

혼합비와 입자 크기에 따른 마그네슘 입자 군 연소 화염의 실험

천홍기* · 임지환* · 윤웅섭**

Experimental Study of Magnesium Dust Combustion Flame on the Temperature Measurement According to Equivalence Ratio and Particle Size.

Hongky Chon* · Jihwan Lim* · Woongsup Yoon**

ABSTRACT

Combustion of magnesium dust particle were fabricated test devices and combustion experiments were carried out. The ignition delay time were measured in change of magnesium particle mass flow rate in premixed flame. According to increasing magnesium particle mass flow rate, ignition delay time were more shorter. In addition, magnesium dust combustion temperature were measured different particle sizes and o/f ratio by two wavelength pyrometry. Dust combustion flame temperature is almost similarly, through to equivalence ratio, confirm the combustion flame temperature range characteristics.

초 록

마그네슘 입자 군 연소 실험 장치를 제작하고 연소 실험을 수행하였다. 예혼합 화염용 버너에서 마그네슘 입자의 공급 질유량을 변화시켰을 때 점화 지연시간의 변화를 확인하였다. 마그네슘의 질량유량을 증가시킴에 따라 점화 지연시간이 단축됨을 확인하였다. 또한 마그네슘 입자 크기 별, 혼합비에 따라 변화시켰을 군 연소 화염 온도를 two wavelength pyrometry 를 이용하여 군 연소 화염온도를 측정하였다. 입자 크기별 군 연소 화염온도는 거의 비슷함을 확인 할 수 있었으며, 당량비에 따른 화염온도의 측정을 통해 연소되는 마그네슘 연소화염 분포의 특성을 알 수 있었다.

Key Words: Magnesium Dust Combustion Flame Temperature(군 연소 화염온도), Two Wavelength Pyrometry(이색법), Ignition Delay Time(점화지연)

1. 서 론

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

고체추진 로켓에서 마그네슘은 추력 효율을 높여주고 연소 불안정성을 억제하기 위한 첨가

제의 용도로 사용되어 왔다. 또한 대추력을 요구하는 수증발사체의 추진제, 화성 탐사체의 동력원으로 연구되어 왔으나, 최근에는 대체 에너지로서의 많은 관심을 받고 있다. 마그네슘 금속 연료는 에너지 밀도가 높고, 물을 통해서 산화 및 환원할 수 있는 특성이 있다[1]. 또한 에너지원으로서의 마그네슘은 주위에서 쉽게 구할 수 있고 여러 산화제와 반응하여 방출열량이 기존 탄화수소계열의 연료보다 크다는 이점이 있다[2]. 마그네슘은 대기에서 산화성이 강한 성격을 띄게 되어 산화 피막이라는 물질로 둘러 쌓여 존재한다. 또한 마그네슘은 연소 발생 시 상변화, 금속 표면에 존재하는 산화물 및 산화피막에 의한 효과 때문에 액적연소 현상과는 다르게 불규칙적이고 복합적으로 작용한다는 특징을 가지고 있다[2-3]. 마그네슘의 단위 질량당 연소 에너지는 알루미늄보다 작아 열량적인 측면에서 다소 불리한 점을 가지고 있으나, 문헌상 밝혀진 점화 및 연소 메커니즘을 살펴보면 알루미늄의 경우보다 마그네슘은 점화성이 좋고 연소가 쉽게 유지되기 때문에 적용성 측면에서 장점을 갖고 있다[3]. 이러한 장점을 바탕으로 마그네슘을 연료로서 직접 활용하기 위해 많은 연구가 필요하지만 산업적 응용이 가능할 연구가 아직 미흡한 상태이다. 따라서 마그네슘 균 입자 점화 및 연소특성의 정량적 데이터를 확보하는 것은 향후

실제 연료로써 사용할 시스템의 사양을 결정하고 시스템 설계에 있어 중요한 자료가 된다[4].

