



THEME 03

레이저를 이용한 알루미늄의 마이크로 점화기술 소개

김 창 환 | 서울대학교 기계항공공학부, 석사과정

여 재 익 | 서울대학교 기계항공공학부, 교수 | e-mail : jjyoh@snu.ac.kr

이 글에서는 분말형태가 아닌 고체형태(bulk)의 고에너지 금속물질을 레이저 조사를 통하여 효율적으로 점화시키는 방법에 대하여 소개하고자 한다.

일상생활부터 산업체 그리고 연구소에 이르기까지 레이저는 다양하게 응용되어 왔다. 일상생활에서는 바코드 리더, 전광판 등에 편리함을 위해 사용되며, 산업 현장에서는 고출력 레이저를 이용하여 절단, 용접, 가공 등을 하고 있다. 그리고 학문적 기초연구의 목적으로 미지의 물질에 대한 정성 및 정량 분석을 위한 화학 분석과 석탄과 석유 등의 화학 연료를 이용한 추진이 비효율적인 우주에서 레이저를 이용하여 추진하는 레이저 추진 등에 이용되고 있다. 특히 레이저의 유용성에 힘입어 계속적으로 레이저를 이용하는 분야가 증가하고 있으며, 레이저를 이용하여 새로운 점화기술을 개발하고자 하는 노력은 계속되고 있다. 레이저 에너지를 하나의 점화원으로 이용하려는 연구도 이러한 노력 중의 하나라고 할 수 있다. 레이저에 의한 마이크로 점화 방법은 레이저 빔이 지닌 고에너지를 순간적으로 알루미늄에 조사하여 고체 상태의 알루미늄을 매우 짧은 시간에 원자, 이온 그리고 분자형태로 여기시키고 이들의 화학 반응을 통해 연소를 발생시키는 방법이며, 레이저 삭마(그림 1)가 주요 메커니즘이다. 현재 많이 쓰이는 점화 방법에는 Electrode spark를 이용하는 방법, 압력

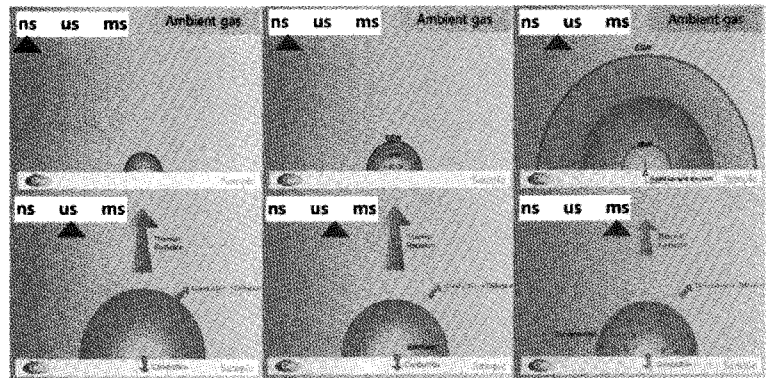


그림 1 레이저 삭마 과정

(<http://www.appliedspectra.com/technology/laser-ablation.html>)

과 충격 등을 이용하는 방법이 있다. 이들과 비교하여 레이저를 이용하는 점화방법은 독특한 장점을 가지고 있다. 예를 들어, 점화 시간과 위치에 대한 한계극복, 벽면으로부터의 열 손실 감소, 연소실 안에서의 다중 점화 등이 있다. 이러한 이점들은 최종적으로 점화 효율뿐만 아니라 엔진의 효율을 증가시킬 수 있다.

레이저 점화의 종류는 레이저 열 점화(laser thermal ignition), 레이저에 의한 광화학 점화(laser-induced photochemical ignition), 레이저에 의한 공명 붕괴 점화(laser-induced resonant breakdown ignition) 그리고 레이저에 의한 방전 점화(laser-induced spark ignition) 등 크게 네 가지로 나눌 수 있다. 이 글에서 소개하고자 하

