

EDB에 의해 부양된 알루미늄과 마그네슘 단일 입자의 점화 및 연소 특성 비교 연구

임지환* · 윤웅섭*

Comparison Study on Burning and Ignition Characteristics for Single Aluminum and Magnesium Particles

Jihwan Lim* · Woongsup Yoon*

ABSTRACT

The ignition and the burning characteristics of aluminum and magnesium particles (30-110 μm in diameter) isolated due to electrodynamic levitation were experimentally investigated. The burning time, the ignition delay time, the flame temperature, and the flame diameter were measured. The thermal radiation intensity was measured using the photomultiplier tube and the combustion history was monitored by high-speed cinematography. Two-wavelength pyrometry measured the temperature of the burning particles. The burning times of aluminum particles were measured approximately 5 to 8 times longer than those of magnesium particles. Exponents of D^n -law, for the burning rate of magnesium and aluminum particles of diameters less than 110 μm , are found to be 0.6 and 1.5, respectively. The instant of aluminum ignition is clearly distinguished with the ignition delay time little less than 10 ms, however the burning history of magnesium particle exhibits no distinct instant of the ignition. The ignition delay time of magnesium particle (less than 110 μm) were approximately shown in the range from 50 to 200 ns. The flame temperatures of single metal particles are lower than the boiling point of the oxide. The nondimensional flame diameters for magnesium are decreased with increasing of the diameter. The nondimensional flame diameters for aluminum are not changed significantly.

Key Words: aluminum combustion, magnesium combustion

1. 서 론

고체추진 로켓에서 금속은 추력 효율을 높이고 연소불안정성을 억제하기 위한 첨가제로써 사용되어 왔다. 그리고 최근에는 대추력을 요구

하는 수증발사체의 추진제, 화성 탐사체의 동력원 그리고 대체에너지로써의 가능성으로 관심을 받고 있다. 주목받는 금속으로는 쉽게 구할 수 있어 경제성이 높고, 다양한 산화제와 반응하며 탄화수소 계열 연료보다 방출 열량이 큰 알루미늄과 마그네슘이 있다[1]. 이들 금속은 연소 시 고체의 상변화, 표면에 잔존하는 산화물 그리고 초기 산화피막에 의한 효과 때문에 액적 연소

* 연세대학교 기계공학부
연락처, E-mail: Imjihwan.Lim@gmail.com

현상과는 달리 복잡하고 불규칙적이라는 공통점이 있다[1-2]. 그리고 알루미늄의 단위 질량당 연소에너지는 마그네슘의 것보다 크기 때문에 열량적 측면에서는 유리하지만 문헌상 보고된 점화 및 연소 메커니즘에 근거하여 보면 알루미늄의 경우 마그네슘 보다 점화성이 낮고 연소 유지도 쉽지 않기 때문에 적용성 측면에서는 불리한 차이점도 갖고 있다[2]. 이 금속들의 연료로서의 활용성을 직접 비교하기 위해서는 정량화된 비교 자료가 필요하지만 액적 연소에 비해 상대적으로 연구가 부족하고 산업적 응용이 가능한 시스템 기반의 연구보다 연소 메커니즘에 관련된 연구에 치중되어 있는 편이다. 또한 높은 용융점을 갖는 산화피막으로 피복된 금속의 점화가 어렵기 때문에, 고온 또는 고압 환경 같은 제한된 조건에서 연구가 수행되어 왔다. 따라서 다양한 환경에서의 선행연구 결과로부터의 직접 비교는 어려웠기 때문에 이 두 금속의 연소특성을 직접 비교한 자료는 아직까지 없다. 본 연구에서는 외부손실이 없는 동일한 실험 환경에서 알루미늄과 마그네슘의 대표적인 점화 및 연소 특성(연소시간, 점화온도, 화염온도, 화염크기)에 대해서 비교 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 금속입자

실험 금속 입자의 크기는 시스템 적용 가능성이 높은 30~110 μm 크기의 분말을 사용하였다. 또한 두 금속은 자연 산화된 상태이며, 알루미늄의 경우 순도는 99.84% 이고, 마그네슘의 순도는 99.6% 이다.

