

표면화학 반응을 통한 Laser-Ablated 알루미늄의 Detonation 현상 연구

김 창 환* · 여 재 익**

* 서울대학교 기계항공공학부

Detonation Initiation via Surface Chemical Reaction of Laser-Ablated Aluminum Sample

Chang-hwan Kim* and Jai-ick Yoh**

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received September 1, 2011 ; Revised October 20, 2011 ; Accepted October 21, 2011)

Key Words: Laser Ablation(레이저 삭마), Detonation(테토네이션), Powder Explosion(분진 폭발), X-Ray Diffraction (X선 회절분석), High Irradiance Condition(고 복사조도 환경)

초록: 본 논문에서는 공기 중에서 높은 레이저 복사 조도에 따른 효과에 의해 발생하는 금속 플라즈마의 발달 과정에 대하여 레이저 펄스가 끝나는 이후로 섀도우그래프(Shadowgraph) 가시화 방법을 이용하여 현상을 연구하였다. 따라서 레이저에 의한 테토네이션의 발생과 이를 일으키는 연소 과정 대한 연구가 진행되었다. 본 논문의 가장 중요한 점들은 높은 레이저 에너지에 의해 삭마 된 기체 상태의 알루미늄과 공기로부터의 산소와의 화학 반응의 진행을 관측했을 뿐만 아니라, 화학 반응 최종 산화물을 X선 회절 분석법(X-Ray Diffraction)을 통해 관측한 것이다. 그리고 레이저를 통해 유도된 화학적 반응 파와 공기 중에서의 알루미늄 분진 폭발의 테토네이션과의 양적인 평가를 유도하였다. 이러한 연구는 덩어리 상태의 금속 샘플에서 공기 중의 산소를 이용하여 테토네이션을 발생시키는 새로운 방법을 제시할 것으로 여겨진다.

Abstract: We explore the evolution of metal plasma generated by high laser irradiances and its effect on the surrounding air by using shadowgraph images after laser pulse termination and X-ray diffraction (XRD) of aluminum plasma ablated by a high-power laser pulse (>1000 mJ/pulse) and oxygen from air. Hence, the formation of laser-supported detonation and combustion processes has been investigated. The essence of this paper is in observing the initiation of chemical reaction between the ablated aluminum plasma and oxygen from air by the high-power laser pulse (>1000 mJ/pulse) and in conducting a quantitative comparison of the chemically reactive laser-initiated waves with the classical detonation of an exploding aluminum (dust) cloud in air. The findings in this work may lead to a new method of initiating detonation from a metal sample in its bulk form without any need to mix nanoparticles with oxygen for initiation.

1. 서 론

다양한 산업 분야에서 레이저 삭마(Laser ablation)현상을 용접, 가공, 그리고 처리 공정에 사용하고 있다. 특히 항공 우주분야에서는 단순한 물질 처리로써가 아니라 화학 연료를 사용하지 않는 새로운 형태의 추진 방식인 레이저 추진과 극 환경 하에서 미지 물질의 특성을 파악하는 기술인 레이저 분광법(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)에서 활발하게 응용되어지고

있으며, 이는 많은 레이저 처리 과정의 주요한 메커니즘이다.^(1,2) 레이저에 의한 고체 물질의 삭마에 있어서 집중된 레이저 빔의 크기, 파장, 펄스 주기, 그리고 복사조도가 큰 영향을 미치므로 세심한 실험 진행을 필요로 한다. 이 실험에서 중요한 요인은 주변 환경인데, 그 이유는 공기 중에서의 레이저 삭마 과정으로 인해 강한 레이저 파(Laser supported wave)가 발생하기 때문이다.⁽³⁾

중간 정도의 복사조도 영역($10^8 \sim 10^{11}$ W/cm²)에서의 레이저 연소(Laser-Supported Combustion, LSC)파와 레이저 테토네이션(Laser-Supported Detonation, LSD)과의

* Corresponding Author, jjyoh@snu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

연구는 1960년대에 플라즈마의 생성을 포함하는 레이저 빔과 물질 상호작용에 의한 복잡한 비선형 폭발 현상을 연구하기 위하여 Ramsden과 Savic,⁽⁴⁾ 그리고 Raizer⁽⁵⁾로부터 시작하여 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다. 최근에는 레이저 데토네이션과의 종결과 레이저 연소파로의 천이현상이 발생하는 조건을 찾는 연구가 행해지고 있다.⁽⁶⁾ 레이저 에너지에 의해 금속의 표면이 증기화, 이온화되며, 급격하게 팽창하는 매우 뜨겁고 짙은 플라즈마 층이 형성되게 된다. 이 플라즈마 층이 레이저 펄스 후반부를 흡수하게 되고, 효과적으로 금속 표면으로 들어오는 빔을 막게 되는 것이다. 따라서 금속 표면에서 레이저 빔 방향으로 전파되는 일련의 파가 발생되게 된다. 그리고 레이저 펄스가 끝난 이후에는, 그들의 에너지를 주변 기체로 분산시키면서 계속해서 전파되게 되는 것이다.