본 연구에서는 예혼합 화염의 버너를 제작하여 마이크로미터 크기의 마그네슘 입자 균 연소에 대해 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 금속 마그네슘 입자

연구에 사용되어진 금속 입자의 크기는 시스템 적용에 가능성이 높은 90~150 μm 크기의 마그네슘 구형 형상을 갖는 분말을 사용하였다. 이 금속 입자는 APT(Advanced Powder Technology)에서 제조하였고, 산화 피막이 형성된 마그네슘으로 99.8%의 순도를 가지고 있다.

2.2 실험 장치

마그네슘 입자를 점화 연소시키기 위한 실험 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 예혼합 화염용 버너와 입자를 공급하기 위한 입자공급기, 초고속 카메라, PMT 모듈 그리고 실험 장치를 제어하고 데이터를 기록할 컴퓨터로 구성된다.

2.3 실험 방법

예혼합 화염용 버너 화염의 연료는 프로판

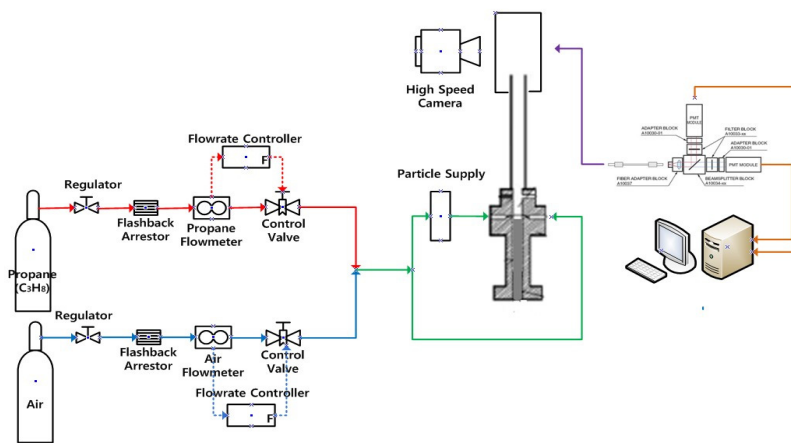


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

(99%), 산화제는 공기(99%)를 사용하였다. 프로판과 공기 분배에서 나온 기체는 각각의 유량계를 통해 제어를 받으며 하나의 유로에서 혼합되게 된다. 이 혼합 가스는 다시 두 갈래로 나뉘어져서 예혼합 버너로 주입 되는데 두 유로 중 한 유로에 입자공급기가 설치되어 마그네슘 입자와 함께 예혼합 버너로 공급되게 된다. 공급된 혼합 가스와 마그네슘은 연소되어 버너를 통해 배출된다.

입자 공급기를 닫아 놓은 상태에서 프로판과 공기 화염을 토치를 이용하여 화염을 형성시킨 후, 마그네슘 입자의 공급량에 따른 실험을 진행하였다. 직진성의 빛만을 받아 들여 국부적 균 연소 화염온도를 측정하기 위해 작은 구멍을 낸 Slate를 제작하였다.

2.4 열복사에 의한 온도 측정 이론

대표적인 연소 온도측정 방식은 접촉식과 비접촉식이 있다[5]. 본 연구에서는 공급된 마이크로미터 크기 입자의 화염온도를 측정하기 위해 비접촉식 방법으로 연소 시 방출되는 열복사를 이용한 two wavelength pyrometry를 이용하였다[5-10].

입자에서 방사된 spectral blackbody emissive power distribution은 Planck's law를 따르며, Wien's law에 의해 단순화된 식을 바탕으로 빛의 강도 비와 온도의 관계를 이용한다[11]. 연소 중 방사되는 빛의 강도는 photomultiplier tube(PMT, H5784-20, Hamamatsu)를 사용하여 측정하였다. 이 때 금속과 연소 생성물에 의한 분광학적 간섭을 피하기 위해 436 nm와 640 nm의 광학 필터를 사용하였다[11].