2.2 입자부양 방법 및 열복사에 의한 온도 측정 이론

입자를 부양시키기 위해서는 자기장, 전기장, 빛, 음향을 이용하는 방법들이 연구되어 왔고, 각각의 방법들은 부양시키고자 하는 물질의 물리적 특성에 따라 선택하게 된다. 이 중에서 금속입자를 대상으로 하는 본 연구에서는 가장 일반적으로 오랫동안 연구된 전기장을 이용한 방

법을 사용한다. 이 방법은 중력 반대방향으로 발생된 전기력으로 입자의 중력을 상쇄하여 공중에서 힘의 평형 상태를 유지하게 하는 원리를 이용한다[3].

본 연구에서는 공중에 부양된 마이크로미터 크기 입자의 온도를 측정하기 위해 비접촉식 방법으로 연소 시 방출되는 열복사를 이용한 two wavelength pyrometry를 이용하기로 한다 [4]. 입자에서 방사된 spectral blackbody emissive power distribution은 Planck's law를 따르며, Wien's law에 의해 단순화된 식을 바탕으로 빛의 강도의 비와 온도의 관계를 이용한다. 연소 중 방사되는 빛의 강도는 photomultiplier tube (PMT, H5784-20, Hamamatsu)를 사용하여 측정하였다. 그리고 금속과 연소 생성물에 의한 분광학적 간섭을 피하기 위해 알루미늄의 경우, 532 nm 와 780 nm, 마그네슘의 경우, 436 nm 와 640 nm 의 광학 필터를 사용하였다.

2.3 실험장치

금속입자 연소를 위한 실험 장치는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 입자부양을 위한 장치와 전기장 생성을 위한 신호발생기 및 증폭기, 금속입자 점화를 위한 열원으로 CO₂ 레이저, 연소가시화를 위한 초고속 카메라와 PMT 모듈, 그리고 실험 장치를 제어하고 데이터를 기록할 컴퓨터로 구성된다[5].

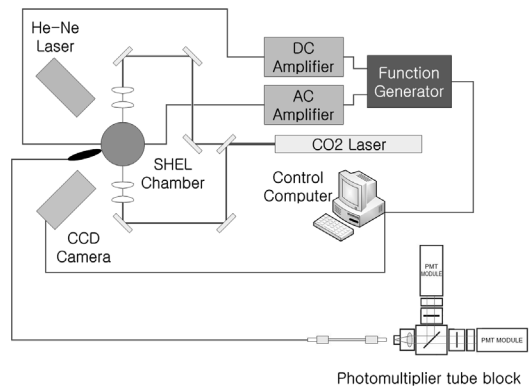


Fig. 1 Experimental Setup

3. 실험결과 및 분석

3.1 연소시간 (t_b) 비교

알루미늄과 마그네슘의 연소를 초고속 촬영 결과로 비교하면 동일한 크기임에도 불구하고, 마그네슘이 알루미늄보다 연소시간이 매우 짧고, 더 밝은 빛을 내면서 연소하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 연소 후반부, 입자 주변에서, 두 경우 모두 연기를 관측할 수 있었다. (Fig. 2)

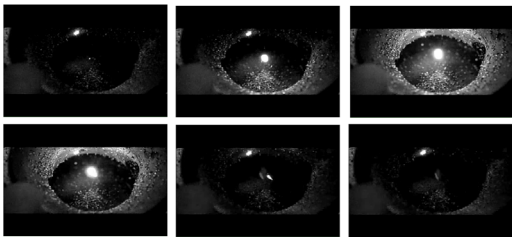
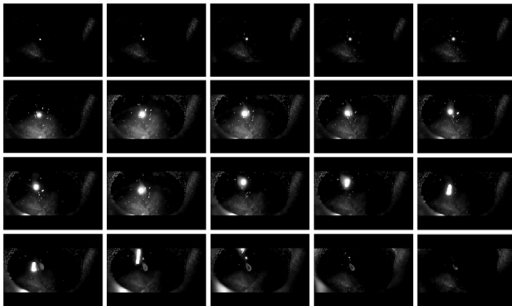


Fig. 2 Ignition and burning snapshots of single aluminum (upper) and magnesium (lower) particles in air

금속입자 직경에 따른 연소시간을 비교해보면 알루미늄이 마그네슘보다 약 5~8배 연소시간이 길게 측정되었다. (Fig. 3) 또한 연소율의 지수값은 알루미늄의 경우 약 1.5로 측정되었고, 이 값은 Beckstead가 정리한 결과와 유사하다[6]. 반면 Fig. 3 를 보면 마그네슘의 경우는 0.6 으로 측정되었으며, 이는 regression rate가 훨씬 크기 때문에 대상 입자 크기 범위 내에서는 알루미늄 경우와 달리 입자 크기의 영향에 둔감한 것으로 추정된다.