레이저에 의해 발생된 파를 고전 데토네이션 현상과 연결시키기 위하여, 알루미늄 분진과 공기의 데토네이션 현상에 대한 이해가 필요하다. 공기 중에서 폭발 분진의 데토네이션 발생에 대하여, Zhang과 Gerrad는 공기 중에서 퍼져나가는 알루미늄 분진의 데토네이션 발생 가능성을 금속 분진의 기체유동에서의 폭발 한계에 대한 실험을 통해 연구 하였다.⁽⁷⁾ 비록 알루미늄 분진의 데토네이션과 레이저에 의해 발생된 표면 화학반응은 데토네이션 현상이라는 공통점을 가지고 있지만, 그 시작은 같지 않다. Tulis⁽⁸⁾와 Zhang⁽⁹⁾의 연구를 통해, Chapman-Juguet (CJ) 한계를 분석적으로 확인할 수 있으며, 레이저에 의해 시작된 데토네이션 상태와 비교할 수 있다. 실험에서 알루미늄에 집중된 에너지가 1000mJ 이상일 때, 데토네이션 파를 관측할 수 있다. 높은 레이저 에너지 영역에서의 실험적 데이터(속도, 압력비)는 알루미늄 분진의 데토네이션 현상과 일치하는 값을 가진다. 또한 알루미늄 샘플의 표면 화학 반응의 신뢰성을 향상시키기 위하여, X선 회절 분석법이 이용되었다. X선 회절 분석법의 기본 원리는 모든 물질의 결정 구조는 특정한 형태를 가진다는 것이다. 즉, 같은 물질은 항상 같은 형태를 나타내며, 혼합된 물질의 경우 각각의 물질이 독립적으로 고유한 형태를 보이게 된다. 따라서 단일 물질의 X선 회절 형태는 각 물질의 지문과 같다고 할 수 있다. 이러한 특징 때문에, 분말 회절

분석법은 다결정의 상을 가진 물질의 특징 분석이나 동정(identification) 연구에 주로 사용되고 있다. 현재에는 약 50,000개의 무기질과 25,000개의 단일 유기체, 다결정 상변화에 대한, 회절 형태가 수집되고 있으며 표준 지표로 저장되고 있다. 따라서 다중 상변화 과정을 거치는 물질에 대한 동정이나 금속 물질의 산화 과정에 대한 연구에 X선 회절 분석법이 활발히 이용되고 있다.⁽¹⁰⁻¹³⁾

본 논문에서는 공기 중에서 높은 레이저 조사($\sim 10^{12} \text{W/cm}^2$)에 의해 발생하는 금속 플라즈마의 발달 과정과 그에 따른 효과를 레이저 펄스가 끝난 이후부터 웨도우그래프 가시화 방법을 이용하여 현상을 이미지화 하였다. 중요한 점은 1000mJ 이상의 높은 에너지영역에서부터 레이저에 의해 발생된 알루미늄 플룸(plume)과 공기 중의 산소와의 화학 반응을 관측했다는 점이다. 그리고 고에너지 레이저를 통해 시작된 화학 반응의 결과로 발생한 데토네이션 현상과 고전 알루미늄 분진 데토네이션 현상과의 비교에 있다. 비교를 통해 비록 시작되는 방법은 다르지만, 현상은 같다는 것을 확인할 수 있었고, 고 에너지 레이저를 이용하여 공기 중에서 미세한 입자 형태가 아닌 덩어리 형태의 금속 샘플을 연소 및 점화시킬 수 있다는 잠재력을 제안 하였다.

2. Experimental setup

알루미늄 금속에 레이저 삭마를 통한 데토네이션과 가시화를 위한 실험 개요도가 Fig. 1에 나타나 있다. 알루미늄 표적의 삭마를 위하여 1064nm 파장에서 10 Hz 펄스와 7 ns 지속시간을 가진 Q-switched Nd:YAG 레이저(Continuum Powerlite plus II, 최대 강도 3000mJ/pulse)가 이용되었다. 매번 안정된 레이저 에너지를 사용하기 위하여, 레이저 빔을 사용하기 전에 플래시램프를 충분히 가열시켰다. 빔의 에너지는 플래시램프 전압 조절을 통해 변화시켰으며 실험에서는 최소 40mJ에서 최대 2500 mJ의 레이저 에너지가 이용되었다. 빔은 초점 거리가 100mm인 볼록 렌즈에 의해 모아졌으며, 10 mm × 10 mm × 1 mm 알루미늄 표적이 같은 지점에 고정 되었다.

532nm의 파장과 6ns의 펄스 지속시간을 가진 다른 Nd:YAG 레이저(Continuum Minilite)가 웨도우그래프에 필요한 광원으로 사용되어졌다. 알루미늄 표적과 평행하고 삭마 레이저와 수직인 이

레이저 빔은 삭마 레이저보다 몇 나노초 후에 알루미늄 표적에 도달하게 된다. 볼록렌즈와 오목렌즈를 지나면서 빔은 알루미늄 표적이 위치한 시험 지점에서 충분히 일직선화 되며, 빔은 볼록렌즈를 통해 CCD카메라 앞에서 다시 집중시켜졌다.