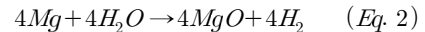
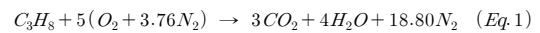
3. 실험 결과 및 분석

3.1 마그네슘 입자 점화지연

Fig. 2에서 볼수 있듯이 마그네슘 입자의 유출 질유량을 달리 하여 프로판 화염에서 점화 연소 시켰을 때 점화 위치 및 빛의 강도 변화를 초고속카메라로 촬영 측정하였다(Fig. 2). 마그네슘의

균 연소를 초고속 카메라로 촬영한 결과를 비교하면 마그네슘 입자의 질유량을 증가시킴으로써 기존의 프로판 화염에서 마그네슘 입자에 의해 강한 백광색의 빛의 색을 나타내는 부분이 점차 프로판 화염의 상단으로 가까워짐을 확인할 수 있다. 즉, 청색을 띄는 프로판 화염 그리고 백광색을 띄는 부분을 마그네슘의 연소되는 부분이라[12] 한다면 마그네슘의 점화 지연시간이 상대적으로 단축됨을 확인할 수 있다.

프로판과 공기의 연소 반응으로 수증기가 발생하고 이 수증기와(Eq. 1) 마그네슘이 반응한다. H_2O 가 모두 산화제로 반응한다고 가정(Eq. 2)하고 마그네슘과의 당량비를 산출해 보면, 마그네슘의 공급 질유량을 0.2~1.5 g/min 일 때의 당량비는 1에 가까워짐을 알 수 있다. 상대적으로 연료희박 상태에서 당량비가 1에 가까워져 마그네슘의 질유량을 증가시킬 수록 입자의 점화 지연 시간이 단축됨을 알 수 있다.



$\dot{m} = 0.0 \text{ g/min}$



$\dot{m} = 0.2 \text{ g/min}$



$\dot{m} = 0.5 \text{ g/min}$



$\dot{m} = 0.8 \text{ g/min}$

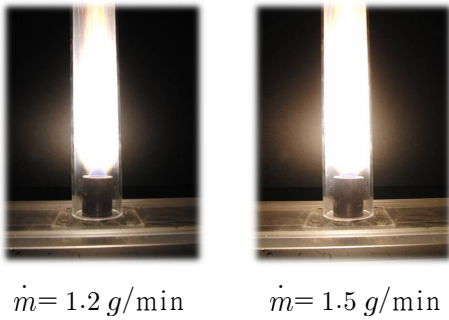


Fig. 2 Comparison with measured magnesium dust flame Ignition position and Intensity in Propane flame (Equivalence ratio 1.0, Particle Size 106 ~125 μm)

3.2 입자크기에 따른 마그네슘의 균 연소 온도

프로판 화염에 의해 점화된 마그네슘의 균 연소 화염온도를 프로판 화염 길이 방향으로 측정하였다. 점화원인 프로판 화염의 조건은 프로판과 공기의 총유량은 일정하게 유지하고, 마그네슘의 질유량은 $\dot{m}=2.0\text{ g/min}$ 으로 일정하게 한 후 마그네슘 입자 크기별 당량비의 변화에 따라 점화된 마그네슘의 연소 온도를 측정하였다.

본 연구를 위해 제작된 예혼합 버너에서 프로판 화염의 당량비가 1.0일 때의 프로판 화염온도를 살펴보면 Fig. 3과 같다. 일반적으로 알려진 마그네슘의 대기에서 점화온도는 약 900 K으로 알려져 있다[13]. 그러므로 마그네슘 입자는 버너 노즐 끝을 나와 짧은 시간 후 점화가 이루어게 된다.

