

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.5.047>

알루미늄 균입자 화염특성 분석을 위한 광학기법 연구

이상협^a · 고태호^a · 임지환^a · 이도형^b · 윤웅섭^{a,*}

Optical Diagnostic Study for Flame Characteristic Analysis in Aluminum Dust Clouds

Sanghyup Lee^a · Taeho Ko^a · Jihwan Lim^a · Dohyung Lee^b · Woongsup Yoon^{a,*}

^aSchool of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea

^bAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

ABSTRACT

In this study, In order to develop the measurement method of high energy density metal aluminum dust cloud combustion, flame temperature and emission spectrum was measured using spectrometer. Because of the ultra high μm -sized aluminum flame temperature more than 2400 K, it was measured by non-contact optical technique which is the modified two wavelength pyrometry with 520, 640 nm and spectrum comparison method. These methods were applied to experiment after accurate verification. As a result, we could identify that flame temperature is more than 2400 K in bottom of combustor in both methods. And on the emission spectrum analysis, we could measure AIO radical which is occurred dominantly in aluminum combustion.

초 록

본 연구에서는 고에너지 금속 알루미늄 균입자 연소 화염 분석을 위한 측정기법 개발 연구로서 스펙트로메터를 사용하여 화염 온도와 자발광 스펙트럼을 측정하였다. 마이크로 크기의 알루미늄 균입자 연소 반응시 발생하는 화염온도는 약 2400 K 이상의 초고온이므로 비접촉식 광학 계측 방법을 사용하였으며, 측정을 위해 개발된 기법은 520 nm, 640 nm를 사용하는 이색법을 응용한 방법과 광대역 파장 비교법으로서 각각의 방법은 정밀하게 검증 후 실험에 적용되었다. 연소실 하단에서 화염온도 측정결과 두 방법 모두 2400 K 이상의 화염온도를 확인할 수 있었으며 자발광 측정 결과 알루미늄 연소 반응시 가장 지배적으로 발생하는 화학종인 AIO를 확인할 수 있었다.

Key Words: High Temperature Measurement(고온측정법), Emission Spectroscopy(방출분광법)

Received 14 June 2013 / Revised 11 September 2013 / Accepted 18 September 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 30-31, 부산 해운대 한화리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

알루미늄 균입자 연소는 짧은 시간에 고밀도

의 에너지를 생성하므로 국방 및 민수 분야에서 다양한 장점이 있으나[1] 높은 용융점(≈ 2400 K)을 가진 산화피막의 점화방해 기작으로 인해 점화 및 연소가 원활하지 못하다는 단점이 있다 [1,2]. 따라서 이러한 단점을 극복하고 알루미늄 균입자 연소를 구현하기 위해 국내·외 다양한 분야에서 연구가 진행되어 왔으며[1-5] 저자의 이전 연구에서도 스윙 방식과 전단동축 연소실 형상에 대해 공기를 산화제로 하여 알루미늄과 마그네슘 균입자 지속연소 구현을 위한 연구를 수행하였다[3,4].

이러한 알루미늄과 마그네슘 균입자 연소 화염 특성을 분석하기 위해서는 화염온도, 방출 스펙트럼과 같은 정량화 된 값이 필요하나 균입자 연소 화염은 약 2400 K 이상의 초고온이므로 접촉식 계측 방법으로는 정확한 측정이 불가능하다[6]. 그 이유는 측정 프루브에 연소실내 액적화된 금속 알루미늄 입자가 들러붙어 측정값을 왜곡하거나 초고온 연소실 내부에 과대 노출되어 측정부가 손상되기 때문이다. 이에 반해 비접촉식 측정 방식은 물질 표면에서 방출하는 빛의 스펙트럼을 이용하는 방법으로서 접촉식에 비해 정확하고 반응속도가 매우 빠르므로 연소 특성을 진단하기 위한 많은 연구에서 이용되고 있다 [7-14].

