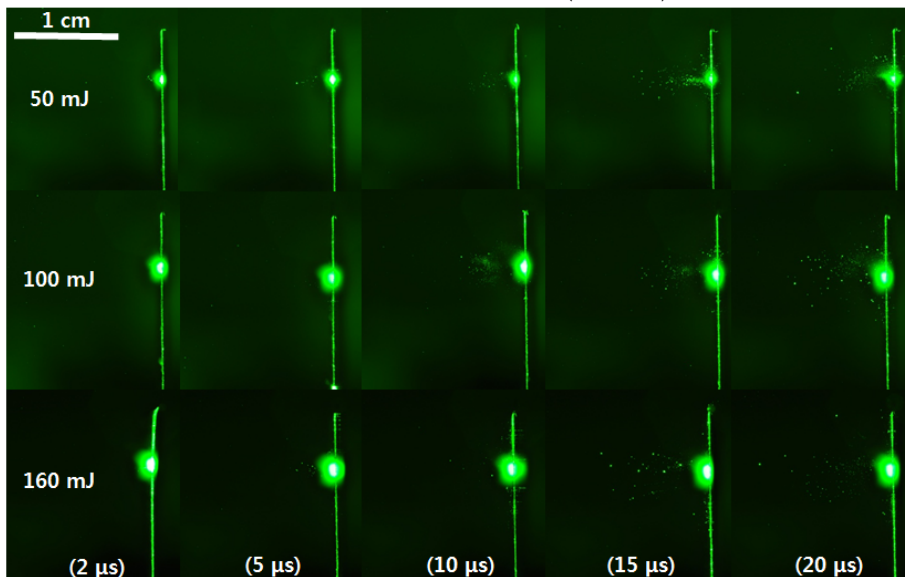
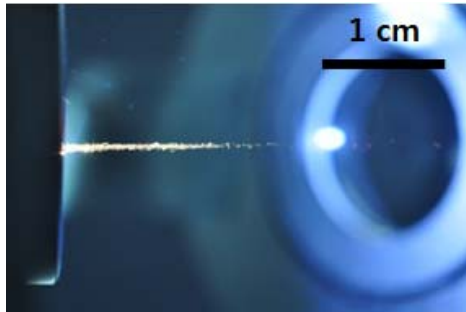
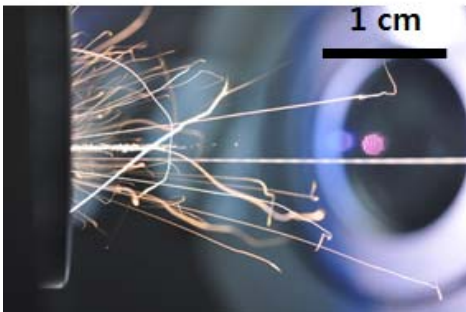


Fig. 4 Generation of aluminum particles by laser ablation : 50, 100, 160 mJ irradiation.

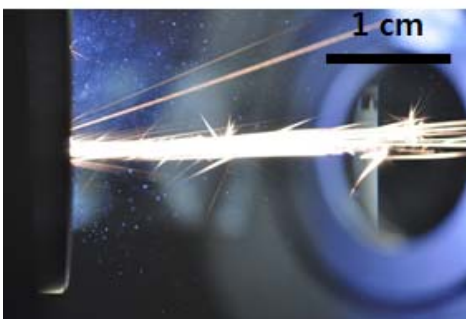
가시화를 위해서는 많은 양의 입자를 지속적으로 발생시킬 필요가 있다. 때문에 사용된 펄스 레이저의 에너지는 300 mJ 이며, 카메라의 노출 시간인 3초 동안 10 Hz의 주기로 조사되었다. 다음 Fig. 5는 330 W로 조사되는 CO₂ 레이저와 펄스 레이저 간의 조사 시간 차이에 따른 입자의 점화 형태를 가시화한 결과이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Generation and Ignition patterns of aluminum particles depends on time interval between CO₂ and pulse laser : (a) 5 s, (b) 10 s, (c) 20 s.

Figure 5에서는 시편에 가열 빔을 먼저 조사하기 시작하고 후에 펄스 레이저를 조사하여 입자를 생성 방출하게 한다. 생성된 입자는 방출되는 과정에서 가열 빔에 의하여 점화 되게 되는데 점화 현상이 가열 빔과 펄스 레이저의 시간 간격에 따라 다르게 형성이 된다.

Figure 5의 (a)는 가열 빔 조사 후 5초 이내에 펄스 레이저를 조사하여 생성된 알루미늄 입자의 점화 현상의 경향이다. 여기서 가열 빔을 따라서 입자가 점화 되어 점처럼 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 연소 시간이 매우 짧은 나노 사이즈의 입자의 점화에서 볼 수 있는 것으로 점처럼 분포 되는 것이 특징이다. 즉 삭마에 의해 생성된 입자들이 시편에서 떨어져 나와 가열된 후에 점화 되어 사라지기 때문에 가열 빔의 경로 상에만 존재한다.