Fig. 4, 5, 6을 통해 입자크기별 연소되는 화염 온도를 비교해 보면 연소되는 화염온도는 약 2500~2600 K 정도의 영역에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 전체 거리에 따라 마그네슘 균 연소 화염온도장의 분포를 보면 마그네슘 입자 크기가 커질 수록 균 연소 화염온도가 높게 측정되었다. 이는 마그네슘 입자의 직경이 커짐에 따라 상승한 것으로 볼수 있으나 오차 범위를 고려하면 비슷하다고 볼 수 있다. 마그네슘 입자의 연소 온도가 가장 높은 노즐 출구 부근 영역의 마그네슘 화염 연소 온도장을 살펴보면 약 2500~2600 K 정도라고 볼 수 있다. 이 온도는 문헌상으로 알려진 마그네슘 금속 균 연소 화염온도 약 $3100\pm 100\text{ K}$ 의 온도보다 약 500 K 정도 낮은

측정값이다[14]. Drezin[14]의 연구와 같이 막힌 공간 내에서 균 연소 화염온도를 측정하였으나 본 연구결과가 차이 나는 요인을 살펴보면, 본 실험 장치에서는 입자가 이송 기체로부터 지속적인 공급에 의해 화염 온도 감소 그리고 이송기체의 성분 중 질소 성분에 의한 화염 온도의 하강이 이루어 졌다고 추정된다.

단일 입자 연소 화염온도 크기별 온도차[4]와 균 연소 화염온도의 크기별 온도차를 비교하였을 때 상대적으로 균 연소 화염의 경우 크기별 온도차가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 이 결과는 균 입자사이의 상호작용에 의한 것으로 입자간 복사와 같은 현상에 의한 온도차로 보여진다.

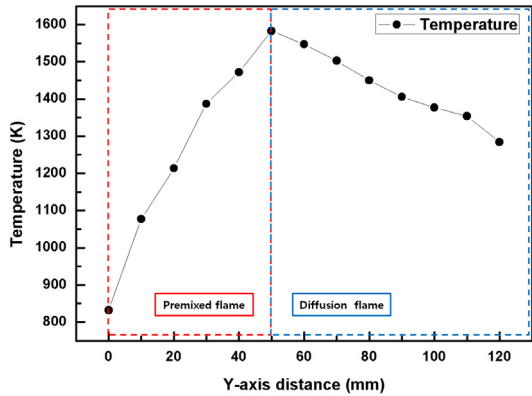


Fig. 3 Temperature of distribution Premixed burner flame

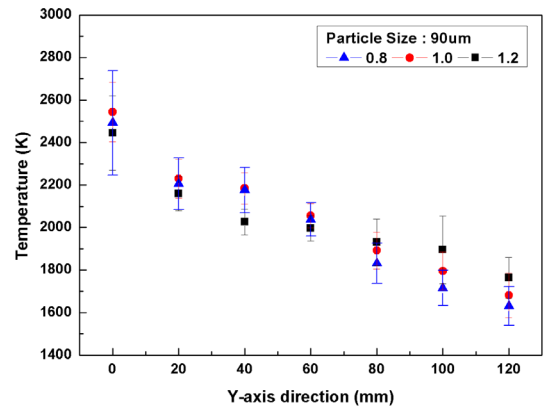


Fig. 4 Comparison with magnesium flame temperature in terms of particle size 90 μm according to equivalence ratio

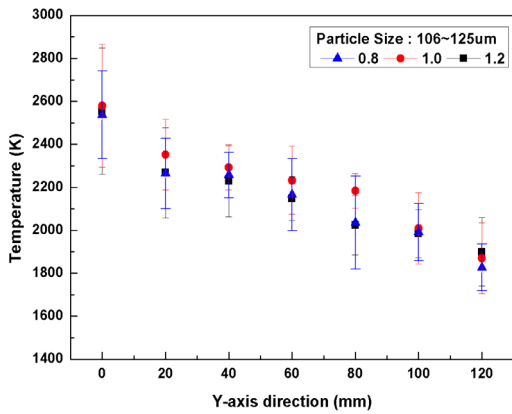


Fig. 5 Comparison with magnesium flame temperature in terms of particle size 106~125 μm according to equivalence ratio