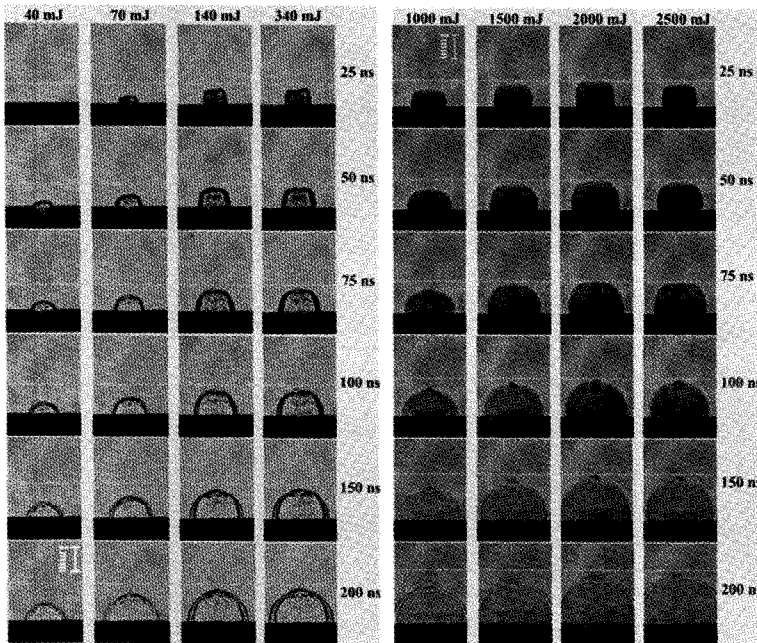


그림 2 레이저에 의한 알루미늄 붕괴현상 및 초음속 화염전파 현상 가시화 (Kim & Yoh, JAP, 109, 093510, 2011)

는 분야는 레이저에 의한 공명 붕괴 점화와 방전 점화 방법에 속한다. 공명 붕괴 점화법은 연료 분자들의 비공명 다중광자의 광분해와 광분해 과정에서 발생된 원자들의 공명 광이온화 과정에 의해 플라즈마를 발생시키는 전자가 만들어지며, 최종적으로 플라즈마에 의해 점화가 이루어진다. 방전 점화 방법은 다중 광 이온화 연료 분자들에 의해 전자가 발생되며, 이 전자에 의해 붕괴현상이 일어나게 된다. 이 과정에서 빛, 열 그리고 충격파가 연료에서 발생되며, spark의 강도가 충분히 크다면 점화를 시작으로 완전한 연소로 발전하게 된다. 이러한 현상들은 연료의 증기화부터 충격파 발생, 응축까지 마이크로 초 시간 안에서 완성된다.

이 글에서는 나노 초급의 짧은 펄스 간격의 고출력 레이저를 이용하는 새로운 점화 시스템에 관해 shadowgraph 가시화를 통해 알루미늄 연소현상의 구조와 형태를 확인하며, X-Ray Diffraction 기법을 이용하여 알루미늄과 공기 중 산소와의 화학반응에 대한 증

명을 목표로 하고 있다.

Shadowgraph 가시화

레이저 펄스를 이용하여 고체 형태의 알루미늄을 연소시키기 위해서 레이저 삭마현상이 이용되고 있다. 나노 초급 이하의 아주 짧은 펄스 간격을 지닌 레이저 빔이 금속 물질의 표면에 집광되면 높은 에너지가 작은 영역에 집중되어 그 부위의 금속 물질이 순간적으로 높은 압력과 온도를 가지는 플라즈마 상태에 이르게 된다. 생성된 고압의 플라즈마 층은 급격한 팽창을 통해 주변의 공기를 밀어내며 충격파를 발생시킨다. 보통 엔진에서 점화 효율을 높이기 위해 분진 형태의 고에너지 물질(알루미늄, 타이타늄, 보론 등)

이 사용된다. 하지만 이러한 물질들은 별도의 산화제와 분진 형태를 갖기 위해 이차 공정과정을 필요로 한다. 따라서 시간도 소요될 뿐만 아니라 경제적 측면에도 부적합하다. 따라서 분진 형태가 아닌 판 형태(bulk)의 알루미늄을 고출력 레이저를 사용하여 점화시킬 수 있으며, 별도의 산화제를 사용하지 않고 공기 중의 산소와 반응을 유도하여 점화/연소를 가능하게 하였다. 본 연구에서 사용된 shadowgraph 가시화 방법은 공기, 물, 유리와 같은 투명한 매개체 안에서 비불변성을 나타내는 광학 방법이다. 이러한 shadowgraph 기법은 유사한 기능을 가지는 schlieren 가시화 기법에 비해 간단하다. 투명한 공기 중에서는 충격파, 다른 종류의 기체를 구별할 수 없으며 온도의 차이를 직접적으로 알 수 없다. 하지만 이러한 모든 것들은 빛을 굴절시키기 때문에 그늘을 만들게 된다. 즉, 밀도 구배가 발생하게 되며 이러한 차이를 CCD 카메라를 이용하여 이미지화 하는 것이다. 따라서 shadowgraph 가시화 방법을 이용하