펄스 발생기(565-8CG, 100 MHz and 500 ps delay time)는 삭마 레이저와 가시화 레이저 사이의 동조화에 이용된다. 이는 두 개의 레이저가 펄스 발생기에 의해 시작되고 작동된다고 할 수 있다. 또한 정확한 실험값을 얻기 위해 오실로스코프(Tektronix TDS-2014)와 포토다이오드가 사용되었다.

Rigaku(D/MAX 2500H) X선 회절분석기가 표면 화학반응에 의한 상변화를 측정하기 위해 사용되었다. 분말상태와 고체상태의 시편이 모두 이용 가능한 X선 회절분석 실험이므로, 본 실험에서는 웨도우그래프에서 이용되었던 레이저에 의

해 삭마된 알루미늄 샘플이 이용되었으며, 최대 출력(40kV, 100mA)으로 실험이 반복되었다.

3. 결과 및 토의

Figure 2는 공기에서의 레이저에 의해 유도된 알루미늄의 플라즈마를 다양한 에너지의 삭마 레이저와 가시화 레이저 사이의 시간 간격에 의해 얻어진 웨도우그래프를 통해 보여주고 있다. 본 실험에서의 CCD 카메라는 단일 촬영 모드로 사용되었기 때문에, 각각의 이미지는 매번 다른 삭마상태로부터 얻어졌다. 그럼에도 불구하고, 같은 실험 조건에서 세 번 이상 반복되어 얻어진 이미지들은 높은 현상 재현성을 나타내고 있다. 충격파와 플라즈마 앞부분은 공기와 완전히 다른 전자 밀도 때문에 확연히 다르게 표시되는 것을 알 수 있다.

낮은 에너지(40~340mJ)와 높은 에너지(1000-2400mJ)영역에서의 이미지들은 충격파 끝부분에서 축 방향으로의 외부 충격파(Spherical Shock Wave), 이온화 앞면(Ionization Front)와 열파(Heat Wave)등 몇몇의 공통된 현상을 보여준다. 하지만 많은 차이점 또한 존재한다. 예를 들어, 충격파(어두운 줄무늬)와 이온화 앞면(밝은 줄무늬)은 매우 다르다. 그리고 낮은 에너지 경우에, 충격파가 각각 다른 에너지에 대해 매우 떨어져 있음을 확인할 수 있으나, 높은 에너지 경우에는 1500mJ 이후에는 거의 비슷한 것을 알 수 있다. Fig. 3은 에너지 1500mJ - 150ns의 웨도우그래프이다. 그림을 통해 구조를 더 세밀하게 확인할 수 있다. 처음 흡수된 레이저 에너지에 의해 외부 충격파가 발생되고, 알루미늄 플룸과 여기화 및 이온화된 산소의 반응을 통해 데토네이션파가 발생된다. 그 뒤를 플라즈마 플룸 표면과 내부 충격파가 뒤따르게 되는 것이다.

높은 에너지 영역의 경우 또한 상 폭발(phase explosion)로부터의 많은 양의 삭마 물질(ablated material)이 결과적으로 발생된다. 낮은 에너지 영역에서는 볼 수 없었던 이 플룸을 높은 에너지에서는 확인할 수 있다. 이는 또한 내부에서 전파되는 충격파의 가시성을 강화시킨다. 강조되어야 하는 부분은 플룸은 충격파가 지나간 아주 작은 거리만큼만 전파된다는 것이다. 낮은 에너지 영역에서는 알루미늄 샘플을 완전히 삭마시키기에 에너지가 부족하므로 충격파의 속도는 레이저 에

Table 1 Parameters of experiment

Laser energy (mJ)	40 - 2500
Delay time (ns)	0 - 500
Irradiation (W/cm^2)	$10^{11} - 10^{12}$
Pressure (atm)	1
Background gas	air

