

알루미늄 입자 연소 지배인자의 민감도 해석

이상협* · 고태호* · 양희성** · 윤응섭***

Parametric Studies on the Sensitivity of Single Isolated Aluminum Particle Combustion Modeling

Sanghyup Lee* · Taeho Ko* · Heesung Yang** · Woongsup Yoon***

ABSTRACT

A simplified analytical modeling for micro-sized single metal particle combustion in air was conducted in the present study. The metal particle combustion consists of two distinct reaction regimes, ignition and quasi-steady burning, and the thermo-fluidic phenomena in each stage are formulated by virtue of the conservation and transport equations. Reliability of the model is shown by rigorous validation of the method with emphasis laid on the characterizing the commanding parameters. Effects of Initial particle size, initial oxide film thickness, convection, ambient pressure and temperature are examined and addressed with validation.

초 록

마이크로 크기의 단일 알루미늄 해석을 위한 간단한 모델을 작성하고, 현상의 주요 파라미터를 도출하는 연구를 수행하였다. 금속 입자의 연소는 점화와 준정상상태의 연소 단계로 구성하였고, 각 단계는 액적 연소의 경우와 유사하게 보존 및 이송 방정식들을 사용하여 묘사되었다. 모델은 기존의 실험 데이터와의 엄격한 비교를 통해 신뢰성을 검증하였고, 이 과정에서 현상의 주요 변수를 도출하여 그 영향을 평가하였다. 주요 변수로는 초기 입자크기, 산화 피막 두께, 대류 열전달의 유무, 외기 온도, 압력 등이 선정되었고, 간단한 열역학적 모델임에도 불구하고 정량적으로 실험 데이터와 유사하게 각각의 파라미터의 영향을 평가할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: Aluminum Particle(알루미늄 입자), Aluminum Oxide(알루미늄 산화 피막), Ignition(점화), Quasi-steady Burning(준정상상태 연소), Ignition Delay time(점화지연), ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 포항산업과학연구원 에너지자원연구본부

*** 연세대학교 기계공학과

교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

1. 서 론

알루미늄은 많은 장점에도 불구하고 산화 피막의 효과로 인해 점화 지연, 비대칭 연소 등 일

반적인 액적 연소보다 복잡한 연소 과정을 거친다. 대부분의 해석 및 실험적 연구가 알루미늄의 점화[1-3] 혹은 준정상 연소 (Quasi-Steady Combustion, QSC) [4-7]에 치중하여 수행되었으며, 몇몇의 수치적 연구는 알루미늄 산화 피막의 모사를 위해 높은 계산 비용이 요구되었다[8,9]. 산화 피막의 효과로 인해 산화제와 직접적인 접촉이 방해되므로 입자의 점화를 위해서는 산화 피막이 제거되어야 한다. 개발된 모델은 구체적인 산화 피막의 제거과정에 대한 해석을 배제하고, 열전달 및 이상 표면 반응 (heterogeneous surface reaction, HSR)에 의한 입자의 온도 상승을 모사하여, 입자의 온도가 산화피막의 용융 온도보다 높고, 알루미늄 증기압이 0.7보다 작으면 점화 되는 것으로 구성하였다. 준정상 연소단계에서는 내부 금속 액적, 액적표면과 화염 사이, 화염면 외부로 구분하여 모델을 구성하였다. 본 연구에서는 마이크로 크기 직경의 단일 알루미늄의 점화 및 연소 모사를 위한 단순모델 [10]을 적용, 점화지연 및 준정상 연소시간을 비롯한 알루미늄 입자연소 특성에 대한 여러 중요 파라미터의 민감도를 알아보려고 하였다. 포괄적인 해석을 위하여 동일한 입자 및 연소 환경 조건 하에서 하나의 파라미터만을 바꾸어가며 그에 따른 연소특성의 변화를 알아보았다. 저자의 이전 연구에서와 같이 금속입자의 연소는 점화와 준정상 연소 단계로 구성하였고, 각 단계는 액적 연소의 경우와 유사하게 보존 및 이송 방정식들을 사용하여 수식화되었다[10]. 모델은 기존의 실험 데이터와의 엄격한 비교를 통해 정확성을 검증하였고, 현상의 주요 변수를 도출하여 그 영향을 평가하였다. 주요 변수로는 점화 온도, 입자 크기, 산화 피막 두께, 대류 열전달, 외기 압력 및 온도 등이 선정되었고 이중 표면 반응과 복사 열전달에 의한 영향도 알아보았다.