먼 레이저에 의해 발생하는 플라즈마와 충격파의 전파 뿐만 아니라 여기된 비선형 heat wave까지 확인할 수 있는데 이것은 레이저 빔과 물질 간의 상호작용에 의해서 서로 다른 압축 상태와 밀도를 가지기 때문이다. Shadowgraph 가시화 방법은 매우 다양한 분야의 연구에 적용 가능하다. 그림 2와 같이 레이저 에너지 증가에 의해 발생하는 현상을 shadowgraph 가시화 할 수 있다. 밀도의 차이를 명도를 통해 확인할 수 있으며, 낮은 에너지 영역(40~340mj)에서는 발생하지 않는 초음속 화염 전파(Detonation)가 높은 에너지 영역(1,000~2,500mj)에서 발생됨을 확인할 수 있다.

초음속 화염전파

연소현상은 우리의 실생활, 산업현장 그리고 과학 분야에서 다양하게 적용되고 있다. 가정에서 사용되는 난방용 열, 취사용 열 등은 직접적으로 가스나 석유를 연료로 하는 보일러나 버너의 연소에서 얻어지는 것들이다. 간접적으로는 전기적 에너지의 대부분이 화석연료를 태울 때 발생하는 열에너지를 변환하여 얻어지는 것이다. 그리고 운송 수단으로 사용하는 자동차, 선박, 항공기 등의 동력원은 주로 석유연료를 연소할 때 나오는 열에너지에서 변환된 운동에너지이다. 특히 항공기는

전적으로 연료의 연소를 통해 추력을 얻고 철도차량의 대부분은 디젤엔진의 동력을 이용한다. 연소의 정의를 살펴보면 열을 생성하거나 열과 빛을 동시에 생성하는 빠른 산화, 혹은 빛과 열을 거의 생성하지 않는 느린 산화로 정의할 수 있다. 공학적으로는 빠른 산화만을 연소로 한정하는 것이 합리적인데 이는 대부분의 연소가 이런 빠른 산화의 범주에 속하기 때문이다. 연소현상에 대한 분류와 그와 관련된 전문용어에 대해 간단히 살펴보면 크게 네 분류-예혼합과 확산 연소, 층류와 난류 연소, 아음속과 초음속 연소, 균질과 비균질 연소-로 나눌 수 있다. 본 연구와 관련된 아음속 대 초음속 화염전파는 유동의 속도 성질에 따라 그 특성이 결정된다. 아음속 유동에서는 확산의 분자 충돌과정들이 주된 메커니즘이며 반응이 완성되기까지 많은 시간이 소요된다. 이러한 연소 유형은 우리의 일상에서 많이 볼 수 있는데, 촛불이나 불씨 등이 그 예이다. 반대로 초음속 연소현상에서 높은 유동의 속도는 주로 대류 전달방식이 주된 메커니즘이며 반응이 완성되기까지 아음속 연소와 비교할 때 적은 시간이 소요된다. 충격파와 희박화 등을 포함한 파의 움직임들이 초음속 연소현상에서 나타나며, 이러한 초음속 연소는 주로 폭발현상과 초음속 비행과 연관되어 있다. 따라서 폭발현상에서 발생하는 초음속 화염전파(그림 3(a))현상과 고효율 레이저를 이용

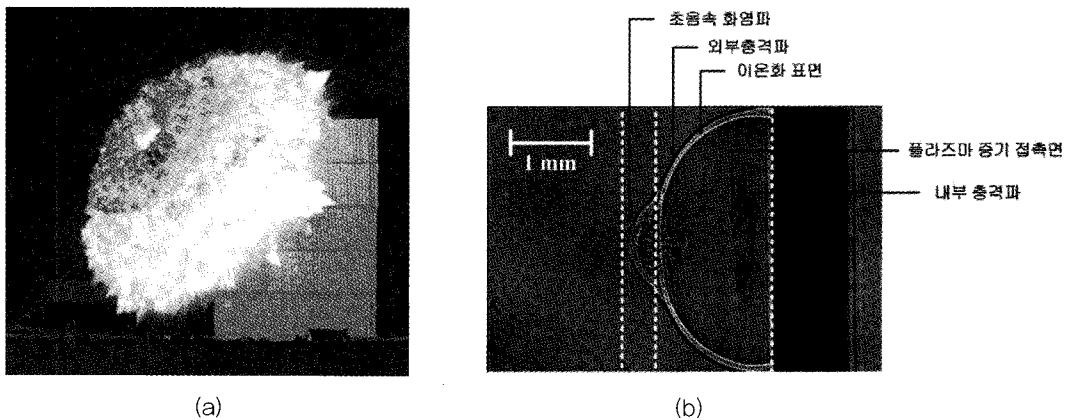


그림 3 (a) 시 분진의 지상 위 폭발 (b) 레이저 점화에 의한 시의 초음속 화염(Kim & Yoh, JAP, 109, 093510, 2011)