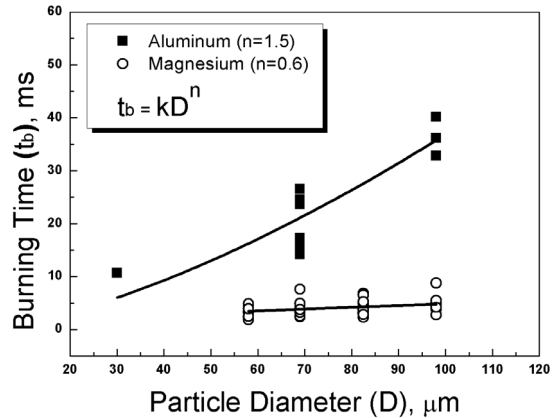


Fig. 3 Burning time of single aluminum and magnesium particle as function of the particle diameter and the calculated burning rate (D^n law) in air

3.2 점화 지연 시간 (t_i) 비교

알루미늄의 경우, 점화 시기는 입자 가열 후 방사된 열복사량이 급격하게 증가하는 변곡점을 점화로 보았다[5]. 하지만 이와 달리 마그네슘의 경우에는 열복사가 방출되자마자 복사량은 변곡점 없이 매우 급격하게 증가하였고 점화시기로 판단하기 위한 명확한 지점을 찾을 수 없었다. 따라서 본 연구에서 마그네슘의 경우, 첫 번째 열복사 측정값 이후로 정상 연소에 가까이 도달한 첫 번째 지점을 점화점으로 임의 가정하였다. Figure 4에서 보는 바와 같이 알루미늄은 입자의 크기에 따라 약 1~10 ms 의 점화 지연 시간을 갖는다. 하지만 마그네슘의 경우, 정상온도에 도달한 시간은 약 50~200 ns 로써, 점화 지연 시간은 이 범위보다 작은 범위 내에서 존재할 것으로 추정된다. 이처럼 두 금속의 점화 지연 시간이 크게 차이 (최소 5배에서 최대 200배까지)를 보여주고 있는 이유는 알루미늄과 마그네슘의 점화 메커니즘이 다르기 때문에 기인된 것으로 판단된다 [2].

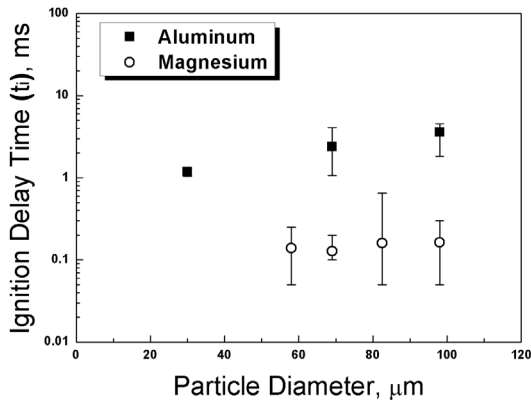


Fig. 4 Comparison of ignition time as a function of diameter for metal particle

3.3 화염온도 ($t_{e,f}$) 비교

금속이 연소될 때, 입자 주변 또는 표면에서 형성되는 산화물은 강력한 복사를 밖으로 방출한다. 또한 입자 표면에서도 2상 연소에 의한 복사가 방출된다. 따라서 금속과 주요 산화물에 의해 방출되는 주요 파장을 배제하여, 순수한 화염에 의한 온도만을 측정하도록 하였다[7-8].