따라서 본 연구에서는 알루미늄 균입자 연소 화염 분석을 위한 측정기법 연구로서 화염온도와 방출스펙트럼 분석을 비접촉식 방법을 사용하여 시도하였다. 화염온도는 이색법[6]과 스펙트럼 비교법[15] 2가지의 방법을 알루미늄 균입자 연소에 적합하게 수정 보완하여 적용하였으며 방출 스펙트럼은 자발광 계측기법을 활용하여 연소화염면에서 지배적으로 발생하는 화학종인 AlO[15]를 측정하여 화염위치를 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 알루미늄 균입자 연소 화염온도와 자발광 계측을 위해 방출 분광법 (Optical

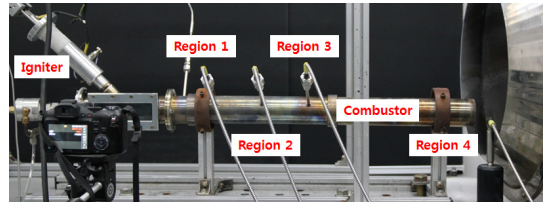


Fig. 1 Photograph of the aluminum combustion system with 4-Leg optical fiber.

Emission Spectroscopy)을 사용하여 스펙트럼을 측정하였다. 방출 분광법은 단색분광기 (Monochrometer)와 CCD 검출기(Detector)를 사용하여 특정 파장의 빛 강도를 측정하는 방법으로서, 본 연구에서는 Princeton의 SP-2558 분광기와 PIXIS 256BR 검출기를 사용하였다. 또한 150/1200/2400 groove를 갖는 고분해능 및 광대역 측정 가능한 세 종류의 격자를 사용하였으며, 집광을 위해 Oceanoptics의 UV-74 Collimator를 적용하여 실험을 수행하였다. 빛 강도세기 및 파장 보정은 Princeton의 Intellical[16]을 이용하여 이뤄졌으며 광섬유는 Fig. 1에 제시한바와 같이 동시에 다양한 영역에서 측정 가능하도록 4-Leg의 광섬유를 검출기 센서와 정렬하여 사용하였다.

Fig. 2는 알루미늄 금속 입자 연소 시스템 개략도이다. 연소 시스템은 알루미늄 분말의 연소를 위해 산화제와 분말 연료의 혼합 및 유동의 단순화를 고려하여 전단 동축인젝터와 예혼합관, 급팽창 영역의 특징을 갖는 연소실을 중심으로 구성되었으며 크게 분말 연료 공급 장치와 산화제 공급 장치, 점화 장치, 연소실, 후처리 장치로 이뤄져 있다. 실험과정은 상온의 분말 이송가스(공기)와 산화제인 공기를 연소실에 먼저 일정하게 공급한 후 스태프 플라즈마 점화기를 작동하였다. 플라즈마 점화기의 작동이 정상 상태에 도달하고 연소실이 예열되면 알루미늄 분말을 공급하여 점화 및 연소 현상을 기록·관찰하였다. 구체적인 연소시스템과 실험 과정 및 내용은 저자의 이전 연구에 상세히 제시되어 있다[3-4].

2.2 스펙트럼 비교법(Polychromatic fitting Method)

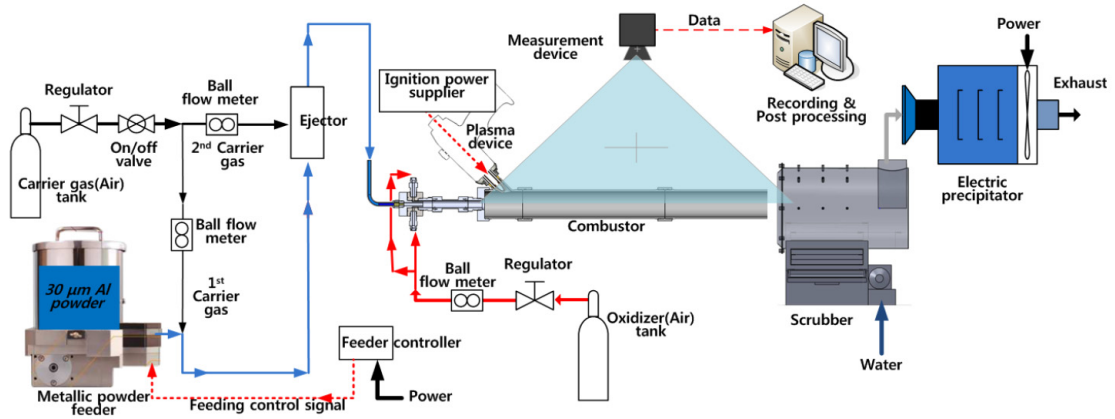


Fig. 2 Schematic of the aluminum / air combustion.