하여 발생하는 초음속 화염전파현상에 대해 속도와 압력에 관한 연구가 진행되고 있다. 그 분석 결과로는 알루미늄 분진과 공기의 초음속 연소현상에 의해 발생하는 속도(~1,800m/s)와 고출력 레이저에 의해 알루미늄 판에서 발생하는 초음속 연소현상의 초음속 화염파의 속도가 일치한다는 사실이 최근 연구에 의하여 확인되었다. 또한 shadowgraph 가시화를 통해, 알루미늄 판 위에서 발생하는 마이크로 연소현상에 의해 발생하는 초음속 화염파(Detonation wave), 충격파(Shock wave), 이온화(Ionization front), 플라즈마 표면(Plasma plume)을 볼 수 있었다.(그림 3(b))

X선 회절분석법

목표 물질에 대한 성분 분석 방법에는 직접적인 화학 분석이나 빛을 이용하는 방법 등 여러 가지 기법이 존재한다. X선 회절분석법(X-Ray Diffractometry)은 물질의 내부 미세구조 및 성질을 밝히는 데 매우 유용하다. 임의 시료가 어떠한 성분으로 구성되어 있는지 몰라도, 이 시료에 X선을 조사시켜서 나타나는 회절패턴을 이미 알고 있는 시료에서 얻어진 회절패턴과 서로 비교하여 그 성분을 알아낼 수 있다. 이를 정성분석법이라고 하며, 이 방법으로 정성분석을 행하는 것을 X선 회절법

에 의한 정성분석, 동정이라고 한다. 정성분석의 특징으로는 단순하게 원소에 대한 정성분석이 아니고, 화합물의 형태로 미지 물질이 동정되어 조성분석 및 상태분석이 가능하며 단일성분이 아닌 경우, 혼합물인지 고용체인지의 구별이 또한 가능하다. 그리고 화합물의 상변화, 변태의 구별을 할 수 있으며 시료는 소량으로도 좋으며, 시료조정이 비교적 간단하고, 측정하는 것으로 비파괴분석(시료손상 없음)이 가능하다. 시료가 분말로 되어 있거나, 그 형상이 판, 피상, 선상 등 어떤 모양이든지 측정수단을 바꾸어 측정 가능하다. X선 회절현상을 이용한 X선 회절분석법은 초기에 비교적 단순한 형태의 결정 물질 속에 있는 원자들의 배열과 상호거리에 관한 지식과 금속, 중합물질 그리고 다른 고체들의 물리적 성질을 명확하게 이해하는 데 많은 도움을 준다. 즉 두 개 이상의 파동 사이에 서로 위상차이가 그 파동의 반 파장만큼 있을 때는 서로 상쇄되어 파동이 사라지나, 위상차이가 파장의 정수 배만큼 있을 때는 진폭이 두 배로 되어서 세기가 더 크게 된다. 최근의 X선 회절 연구는 Steroid, 비타민, 향생물질과 같은 복잡한 자연물의 구조를 밝히는 데 주로 이용되고 있다.

알루미늄 판에 나노초 고에너지 레이저를 조사하면 네 번의 가스 상태 반응과 알루미늄 판 표면에서의 AlO와 Al₂O에 의한 각 한 번의 heterogeneous 반응으로