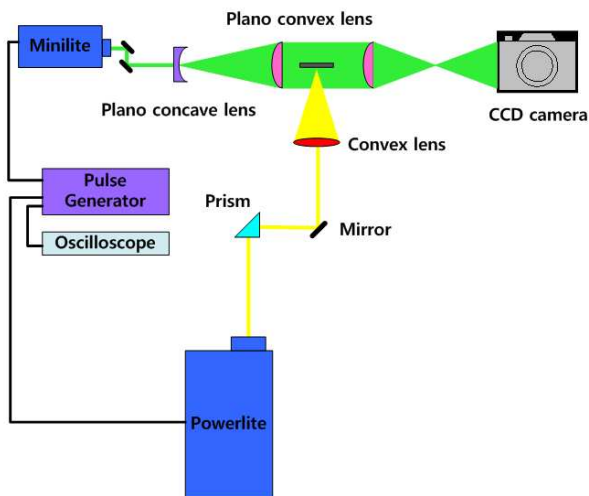


Fig. 1 Schematic of the standard shadowgraph imaging system

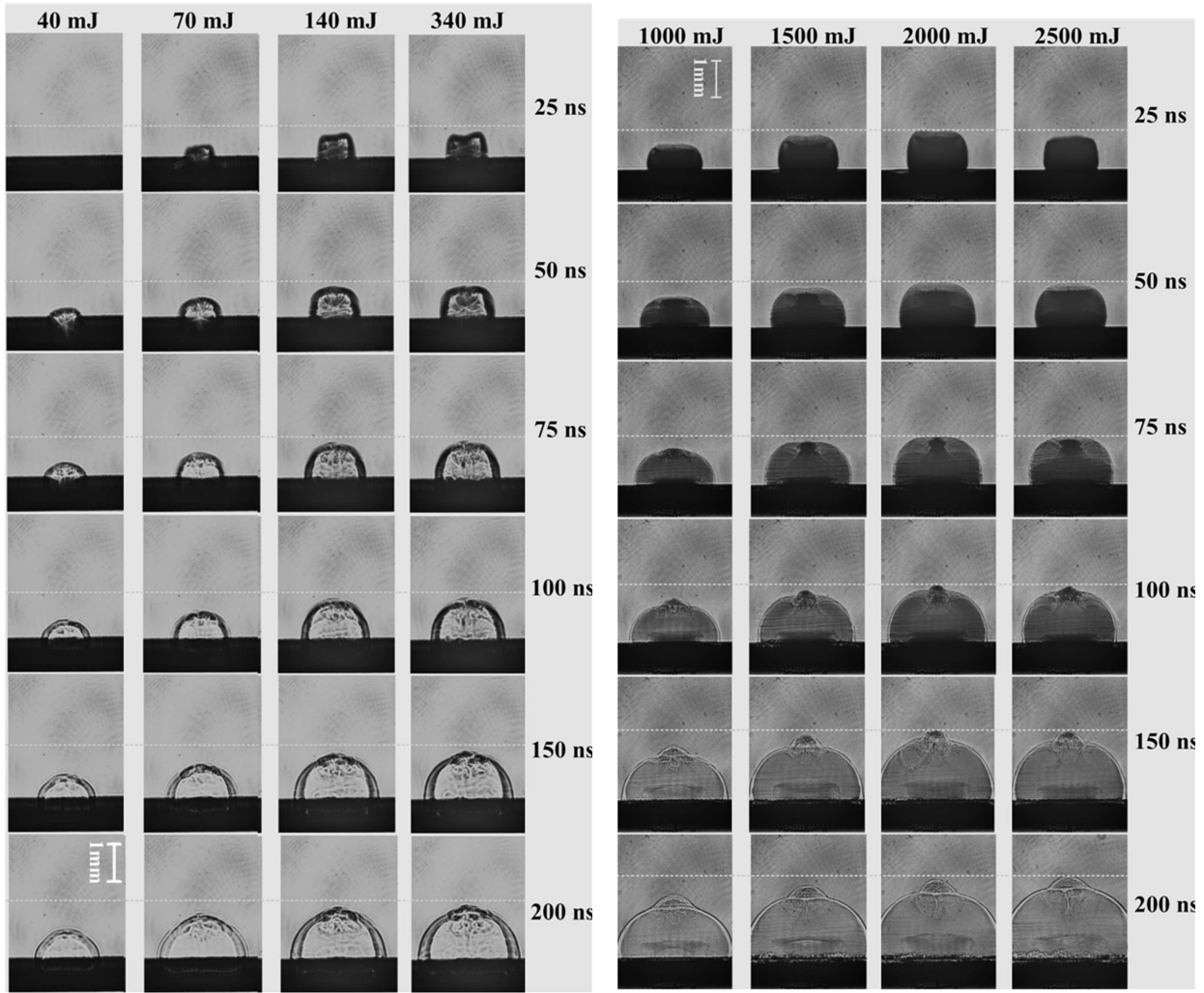


Fig. 2 Shadowgraph images at increasing delay times in 1 atm over an aluminum target

너지가 올라갈수록 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 레이저 에너지가 1000mJ 이상이 되면, 충격파의 속도가 계속적으로 증가하지 않고 충격파 끝 쪽에서 데토네이션파가 발생하는 것을 볼 수 있다. 레이저 에너지 1500mJ 이상부터는, 최대 속도 또는 CJ 데토네이션 속도는 일정하게 유지된다는 것을 Fig. 2를 통해 알 수 있다. 이는 알루미늄과 공기의 데토네이션에서 CJ 데토네이션 속도는 실험 환경의 영향을 받지 않는 물질 고유의 특징이기 때문이다. 다시 말해, 높은 이온화 상태와 압축된 알루미늄 증기(vapor)를 가짐으로써, 산소의 결합에너지를 깨드리며 화학 반응을 시작하게 되는 것이다. 그리고 낮은 에너지 영역에서의 쉘도우그래프에서 충격파 앞쪽에 열파(Heat wave)를 확인할 수 있다. 이 열파는 충격파와 구분되게 앞쪽으로 치고 나가지 못하며, 200ns 이후

의 쉘도우그래프에서도 추가적인 파가 아닌 하나의 충격파로 계속해서 전파된다는 사실을 확인할 수 있었습니다. 하지만 높은 에너지 영역의 데토네이션파의 경우 70ns에서부터 충격파의 진행 속도보다 빠른 값을 가지며 앞으로 치고 나오며, 200ns 이후의 쉘도우그래프에서 충격파와 함께 일정 시간 전파 후에 충격파와 합쳐지는 것을 확인하였습니다.