스펙트럼 비교법은 Goroshin[15]이 제시한 방법으로서 알루미늄 연소 화염 내에서 광대역 방출을 하는 고체 혹은 액체의 응축 상태의 방사체(condensed phase emitter)를 활용한 방법이다. 플랑크(Planck's) 법칙은 아래 Eq. 1과 같이 표현되는데 여기서 회색체 가정을 적용하게 되면 Eq. 1은 파장과 온도의 함수로 변하게 된다.

$$\ln \left[\frac{i_{\lambda, T} \cdot \lambda^5}{\epsilon(\lambda, T)} \cdot 2\pi \cdot C_1 \right] = \frac{C_2}{\lambda T} \quad (1)$$

I : Intensity λ : Wavelength
 ϵ : Emissivity C_1 : First Planck constant
 C_2 : Second Planck constant T : Temperature

그러나 알루미늄 방사체는 회색체 가정이 정확하게 일치하지 않으므로[15] 추가적으로 Wolfhard와 Parker[17], Arnold[18]가 제안한 이론을 적용하였는데 구체적인 내용은 다음과 같다. 알루미늄 연소 반응은 알루미늄의 광대역 방사에 의한 영향이 가장 지배적이며 매우 작은 크기(~ 0.1 μm)의 알루미늄을 발생한다[15]. 이렇게 발생한 알루미늄은 파장이 증가함에 따라 빛의 방사가 감소한다고 알려져 있다[17,18]. 또한 Parry[19]가 제시한 연소 반응중에 녹은 알루미늄의 흡수도는 파장에 따라 감소한다는 이론을 적용하면 파장에 따른 분광 방사율은 파장의 제곱에 반비례하게 된다. 따라서 Eq. 1은 아래 Eq. 2와 같이

표현 된다.

$$\ln [i_{\lambda, T} \cdot \lambda^7 \cdot 2\pi \cdot C_1] = \frac{C_2}{\lambda T} \quad (2)$$

2.3 이색법(Two wavelength Pyrometry)

연소 반응시 화염에서 방출하는 스펙트럼을 이용하여 온도를 측정하는 방법인 이색법[10-14]을 사용하여 화염 온도 측정을 시도하였다. 입자에서 방사된 spectral blackbody emissive power distribution은 Eq. 3의 플랑크 법칙을 따르며 빈(Wien's)의 법칙과 상수화된 방사율[6,10-14]에 의해 단순화된 식을 바탕으로 빛의 강도의 비(I_1/I_2)와 온도(T)의 관계는 Eq. 4와 같이 표현된다.

$$I_{\lambda, blackbody}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc_0^2}{n^2 \lambda^5} \frac{1}{\exp(hc_0/n\lambda kT) - 1} \quad (3)$$

I : Intensity λ : Wavelength
 h : Planck constant n : Index of refraction
 c_0 : Speed of light in vacuum c : Speed of light
 k : Boltzmann constant T : Temperature

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right) - \ln \left(\frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)} \right) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (4)$$

C_1 : First Planck constant C_2 : Second Planck constant

본 연구에서는 온도 측정값의 정확도를 향상하기 위해 물리적으로 밴드 폭을 가지는 대역필터와 PMT(Photomultiplier Tube)를 사용하는 기존의 방법 대신[10-14] 520 nm 와 640 nm 의 단일파장 빛 강도 세기를 정확히 추출할 수 있는 단색 분광기를 사용하였고 PMT Gain 값 및 필터의 투과도에 따른 오차를 줄이기 위해 고분해능의 격자와 CCD를 사용하여 측정하였다.

Fig. 3과 4는 흑체(Blackbody) 복사와 유사한 스펙트럼을 갖는 텅스텐-할로겐 램프를 한국표준과학연구원을 통해 교정 받은 온도측정 결과와 동일한 램프를 본 연구에서 사용된 스펙트로메터를 이용하여 측정한 결과를 비교한 그림 및 실제 사진이다. Fig. 3에 제시하였듯이 측정값의 정밀한 비교 후 본 연구에 적용하였다.

2.4 자발광 측정법

자발광 측정기법은 크게 2가지의 목적을 위해

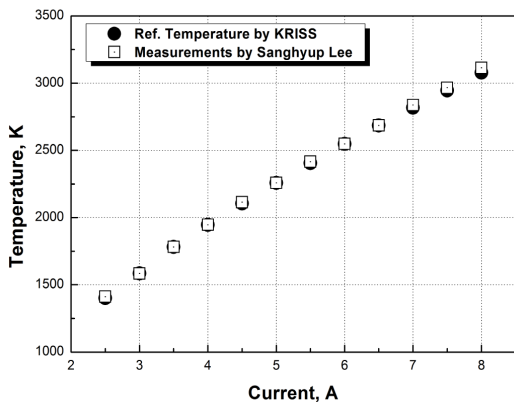


Fig. 3 Comparison with Lee's result and known temperature of standard tungsten-halogen lamp which is tested by KRISS.