Figure 5의 (b)는 가열 빔의 조사 후 10 초 뒤에 펄스 레이저를 조사하여 생성된 입자의 점화 현상이다. 이는 (a)의 진행형으로서 사진 가운데 가열 빔의 경로를 따라 발생한 점화와 함께 마이크로 입자의 점화 경향인 입자의 점화에 의한 라인 형상의 점화 입자 모션이 함께 관찰된다. 이것은 펄스 레이저 조사 초기에 견고하게 생성된 나노 입자에 의한 점화가 먼저 관찰되고 차후에 삭마가 진행되면서 시편이 얇아지고 가열 빔에 의해 삭마면이 융해가 진행되면서 경도가 떨어지고 연성이 증가된 물질이 레이저 삭마에 의해 마이크로 사이즈로 방출 되면서 화학적 반응이 입자 표면에서 발생되어 점화가 되고 입자가 큰 만큼 연소 시간이 길어 라인 형태를 나타낸다.

Figure 5의 (c)는 가열 빔 조사 후 20초 뒤에 펄스 레이저를 조사하여 생성된 입자의 점화를 보여준다. 가열 부위가 초기부터 융해가 진행되는 시점에 펄스 레이저를 조사하여 삭마를 시켜 생성된 입자가 삭마부위에서 방출됨과 동시에 산소와 접촉하면서 산화 피막을 형성하지 않고 입자 표면에서 산소와의 화학 반응이 발생하여 점화되면서 레이저 삭마에서 발생하는 압력과 더불어 연소에서 생성된 압력이 추가되어 입자는 노즐에서 분사되는 것과 같은 형태로 분출

가속되어 강한 빛과 선형적 이동 궤적을 보여준다.

4. 결 론

레이저 삭마 기법을 이용하여 알루미늄 판에서 마이크로/나노 알루미늄 입자가 생성되는 것을 가시화를 통하여 확인하였다. 또한 초기 가열 정도에 따라 생성 입자와 점화 현상이 다르게 발생하였으며, 레이저를 이용한 알루미늄 입자 생성과 동시에 삭마 부위의 가열과 생성 입자를 가열하는 것은 알루미늄 입자의 산화 피막 (Al_2O_3) 형성 과정에서 결정화를 저해하여 입자의 표면에서 산소와의 화학 반응을 유지하여 알루미늄 입자가 점화하는 것을 확인하였다.

하지만 알루미늄 판에서의 가열 빔과 펄스 레이저의 시간 차이는 결국 삭마면에서의 초기 온도에 따른 효과라고 볼 수 있으며, 초기 온도에 따른 입자의 생성 효과와 점화 현상에 대한 정량적인 분석이 요구된다.

후 기

본 연구는 BK-21과 반응성 금속물질 함유 복합 화약의 thermobaric 폭풍압 전산해석 연구 과제의 후원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. A. Gany, D. W. Netzer, "Combustion studies of metallized fuels for solid fuel ramjets," Proceedings of SAE, ASME and ASEE Joint Propulsion Conference AIAA-1985-1177, 1985.
2. Bryan Palaszewski, Richard Powell, "Launch vehicle performance using metallized propellants," Journal of Propulsion and Power 10 (6), 1994, pp.828-833
3. Edward L. Dreizin, "Metal-based Reactive Nanomaterials," Proceedings of the Combustion Institute 35, 2009, pp.141-167
4. Ying Huang, Vigor Yang, Richard A. Yetter, Grant A. Risha, "Analysis of Aluminum Particle Combustion in Different Oxidizer Environments," AIAA, 2005-0738, 2005.
5. 윤시경, 신준수, 성홍계, "나노-마이크로 알루미늄 혼합 입자의 공기와의 연소 모델링," 한국추진공학회지, 제15권, 제6호, 2011, pp.15-25.
6. Robert J. Gill, Carlo Badiola, Edward L. Dreizin, "Combustion Times and Emission Profiles of Micron-sized Aluminum Particles Burning in Different Environments," Combustion and Flame, 157, 2010, pp.2015-2023.
7. Carlo Badiola, Robert J. Gill, Edward L. Dreizin, "Combustion Characteristics of Micro-sized Aluminum Particles in Oxygenated environments," Combustion and Flame 158, 2011, pp.2064-2070.
8. Ahmed A. Abdel-Hafez, Matthew W. Brodt, Joel R. Carney, and James M. Lightstone, "Laser Dispersion and Ignition of Metal Fuel Particles," Review of Scientific Instruments, 82, 2011, 064101.
9. Heesung Yang, Woongsup Yoon, "Modeling of aluminum particle combustion with emphasis on the oxide effects and variable transport properties," Journal of Mechanical Science and Technology 24 (4), 2010, pp.909-921.
10. Khurram Siraj, Yasir Sohail, and Aasma Tabassum, "Metals and metal oxides particles produced by pulsed laser ablation under high vacuum," Turkish Journal of Physics, 35, 2011, pp.179-183.
11. N. G. Semaltianos, W. Perrie, M. Sharp, C.

- J. Williams, S. P. Edwardson, G. Dearden, K. G. Watkins, "Nano-Particle Generation by Femto Second Laser Ablation," Proceeding of Nanomanufacturing conference, 2007-405, 2007.
12. J. Koch, S. Schlamp, T. Rösger, D. Fliegel, D. Günther, "Visualization of Aerosol Particles Generated by Near Infrared Nano- and Femtosecond laser ablation," Spectrochimica Acta Part B 62, 2007, pp.20-29.