데토네이션 파의 속도는 쉘도우그래프의 해상도와 실제 길이의 비를 이용하여 구하였으며, 이 속도는 Rankine-Hugoniot 조건을 이용하여 압력을 구하는데 이용되어진다.⁽¹⁴⁾

$$P_s = \frac{\rho_o V_s^2}{\gamma_{metal} + 1} \quad (1)$$

여기서 P_s 는 데토네이션 파의 압력, V_s 는 쉘도우

그래프를 통해 측정된 데토네이션 파의 속도, γ_{metal} (5/3)는 알루미늄의 비열비, 그리고 ρ_s 는 주변 기체(ambient gas)의 밀도이다. 처음 25 ns 시간대에서, 70mJ에서는 플라즈마의 속도가 약 15,000 m/s이며, 2500mJ에서는 약 36,000 m/s이다. 이런 매우 높은 속도들은 시간에 지남에 따라 급격하게 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이중선 방법(Two-line method)로 플라즈마의 온도를 구할 수 있는 평행 분광 측정법(parallel spectroscopic measurement)을 통해, 유사한 복사조도에서 온도를 구해 본 결과 약 10^4K 가 발생된다는 사실을 알 수 있었다.⁽¹⁴⁾ 이중선 방법은 볼츠만 분포(Boltzmann distribution)부터 유도되며, 분광으로부터 얻어진 서로 다른 두 신호의 세기를 이용한다. 알루미늄의 이온화 에너지는 공기와 비교해 거의 절반이므로, 대부분의 레이저 에너지는 공기가 아니라 알루미늄의 이온화에 사용되어진다. 따라서 플라즈마를 구성하는 주성분은 알루미늄의 원자와 이온이 되는 것이다. 시간이 지남에 따라, 플라즈마의 에너지는 공기 중으로 전파되는 충격파에 전달된다. 이 에너지가 여기(exited)된 알루미늄 원자와 바로 화학 반응에 들어갈 수 있는 질소 및 산소 원자와 분자를 만드는 곳에 사용되는 것이다.

앞서 설명된 바와 같이, 데토네이션 파의 속도는 속도우그래프를 통해 구해졌다. 속도와 함께 시간에 따른 전파 거리(propagation radius)를 얻을 수 있었다(Fig. 4). Fig. 4에서 각각의 데이터는 Dewy 피팅 방정식(fitting equation)을 이용하여 피팅 되었다.⁽¹⁵⁾ 그래프에서 알 수 있듯이, 높은 복사조도 영역(1000mJ 이상)에서만 데토네이션 현상이 발생한다. 레이저에 의한 에너지가 알루미늄에 전달된 후, 70ns에서 데토네이션이 발생하는

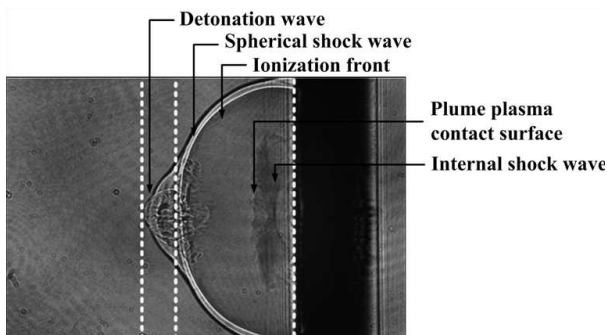


Fig. 3 The specific structure of LS wave

것을 확인하였다. 또한 데토네이션은 200ns까 지 발달하다 다시 충격파로 돌아간다는 사실을 알 수 있는데, 이는 한 번의 레이저 펄스로 발생되는 알루미늄 플룸(연료)의 양과 공기 중의 여기된 산소(산화제)의 양이 제한적이기 때문이다.

높은 복사조도 영역($\sim 10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$)에서 발생하는 데토네이션 파의 속도는 $1591(\pm 90)$, $1672(\pm 25)$, $1714(\pm 90)$, $1717(\pm 119)\text{m/s}$ 로 측정 되었다(Fig. 5). 속도 측정과 동시에 평균, 표준 편차, 평균 표준 편차를 계산하여 실험값의 오차를 계산하였으며, 실험은 각 조건에 대해 5회 반복 되었다. 본 실험에서 사용된 카메라의 1 픽셀은 $5\ \mu\text{m}$ 에 해당하므로, 발생하는 오차의 범위는 매우 좁다는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험을 통해 구해진 속도는 알루미늄 분진과 산소의 반응을 통해 발생하는 데토네이션 속도범위에 속한다는 사실을 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 가장 큰 값을 가지는 C-J 데토네이션 속도는 1850m/s 이며, 가장 낮은 값은 약 1350 인 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험을 통해 구한 데토네이션 속도가 타당하다는 사실을 실험 데이터와의 비교를 통해 증명하였다. 이에 더하여 측정을 통해 얻은 데토네이션 파의 속도를 식 (1)에 대입하여 데토네이션 압력비를 구하였다.