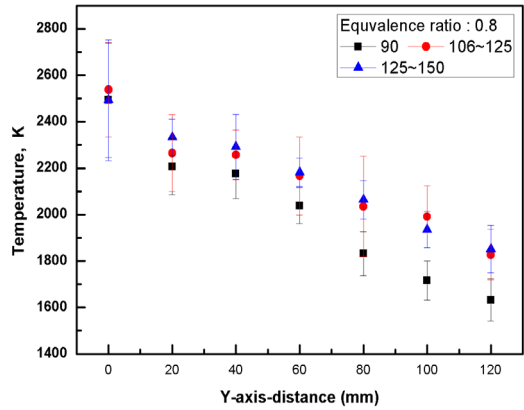


Fig. 7 Comparison with magnesium flame temperature in terms of equivalence ratio ($\Phi=0.8$)

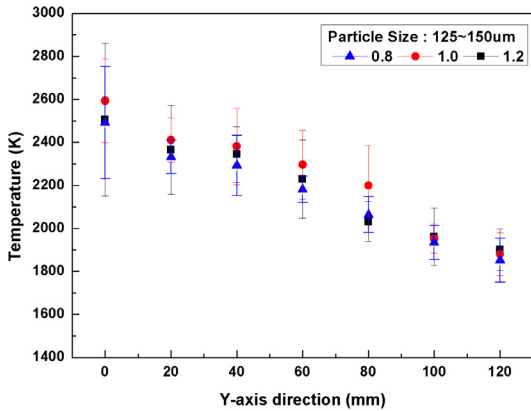


Fig. 6 Comparison with magnesium flame temperature in terms of particle size 125~150 μm according to equivalence ratio

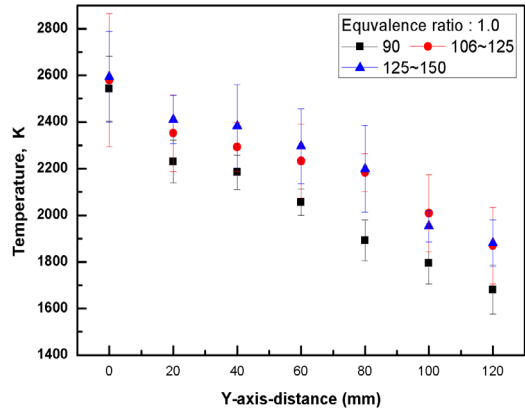


Fig. 8 Comparison with magnesium flame temperature in terms of equivalence ratio ($\Phi=1.0$)

3.3 당량비에 따른 마그네슘의 연소 온도

측정된 마그네슘 균 연소 화염온도 분포를 당량비에 따라 비교해 보았다. 노즐 끝에서부터 멀어질 때의 균 연소 화염 온도를 살펴보면 대체적으로 당량비가 1.0일 때 균 연소 화염온도가 가장 높게 나타났다. 노즐 끝 부근으로부터 멀어질수록 연료과잉 일 때의 화염온도가 연료희박 상태 일 때 보다 균 연소 화염온도가 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다. 이것으로 보아 연료과잉 상태일 때의 균 연소화염장이 연료희박 상태 일 때의 균 연소 화염장의 길이보다 보다 길게 형성됨을 확인할 수 있었다.

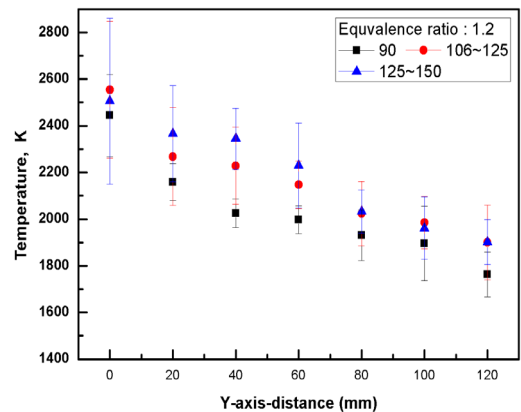


Fig. 9 Comparison with magnesium temperature in terms of equivalence ratio at ($\Phi=1.2$)

4. 결 론

본 연구에서는 대기 중에서 마그네슘 입자 균 연소 현상에 대한 이해를 높이기 위해 마그네슘을 예혼합 버너를 이용하여, 프로판 화염을 통한 연소 실험을 수행하였다. 연소 중인 마그네슘이 방사하는 열복사를 이용해 온도를 측정하여 연소 특성을 분석하였다.