Fig. 4 Photograph of calibrated tungsten-halogen lamp measurement.

연구를 수행하였다. 첫째는 알루미늄 균입자 연소 화염은 연소 반응시 AlO 화학종이 지배적으로 발생하므로[15] 이를 측정할 수 있는 기법을 확립하여 차후 화염의 농도분석 및 연소 효율과 같은 특성 분석을 위한 기초자료를 제공할 수 있다. 둘째로 금속분말 화염은 연소실 내에서 밴드를 형성하므로[5] 빛 강도 세기 비교를 통해 화염의 위치 및 길이를 파악할 수 있으며 370 ~ 650 nm의 광대역 방출 스펙트럼을 측정하여 발생하는 화학종을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 정밀한 측정을 위해 모든 광섬유에 집광렌즈를 사용하였으며 Fig. 5에 제시한바와 같이 연소실 내부 국소적인 영역에서 동시에 측정을 위해 4-Leg 광섬유를 검출기에 각 영역을 지정하여 사용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 화염 온도

알루미늄 연소 반응 시 방사되는 빛은 용해된 알루미늄, 알루미늄나, oxide smoke 에서 나오는 것으로 구분된다. 그 중 알루미늄에서 방사되는 빛 강도가 가장 강하며[15,20] 알루미늄의 연소 메커니즘에 따르면 화염온도는 Clausius - Clapeyron 방정식을 사용한 알루미늄의 화학종과 부분압의 함수로 표현되고 액상의 알루미늄의 해리온도(≈ 3250 K)로써 제한을 받는다고 알려져 있다[20]. 따라서 알루미늄 연소에서는 항상 위 해리반응이 수반되므로 화염온도는 알루미늄의 기화점과 동등하거나 낮을 것으로 예상된다.

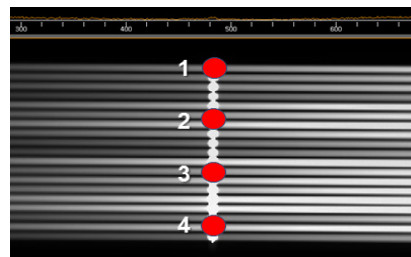


Fig. 5 Detector : Divide by 4 region for measuring local emission spectrum in combustor.

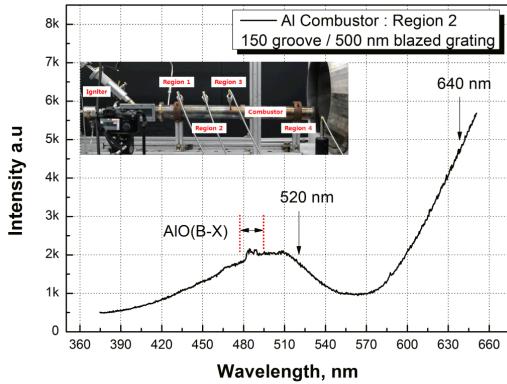


Fig. 6 Emission spectrum result : region 2.

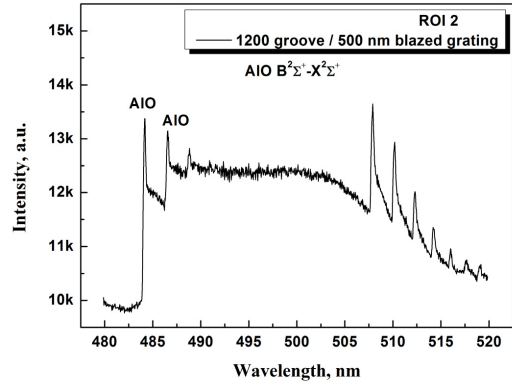


Fig. 8 AIO radical measurement result : region 2.

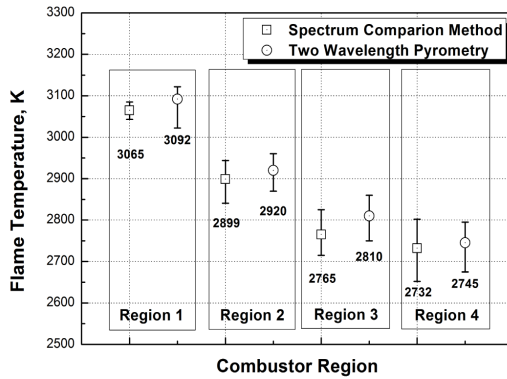


Fig. 7 Flame temperature measurement result 1, 2, 3, 4 region in combustor.