Figure 5 를 보면 알루미늄의 화염온도는 산화알루미늄의 기화점보다 조금 작게 측정되었다. 이는 알루미늄 연소 이론에 의한 결과와 유사하다. (Fig. 5) 마그네슘의 경우, 본 연구에서 측정된 화염온도는 약 3074 ± 100 K 로써 단일화염온도(3473 K)에 근사하고 산화마그네슘 기화점(3873 K) 보다는 크게 낮았다. 이 결과의 타당성은 일반적으로 금속 연료의 화염온도가 산화물의 기화점 이하이고, 또한 단일화염온도는 산화물의 기화점보다 상당히 작은 것으로 충분히 설명 될 수 있다. (Fig. 6)

두 금속에 대한 화염온도 측정 결과에서 측정값은 약 ± 100 K 의 오차를 보였고, 큰 입자를 대상으로 실험한 Dreizin 등의 결과를 고려한다면 화염온도는 입자크기와 관계없이 화학 반응에 의해 결정된다고 볼 수 있다[8].

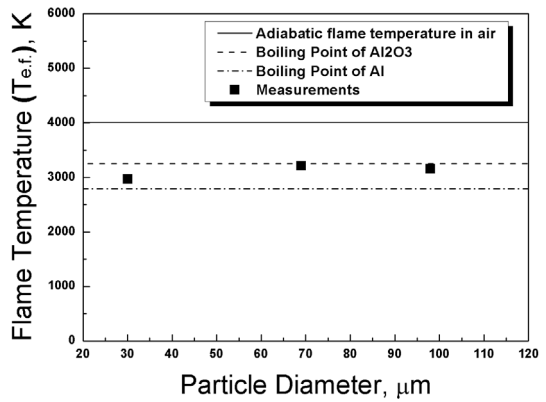


Fig. 5 Comparison with measured aluminum flame temperatures, the boiling point of the oxide, the boiling point of aluminum and the adiabatic flame temperature in air

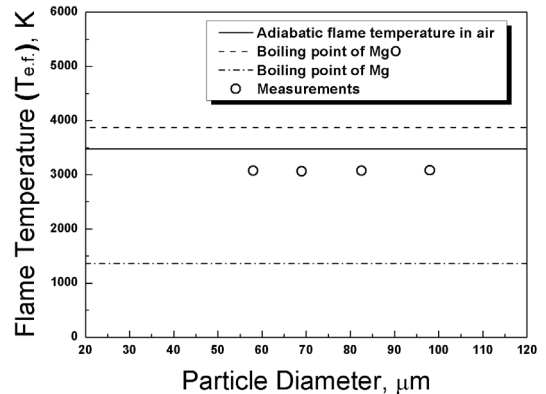


Fig. 6 Comparison with measured magnesium flame temperatures, the boiling point of the oxide, the boiling point of magnesium and the adiabatic flame temperature in air

3.4 화염 크기 비교

금속입자의 화염크기는 고속(600 fps)으로 촬영된 영상 자료를 분석하는 것으로 결정하였다. Figure 7 은 알루미늄 화염(좌)과 마그네슘 화염(우)의 모습이고 화염이 가장 커졌을 때를 금속 입자 직경으로 무차원화하여 비교하였다. 대부분의 경우에서 마그네슘의 휘도가 알루미늄의 휘도보다 크게 보였다. (Fig. 7)

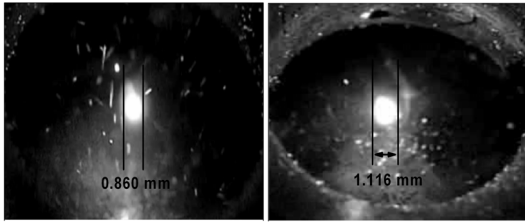


Fig. 7 Snapshots for Aluminum (left) and Magnesium (right) flame size at their maximum flame propagation

두 금속입자의 화염크기는 직경에 비해 약 10~20배 크게 측정되었다. Figure 8 에서 보듯이 작은 입자의 경우 마그네슘이 알루미늄보다 매우 큰 화염크기를 갖지만, 입경이 점점 커질수록 그 상대적 차이는 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 그리고 마그네슘의 경우, 실리콘 웨이퍼 표면에 강제 소화시킨 Dreizin 등의 결과와 함께 경향성을 비교하여 이 결과의 경향성을 입자가 큰 범위까지 연장 할 수 있었다[8]. 단, 이 비교는 Dreizin 등의 결과에서 보인 'white smoke cloud (산화마그네슘)'에서 화염이 존재한다는 전제와 그들 논문에서 보여준 자료를 이용한 추정으로부터 이루어진 판단이다. 반면 알루미늄의 화염크기는 입경의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