2. 단일 알루미늄 입자 연소 파라미터

파라미터의 값은 기존의 다양한 연구에서 제시된 값을 사용하였으며, 그 초기 값을 Table 1

에 정리하였다.

Table 1 Various parameters and their default values

Parameters	Default values
Initial particle size (μm)	165
Ignition temperature (K)	2200
Initial oxide film thickness (nm)	3
Convection	No forced convection & free falling particle
Ambient pressure (atm)	1
Ambient temperature (K)	3000

2.1 초기 산화 피막 두께

초기 산화 피막의 두께가 미치는 영향을 알아보기 위해 165 μm 크기 알루미늄 입자의 산화피막을 3nm에서 3 μm 으로 변화시켜가면서 계산을 수행하였고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 알루미늄 점화 특성이 초기 산화 피막의 두께에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있으며[13], 이는 계산 결과와 잘 일치한다. Table 2에서도 1000배의 초기피막 두께 증가에도 불구하고 점화 지연시간의 증가는 크지 않은 것을 볼 수 있다. 또한 산화피막의 두께가 준정상 연소에 미치는 효과도 적어서 준정상 연소시간, 연소율, 화염온도 및 standoff ratio 모두 큰 변화가 없다. 단, 초기피막이 두꺼워지면 잔여물의 상대 크기 (D_{residue}/D_0)와 질량은 각각 3%, 10% 증가하는데 이는 두께증가에 따라 초기산화물 질량이 증가하기 때문이다.

Table 2 Effects of initial oxide film thickness

δ (nm)	t_{ig} (sec)	t_{QSC} (sec)	burn-ing rate*	T_f (K)	r_f/r_0
3	0.04992	0.07537	-3.50	4270.16	5.49
30	0.04993	0.07542	-3.50	4222.02	5.48
300	0.05007	0.07432	-3.60	4278.39	5.49
3000	0.05144	0.06589	-3.70	4234.75	5.48

*($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$)

2.2 초기 입자 크기

초기의 입자 크기에 따른 점화 및 연소특성 변화를 알아보기 위해 입자직경을 30 μm 로부터 500 μm 로 증가시키며 단일 알루미늄입자 연소를 모사하였다. Fig. 1에 예측된 연소시간을 이전의 해석적 연구 결과들[9, 15, 16, 17]과 비교하고 있으며 전 입자크기 영역에서 거의 일치하는 결과를 확인할 수 있다. 입자 크기의 증가에 따라 점화지연과 준정상 연소시간으로 이루어지는 입자연소시간이 비례적으로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 입자의 초기직경이 200 μm 이상인 경우에는 거의 선형적인 증가를 보인다.

초기 입자 크기에 따른 점화지연시간을 Fig. 2에 나타내었다. 입자 크기 증가에 따른 점화지연시간의 증가는 물리적으로 자연스럽다. 또한 열유속이 동일할 때, 열전달에 의해 입자 내부로 공급되는 열은 직경의 제곱에 비례하나, 입자의 온도 상승은 직경의 세제곱에 반비례하므로 상대적으로 작은 입자의 온도가 빠르게 상승하며 따라서 점화지연시간도 짧아지게 된다. 특기할 것은 입자의 직경이 200 μm 일 때, 총 연소시간 0.12초 중 점화지연시간이 약 0.06초로 전체 시간 중 50%가까운 긴 시간이 점화에 사용되고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 알루미늄 입자 연소의 일반적인 특징으로 이전의 연구결과에서도 확인할 수 있다.