마그네슘 입자의 질유량을 증가시키기에 따라 점화시간이 단축되는 경향을 보였다. 당량비가 1에 가까워짐에 따라 나타나는 현상으로 보인다.

마그네슘 입자 크기별 연소온도는 입자크기가 증가할수록 상승한 것을 확인할 수 있으나 그 상승량은 오차를 고려할 때 비슷하다고 보여진다.

문헌상의 입자크기별 단일 마그네슘의 화염 연소온도와 본 연구의 입자크기별 균 연소 화염 연소온도 결과를 비교하였을 때 균 연소 일 경우 입자 사이의 상호작용으로 그 온도차가 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

마그네슘을 점화원의 당량비를 조절하여 연소시켰을 때 연소 화염장이 노즐 끝에 멀어짐에 따라 연료과잉 상태일 경우의 화염이 연료부족 상태일 경우보다 온도분포 연소장이 길게 형성됨을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. ZHOU Jun-hu₁, ZHOU Kai₁, YANG Wei-Juan₁, YANG Cheng-hu_{1,2}, LIU Jian-zhong₁, CEN Ke-fa₁, "Kinetics of high temperature oxidation of Magnesium in steam," Journal of Combustion Science and

Technology, May 2010

2. Brzustowski, T. A. and Glassman I., "Spectroscopic Investigation of Metal Combustion," Hetrogeneous Combustion, Academic Press, New York, 1964, pp.41-47

3. 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

4. 임지환, 윤용섭, 이도형, "열복사에 의한 단일 알루미늄 입자 점화-연소특성 측정," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp.450-459

5. L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski and Journal Mcghee, "Temperature Measurement," John Wiley & Sons LTD, 2001

6. J. Harrison and Q. Brewster, "Infrared Emitted Intensity Measurements from Burning Aluminum Droplets in Solid Propellants," Combustion Science and Technology, Vol.181, 2009, pp.18-35

7. F. R. A. Jorgensen and M. Zuiderwyk, "Two-colour pyrometer measurements of the temperature of individual combustion praticles," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol.18, 1985, pp.486-491

8. M. Berger, A. E. Fuhs, and J. Kol, "Two-Color photo-pyrometry method for Temperature Meacurement of Moving Burning Particles," AIAA 23rd Aerospace Science Meeting, AIAA-85-0157, 1985

9. V. Sarou-Kanian, J. C. Rifflet, F. Millot, E. Verson, 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

10. K. Nguyen and M. C. Branch, "Ignition

- Temperature of Bulk 6061 Aluminum, 302 Stainless steel and 1018 Carbon Steel in Oxygen," *Combustion Science and Technology*, Vol.53, 1987, pp.277-288
11. 임지환, 윤웅섭, "EDB에 의해 부양된 알루미늄과 마그네슘 단일 입자의 점화 및 연소 특성 비교 연구," 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, pp.311-316
 12. Gregory Young, Kyle Sullivan, Michael R. Zachariah, Kenneth Yu, "Combustion characteristics of boron nanoparticles," *Combustion and Flame* 156 322-333
 13. Takeno, T. and S. Yussa, "Ignition of Magnesium and Magnesium-Aluminum Alloy by Impinging Hot-Air Stream," *Combustion Science and Technology*, 1980, 21(3) pp. 106~121
 14. Edward L. Dreizin, "Condensed-Phase Modifications in Magnesium Particle Combustion in Air," *Combustion and Flame*, 2000
 15. Carlo Badiola, Robert J. Gill, Edward L. Dreizin, "Combustion characteristics of micron-sized aluminum particles in oxygenated environments," *Combustion and Flame*, 2011