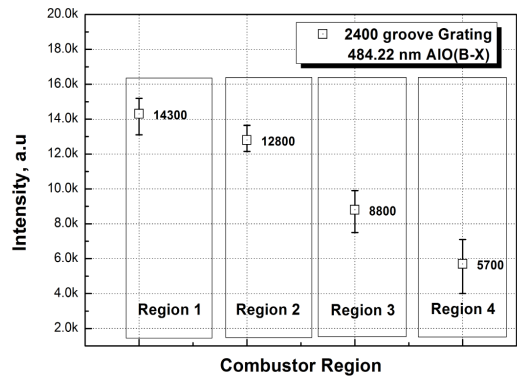


Fig. 9 AIO radical intensity measurement result 1, 2, 3, 4 region in combustor.

Fig. 6은 지속 연소 반응 시 연소실 내부 국소적인 영역 2에서 방출 스펙트럼을 측정된 결과이다. 제시한바와 같이 연소 반응중에 지배적으로 발생하는 AIO 화학종을 검출할 수 있었다.

Fig. 7은 스펙트럼 비교법과 이색법을 이용하여 연소실 국소 영역 1, 2, 3, 4에서 화염온도를 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. 분석 결과 약 2700 K 이상의 화염온도를 얻을 수 있었으며 이는 알루미늄의 기화온도보다 낮고 알루미늄의 점화온도보다 높은 값으로 선행문헌의 알루미늄 화염온도 측정 결과와[6,15] 잘 일치하는 결과이다. 제시한 바와 같이 2가지 측정 방법 모두 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 공통적으로 영역 1이 가장 높은 화염온도를 나타내었으며 연소실 하단 영역 4가 가장 낮은 화염온도를 나타내었다.

3.2 화염 위치

본 연구에서는 화염 위치 측정을 위해 자발광 계측 기법을 사용하여 알루미늄 연소 반응중 가장 지배적으로 발생하는 AIO 화학종을 확인하였다. 계측은 1200/2400 groove의 정밀 격자와 4-Leg 광섬유를 이용하여 수행하였으며 AIO 화학종의 방출 파장 $B^2\Sigma^+-X^2\Sigma^+$ 484.22 nm[21]의 빛 강도 세기를 측정하였다. Fig. 8은 연소실 내 2번 영역에서 AIO를 측정된 결과이며 Fig. 9는 연소실 내 1, 2, 3, 4 영역에서의 AIO 측정 결과를 비교한 그래프이다.

제시한바와 같이 1 영역에서 빛 강도세기의 최대값이 검출되었으며 4 영역에서 최소값이 확인되었다. 이를 통해 알루미늄 균입자 화염밴드가 1번 영역에 위치하는 것을 확인 할 수 있었

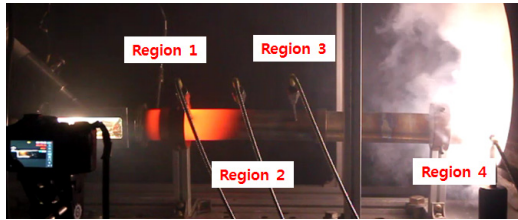


Fig. 10 Photograph of aluminum combustor : flame sustain stage.

다. 또한 이러한 결과는 화염온도 측정 결과와 경향이 일치하며 지속 연소 반응중에 연소실 외부를 촬영한 Fig. 10을 통해서도 가시적으로 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고에너지 금속 알루미늄 균입자 연소 화염 분석을 위한 측정기법 개발 연구로서 스펙트로메터를 사용한 자발광 계측을 통해 화염 온도와 화염 위치를 측정하였다. 마이크로 크기의 알루미늄 균입자 연소 반응시 발생하는 화염온도는 약 2400 K 점화온도 이상의 초고온이므로 비접촉식 광학 계측 방법을 사용하였으며, 측정을 위해 개발된 기법은 520 nm, 640 nm를 사용하는 이색법을 응용한 방법과 광대역 파장 비교법으로서 각각의 방법은 정밀하게 검증 후 실험에 적용되었다. 연소실을 4 영역으로 나누어 화염온도 측정 결과 두 방법 모두 약 2700 ~ 3100 K의 화염온도를 확인할 수 있었으며 자발광 측정 결과 알루미늄 연소 반응시 가장 지배적으로 발생하는 화학종인 AIO를 확인할 수 있었고 이를 통해 연소실 내부에 화염의 위치를 파악 할 수 있었다. 따라서 알루미늄 금속 균입자 연소 화염의 자발광 계측을 통한 화염온도 및 화염 위치 분석 기법을 확립하였으며 차후 금속 알루미늄 균입자 화염 분석 실험에 적용할 예정이다. 본 연구는 금속분말 연소를 사용하는 다양한 분야의 화염 분석 연구 및 고체추진제 분석 연구에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD110095CD)