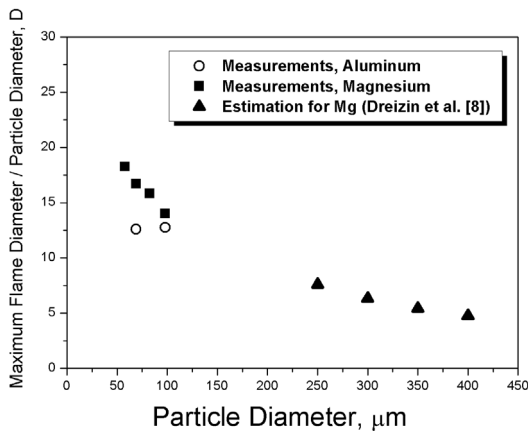


Fig. 8 The nondimensional flame diameters of single metal particles with increasing of the diameter in combustion

4. 결 론

본 연구에서는 실제 시스템에서 적용이 가능한 크기의 알루미늄과 마그네슘 단일 입자의 점화 및 연소특성을 정성적 및 정량적으로 비교하였다. 입자크기에 따른 마그네슘의 연소시간이 알루미늄의 연소시간보다 약 5~8 배 빠르고 연소율의 지수값은 알루미늄의 경우 약 1.5, 마그네슘의 경우 약 0.6 으로 측정되었다. 두 경우 모두 연소 말기에 연기를 관측 할 수 있었다. 알루미늄의 점화 지연 시간은 약 1~10 ms 로 측정되었고, 마그네슘의 것은 50~200 ns 범위안에서 존재 할 것으로 추정하였다. 알루미늄과 마그네슘의 화염온도는 3250 K, 3074 K 로 각각 측정되었다. 그리고 알루미늄은 산화알루미늄의 기화점에 근접하였고, 마그네슘은 산화마그네슘의 기화점보다 오히려 단일화염온도에 가깝게 측정되었다. 입자크기를 기준으로 무차원화 된 화염크기는 알루미늄의 경우, 입자 크기에 따라 큰 차이가 없었지만, 마그네슘의 경우에는 입자크기에 작아지는 것으로 추정하였다. 마그네슘의 입자크기에 따른 연소속도와 점화 지연 시간을 정량화하여 알루미늄의 것과 비교함에 따라 열량적으로 불리함에도 연소특성이 우월함을 증명하였다. 하지만 화염온도가 비슷한 알루미늄보다 상대적으로 휘도가 큰 화염을 만들어내어 시스템 적용시 복사에 의해 열적으로 취약 할 수도 있는 것을 간접적으로 예측할 수 있었다.

5. 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0023481)

참 고 문 헌

1. Brzustowski, T. A. and Glassman I., "Spectroscopic Investigation of Metal

- Combustion," *Heterogeneous Combustion*, Academic Press, New York, 1964, pp 41-74
2. H. Yang., "Combustion dynamics of high-energy-density metallic fuel : modeling and detailed parametric investigation on an isolated aluminum and magnesium particle burning," *Doctoral Thesis*, 2010
 3. E. James Davis and A. K. Ray, " Single Aerosol Particle Size and Mass Measurements Using an Electrodynamic Balance," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.75, 1980, pp.566-576
 4. V. Sarou-Kanian, J. C. Rifflet, F. Millot, E. Veron, T. Sauvage, and I. Gokalp, "On the Role of Carbon Dioxide in the Combustion of Aluminum Droplets," *Combustion Science and Technology*, Vol.177, 2005, pp.2299-2326
 5. J. Lim, H. Yang, and W. Yoon, "Burning and Ignition Characteristics of Single Aluminum and Magnesium Particle," *AIAA JPC*, 2010
 6. M.W. Beckstead, "A Summary of Aluminum combustion," *International Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion*, 2004
 7. Pearse, R. W. B. and Gaydon, A. G., "The Identification of Molecular Spectra," *Halsted Press*, 1976
 8. Edward L. Dreizin, Charles H. Berman, and Edward P. Vicenzi, "Condensed-Phase Modifications in Magnesium Particle Combustion in Air," *Combustion and Flame*, Vol.122, 2000, pp.30 - 42