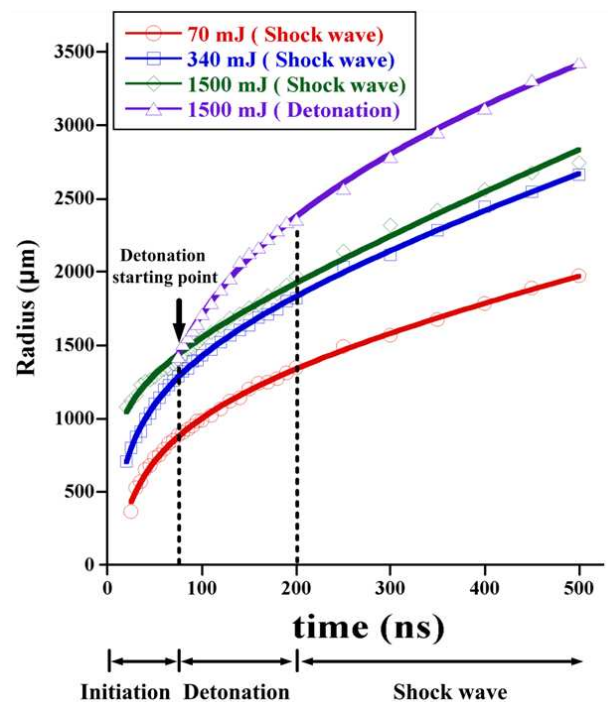


Fig. 4 Measured radius of propagation for different energy levels

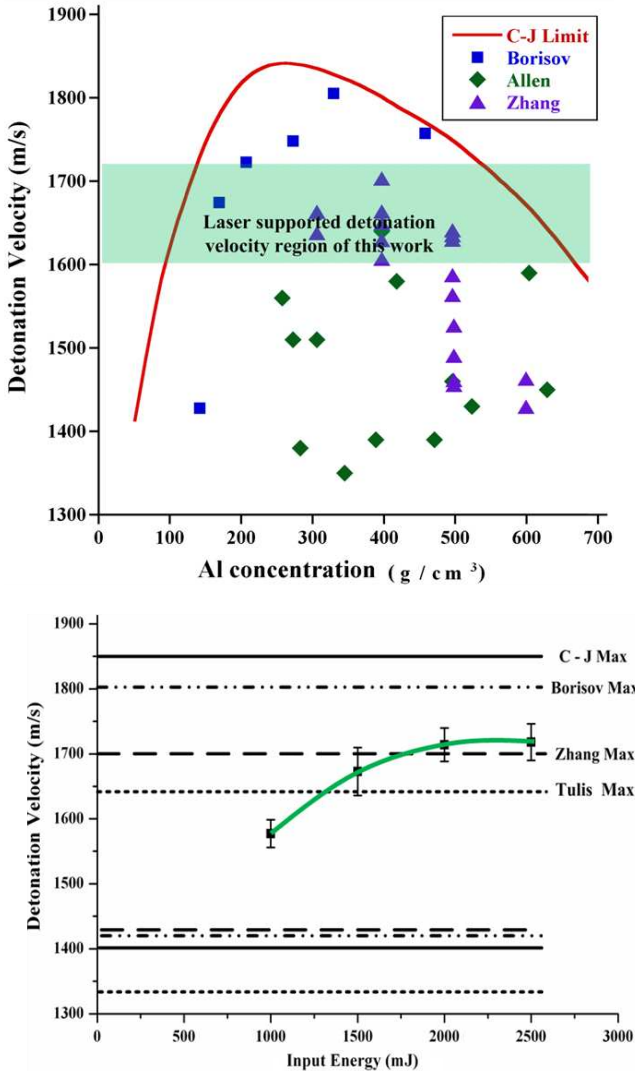


Fig. 5 Comparison between experimental detonation and quasi-detonation velocities from literature and the present measurements

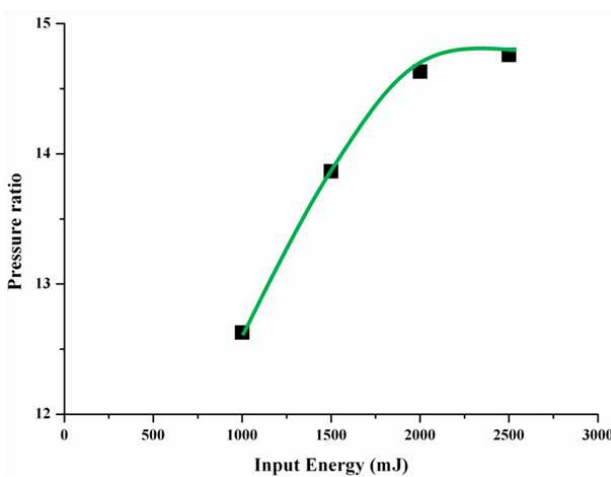
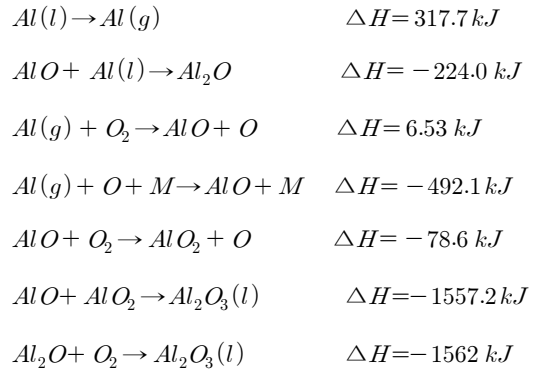