References

1. Yang, H.S, "Combustion Dynamics of High-energy-density Metallic Fuel : Modeling and Detailed Parametric Investigation on an Isolated Aluminum and Magnesium Particle Burning," *Doctoral Thesis*, 2010.
2. Yang, H.S, and Yoon, W.S., "Modeling of Aluminum Particle Combustion with Emphasis on the Oxide Effects and Variable Transport Properties," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 909-921, 2010.
3. Ko, T.H, Lee, S.H, Yoon, W.S., "Experimental Study on Steam-Magnesium Powder Flame Formation in the Swirl Combustor," *Program & Abstracts of the Asian Joint Conference on Propulsion and Power*, p. 166, 2012.
4. Ko, T.H, Lee, S.H, Yoon, W.S., Lee, D.H, "Stabilization of Aluminum Powder-air Flame in the Combustor of a Shear Coaxial Injection," *Fall Conference of Korean Society of Propulsion Engineers*, 2013.
5. Timothy F. Miller, John D. Herr, "Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water," *40th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA 2004-4037, July 2004.
6. Lim, J.H, Yoon W.S, "Comparision Study of Burning and Ignition Characteristics for Single Aluminum and Magnesium Particles," *Fall Conference of Korean Society of Propulsion Engineers*, 2010.

7. Marion, M. Chauveau C. and Gokalp I, "Studies on the Ignition and Burning of Aluminum Particles," AIAA-95-2861, 1995.
8. Marion, M., Chauveau C. and Gokalp I, "Studies on the Ignition and Burning of Aluminum Particles," *Combustion Science and Technology*, Vol. 116, pp. 369-390, 1996.
9. V. Sarou-Kanian, J. C. Rifflet, F. Millot, and I. Gokalp, "Aluminum combustion in wet and dry CO₂: Consequences for surface reactions," *Combustion and Flame*, Vol. 145, pp. 220-230, 2006.
10. J. Harrison and Q. Brewster, "Infrared Emitted Intensity Measurements from Burning Aluminum Droplets in Solid Propellants," *Combustion Science and Technology*, Vol. 181, pp. 18-35, 2009.
11. F. R. A. Jorgensen and M. Zuiderwyk, "Two-colour pyrometer measurement of the temperature of individual combusting particles," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 18, pp. 486-491, 1985.
12. M. Berger, A. E. Fuhs, and J. Kol, "Two-Color Photo-Pyrometry Method for Temperature measurement of Moving Burning Particles," AIAA 23rd Aerospace Science Meeting, AIAA-85-0157, 1985.
13. 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, pp. 2299-2326, 2005.
14. 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, pp. 277-288, 1987.
15. Goroshin S., Mamen J., Higgins A., Bazyn T., Glumac N. and Krier H, "Emission Spectroscopy of Flame Fronts in Aluminum Suspensions," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 2011-2019, 2007.
16. Princeton Instrument User Manual, <http://www.princetoninstruments.com/cms/index.php/library/48-application-a-tech-notes-sorted-by-product/software>
17. H.G Wolfhard and W.G Parker, "Temperature Measurement of Flames Containing Incandescent Particles," *Proceedings of the Physical Society, Section B*, Vol. 62, pp. 523-529, 1949.
18. J.O Arnold, E.E Whiting and G.C. Lyle, "Line by Line Calculation of Spectra from Diatomic Molecules and Atoms Assuming a Voigt Line Profile," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 9, No. 6, pp. 775-798, 1969.
19. Parry, D.L. and M.Q. Brewster, "Optical Constants of Al₂O₃ Smoke in Propellant Flames," *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 5, No. 2, pp. 142-149, 1991.
20. M.W. Beckstead, "A Summary of Aluminum combustion," *International Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion*, 2004.
21. R.W.B Pearse and A.G. Gaydon, "The Identification of Molecular Spectra 4th Edition," John Wiley & Sons, 1976.