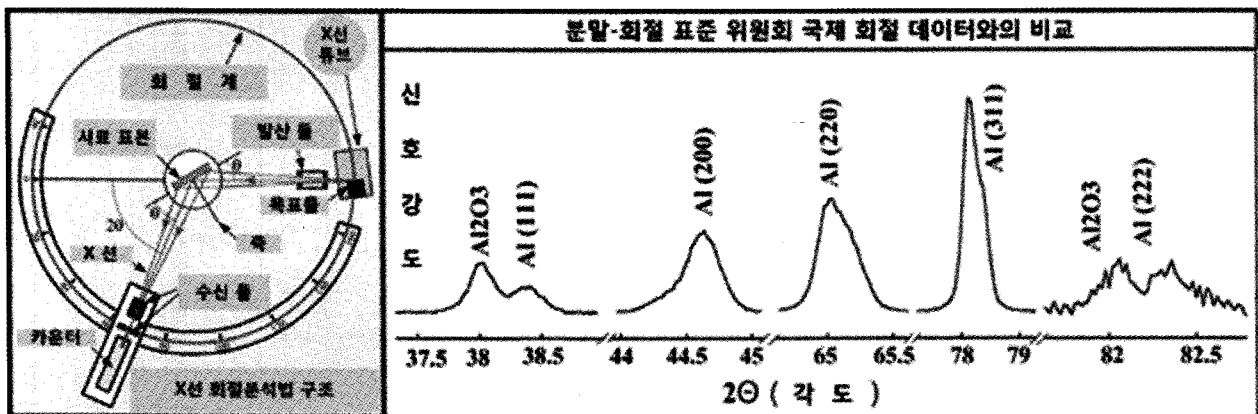


그림 4 X선 회절법의 실험도와 최종산화물 Al₂O₃ 검출(Kim & Yoh, JAP, 109, 093510, 2011)

이루어진 전체 화학 반응이 발생한다. 최종 반응물은 Al_2O_3 로서 알루미늄 판 표면에 고체 상태로 존재하게 된다. 따라서 최종 반응물인 Al_2O_3 를 XRD를 통해 검출함으로써 고출력 레이저를 통한 공기 중에서 알루미늄의 마이크로 점화가 일어났음을 검증할 수 있다(그림 4). 그림의 선들은 알루미늄 판의 측정된 XRD 결과를 분말회절표준위원회 국제회절데이터(Joint Committee on Powder Diffraction Standard)와 비교하여 보여주고 있다.

맺음말

이 글에서 shadowgraph를 통한 속도 분석과 XRD를 통한 최종 화학 반응물 측정을 통해 공기 중에서 레이저의 excitation에 의해 만들어진 알루미늄의 마이크로 점화현상에 대하여 소개하였으며, 공기 중에 미세한 입자 형태가 아닌 덩어리 형태의 금속 샘플을 나노초 고에너지 레이저를 통해 점화·연소시킬 수 있다는 새로운 가능성을 제시하였다.



기계 용어해설

단접관(Welded Pipe)

띠강 또는 강관을 둥글게 굽히거나 관상으로 만든 후 이를 맞대거나 포갠 양 가장자리를 달구어 압력을 가하여 접합한 관

빈의 변위법칙(Wien's Displacement Law)

흑체에서 방사되는 전자파 중에서 가장 에너지 밀도가 강한 것의 파장은 흑체의 절대온도에 반비례한다는 법칙.

단류기관(單流機關; Uni-flow Engine)

실린더 하부의 흡기구에서 새 혼합기를 흡입하고, 실린더 상부의 배기구로 연소 가스를 배출하는 형식의 2사이클 기관의 한 형식.

유니플로 소기(Uni-flow Scavenging)

소기와 배기가 모두 같은 방향으로 흐를 수 있도록 실린더의 위쪽과 아래쪽 끝에 배기구와 소기구가 있는 2행정기관의 소기 방법의 일종.

유니언 멜트 용접(Union Melt Welding)

2개의 모재접합부에 입상의 용제, 즉 플럭스를 놓고 그 속에서 용접봉과 모재 사이에 아크를 발생시켜 그 열로 용접하는 방법.

작업연구(Motion and Time Study)

사람의 동작, 도구와 기계 및 재료 등을 가장 합리적으로 결합하여 가장 효율적인 작업방법을 연구하고 표준 작업시간을 설정하는 것.

동작연구(Motion Study)

작업연구의 일부분으로, 일정 작업 중에 일어나는 모든 동작을 조사, 연구하여 작업의 가장 능률적인 방법을 연구하는 것

모넬 합금(Monel Metal)

니켈 64~69%, 구리 26~32%를 주성분으로 하고 철, 망간을 미량으로 함유하며, 염색기, 화학기계, 터빈 날개 등에 쓰이는 내산합금의 일종.

모터 그레이더(Motor Grader)

스캐리파이어와 원형가구에 부착한 브레이드로 자갈길의 유지보수, 도로신설, 측구굴삭 등의 작업을 하는 자주식 그레이더.

모터 사이렌(Motor Siren)

전동기축에 고정된 날개차 주위에 작은 틈새를 두고 많은 구멍이 뚫린 원통형 케이스를 설치하여 이 구멍에서 뚫기는 바람의 진동으로 음향을 발생하는 경보장치.