Fig. 6 Detonation pressure ratio of LS wave

압력비는 12.26(±2.47), 13.87(±0.71), 14.63(±2.65), 14.76(±3.53)로 Fig. 6에 나타나 있다. Zhang⁽⁹⁾의 데토네이션 실험 데이터에 따르면, 1 atm에서 p/p₀의 값은 최소 11에서 최대 24(stoichiometric state)까지 변한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 실험에서 구한 압력비의 값 또한 알루미늄과 산소의 데토네이션 압력비 값의 범위를 만족한다는 사실을 알 수 있다.



Formula. 1 Chemical reaction processes between aluminum and oxygen

위의 Formula. 1은 알루미늄 판에 높은 레이저 에너지가 유입 되었을 때 발생하는 알루미늄 플룸과 공기 중 산소와의 화학 반응식이다. 식에서 알 수 있듯이, 최종 반응물은로서 알루미늄 판 표면에 고체 상태로 존재하게 된다. 따라서 본 연구에서는 최종 반응물인 Al₂O₃를 X선 회절분석을 통해 검출함으로써, 알루미늄과 공기 중의 산소와의 화학 반응이 일어났음을 Fig. 7에서 증명하였다. 표면의 산화에 따른 산화 알루미늄의 검출이 예상되었지만, 레이저 조사를 하지 않은 알루미늄과 낮은 에너지를 조사한 알루미늄에서는 Al₂O₃가 검출되지 않았다. 그림의 선들은 알루미늄 판의 측정된 X선 회절분석 결과를 Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS)와 비교하여 보여주고 있다. 앞서 논의한 바와 같이, 측정된 Al₂O₃는 알루미늄 판 표면에서의 레이저와 산소의 화학반응이 발생하였다는 중요한 근거를 제시한다. Formula. 1에서 확인할 수 있듯이, 전체 화학반응은 크게 네 번의 가스 상태 반응과 알루미늄 판 표면에서의 AlO와 Al₂O에 의한 각 한 번의 이종(heterogeneous) 반응으로 이루어져 있다.⁽¹⁶⁾ 다시 말하면, Al₂O₃는 AlO와 Al₂O의 발생을 증명할 수 있는 화학 반응 최종물이라

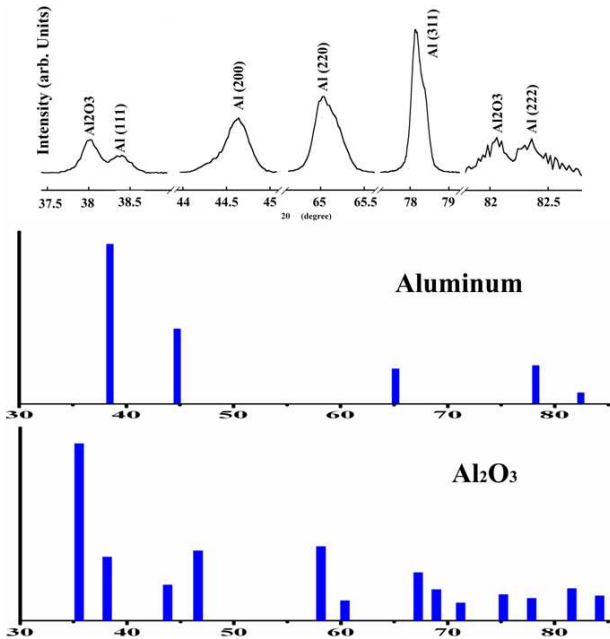


Fig. 7 Aluminum and oxide (Al_2O_3) standards for X-ray Diffraction (XRD) analysis of ablated sample at 1500mJ of laser energy

는 것이다. 정리하면, 본 실험에서 쉘로우그래프를 통한 속도 분석과 X선 회절분석을 통한 화학 반응물 측정을 통해 공기 중에서 레이저의 에너지에 의해 만들어진 알루미늄 플룸의 데토네이션 현상이 발생되었음을 증명하였다.

4. 결론

쉘로우그래프와 X선 회절분석의 실험적 자료들이 기존의 알루미늄 분진과 공기 혼합물의 CJ 데토네이션과 높은 복사조도($\sim 10^{12} W/cm^2$)를 통한 공기 중에서의 알루미늄과 공기 데토네이션 현상과 일치한다는 것을 증명하고 있다. 따라서 본 연구는 알루미늄 판에서의 높은 복사조도 동안 레이저에 의한 데토네이션 발생 시작을 보여 주고 있다. 쉘로우그래프 가시화는 CJ 충격파를 뒤따르는 von Neumann peak으로 구성된 데토네이션 파의 구조를 보여 주었다. 그리고 낮은 레이저 에너지 영역(40 - 340 mJ)에서는 레이저에 발생한 파의 속도가 레이저 복사조도가 증가하면 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 대부분의 레이저 에너지가 알루미늄에 흡수되며, 그 결과로 증기화 된 질량(vaporized mass)이 증가하게 되는 것이다. 하지만 높은 레이저 에너지 영역(1000 - 2500 mJ)의 경우에는 1500mJ 이상부터는 LS파의 속도가 일정해지는데, 이것은 알루미늄

분진과 공기의 데토네이션 속도와 압력과 유사한 속도와 압력을 가진 데토네이션파가 발생하기 때문이다. 또한 X선 회절 분석법을 통해 알루미늄과 산소의 최종 반응물인 Al_2O_3 를 관측을 통해 레이저를 이용한 아주 짧은 나노초 시간 동안 데토네이션이 발생을 증명하였다. 정리하면, 파우더 형태가 아닌 덩어리 상태에서의 추가적인 산화제를 필요로 하지 않는 폭발성 금속 물질의 점화 과정이 본 연구에서 논의 되었다.

후 기

본 연구는 BK21과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT), 한국연구재단 우주핵심기술개발사업(2009~2013), 국토해양부의 「하늘 프로젝트」의 지원을 받아 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ageeva, V. P., Barchukova, A. I., Bunkina, F. V., Konova, V. I., Korobeinikova, B. V. Putjatina, V. P. and Hudjakova, V. M., 1980, "Experimental and Theoretical Modeling of Laser Propulsion," *Acta Astronautica*, Vol. 7, Issue 1, pp. 79~90.
- (2) Sabsabi, M. and Cielo, P., 1995, "Quantitative Analysis of Aluminum Alloys by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Plasma Characterization," *Applied Spectroscopy*, Vol. 49, Issue 4, pp. 499~507
- (3) Root, R.G., 1989, "Modeling of Post Breakdown Phenomena. Laser-Induced Plasmas and Applications," *Marcel-Dekker.*, pp. 69~103
- (4) Ramsden, S. A. and Savic, P., 1964, "A Radiative Detonation Model for the Development of a Laser-Induced Spark in Air," *Nature, Lond.* 203, pp. 1217~1219
- (5) Raizer, Y. P., 1964, "Heating of a Gas by a Powerful Light Pulse," *Soviet Physics JETP* Vol. 21, pp. 1009
- (6) Ushio, M., Komurasaki, K., Kawamura, K. and Arakawa, Y., 2008, "Effect of Laser Supported Detonation Wave Confinement on Termination Conditions," Vol. 18, No. 1, pp. 35~39
- (7) Zhang, F., Gerrard, K. and Ripley, RC., 2009, "Reaction Mechanism of Aluminum-Particle-Air Detonation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.

- 25, No. 4, pp. 845~858
- (8) Tulis, A. J. and Selman, J. R., 1982, "Detonation Tube Studies of Aluminum Particles Dispersed in Air," *Proceedings of the 19th International Symposium on Combustion, Combustion Inst.* pp. 655~663
- (9) Zhang, F, Murray, S. B. and Gerrard, K., 2006, "Aluminum Particles-air Detonation at Elevated Pressures," *Shock Waves*, Vol. 15, No. 5, pp. 313~324
- (10) Xue W., Deng, Z., Lai, Y. and Chen, R., 1998, "Analysis of Phase Distribution for Ceramic Coatings Formed by Microarc Oxidation on Aluminum Alloy," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 81, Issue 5, pp. 1365~1367
- (11) Das, R. N., Bandyopadhyay, A. and Bose, S., 2001, "Nanocrystalline α -Al₂O₃ Using Sucrose," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 84, Issue 10, pp. 2421~2423
- (12) Ruffell, A. and Wiltshire, P., 2004, "Conjunctive use of Quantitative and Qualitative X-Ray Diffraction Analysis of Soils and Rocks for Forensic Analysis," *Forensic Science International*, Vol. 145, Issue 1, pp. 13~23
- (13) Ortiz, A. L. and Shaw, L., 2004, "X-Ray Diffraction Analysis of a Severely Plastically Deformed Aluminum Alloy," *Acta Materialia*, Vol. 52, Issue 8, pp. 2185~2197
- (14) Radziemski, L. J. and Cremers, D. A., 1989, "Laser-Induced Plasmas and Applications," *Marcel-Dekker*, New York, pp. 23-42, 69~103
- (15) Kleine, H., Deway, J. M., Ohashi, K. Mizukaki, T. and Takayama, K., 2003, "Studies of the TNT Equivalence of Silver Azide Charges," *Shock Waves*, Vol.13, No. 2, pp. 123~138
- (16) Piehler, T. N., DeLucia, F. C., Jr., Munson, C. A., Homan, B. E., Miziolek, A. W. and McNesby, K. L., 2005, "Temporal Evolution of the Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Spectrum of Aluminum Metal in Different Bath Gases," *Applied Optics*, Vol. 44, Issue 18, pp. 3654~3660