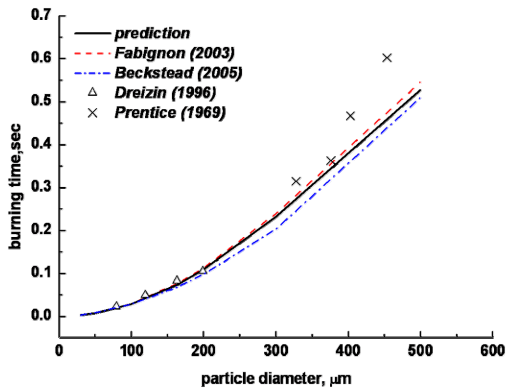


Fig. 1 Particle burning time according to the initial particle size

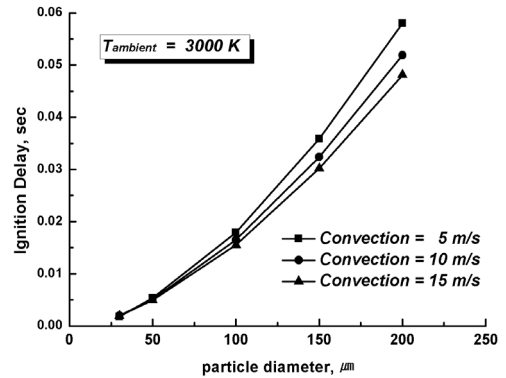


Fig. 2 Ignition delay time according to the initial particle size

Table 3에 준정상 연소 시의 입자온도, 연소율, 잔류산화물, 화염온도 및 standoff ratio 변화를 초기 입자크기에 대하여 나타내었다. 이들 모든 준정상 연소파라미터들은 초기 입자크기의 큰 증가에도 불구하고 많은 변화를 보이지 않고 있는 것을 볼 수 있다. 입자의 온도는 모든 초기 입자크기에서 2270K 근처로 나타나고 있는데, 이는 입자의 온도가 초기 입자크기에 크게 관계되지 않는다고 하는 이전의 연구결과 [11]와 동일하다. 연소율은 입자크기에 비례하여 증가하나, 화염의 상대적 크기와 산화잔여물의 양은 거의 변화가 없다. 이전의 연구[12]에서와 같이 화염의 온도는 입자의 크기에 반비례하는 것으로 나타났다. Fig. 2의 설명에서 이미 언급한 대로 입자의 크기가 클수록 점화지연시간은 증가한다.

Table 3 Effects of initial particle size on the burning characteristics

D_0 (μm)	$T_{p,QSC}$ (K)	burn -ing rate*	D_{res} -idue / D_0	T_f (K)	r_f/r_0
30	2274.82	-3.44	0.75	4368.76	5.41
50	2276.28	-3.47	0.76	4409.24	5.41
100	2272.79	-3.48	0.75	4312.72	5.41
165	2271.25	-3.54	0.75	4270.16	5.48
200	2269.64	-3.59	0.75	4224.32	5.56
300	2268.34	-3.81	0.75	4188.55	5.88
500	2267.86	-4.64	0.75	4175.34	7.16

*($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$)

2.3 대류 조건

대류 조건이 165 μ m의 알루미늄 입자 연소에 미치는 영향을 알아보기 위해 1m/s, 5m/s, 10m/s 로 외기의 속도를 변화시켜 가면서 입자의 연소를 계산하였다. Zenin[18]은 직경 200 ~ 500 μ m의 입자를 대상으로 1m/s의 약한 대류 조건에서도 정지 상태에 비해 산화물의 재부착 및 화염의 상대 반경이 감소하고, 연소시간의 경우 20%가 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 계산 결과 연소 시간은 10m/s의 대류 조건에서도 7% 정도만이 감소하였으며, 이는 점화 지연시간의 감소 21% 보다 적은 양이다. 이러한 결과는 열전달 메커니즘, 대류 또는 복사가 입자의 연소 각 단계에 상대적으로 지배인자가 되는 것처럼 보인다. 점화 초기에는 고온의 외기로부터 대류 열전달에 의해 가장 많은 에너지를 공급받는 반면 준정상 연소단계에서 대류 열전달과 복사 열전달에 의한 효과가 유사한 정도를 나타낸다. 따라서 대류 열전달은 연소 시간보다는 점화 지연 시간에 보다 많은 영향을 미친다.

한편, Table 4에서 나타난 바와 같이 산화 침전물($m_{\text{max,QSC}}$)은 대류에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 화염 반경은 감소하기 보다는 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이런 결과들은 본 연구에서 사용한 모델의 한계로 보인다. 정밀한 수치해석과는 달리 이전 연구에서 개발된 모델[10]은 열역학 이론을 기초로 한 0-차원의 결정 모델이므로 대류에 의한 열 및 물질 이송 효과만을 반영할 뿐, 후류 유동, 알루미늄 액적 및 화염의 뒤틀림과 같은 복잡한 현상은 모사하지 못한다. 이러한 문제는 ALE 계산과 같은 입자 계산을 수행하는 CFD 방법에 이 모델을 적용한다면 해결 될 것으로 생각된다.

Table 4 Effects of convective environment

Conv. (m/s)	t _{ig} (sec)	t _{QSC} (sec)	m _{max,QSC} (kg)	r _f /r ₀
1	0.04853	0.07632	3.490E-09	5.42
5	0.04235	0.07421	3.446E-09	5.58
10	0.03798	0.07096	3.404E-09	5.84

2.4 외기압력

외기 압력이 알루미늄 입자 연소에 미치는 영향을 확인하기 위해 1 기압에서 30 기압까지 외기 압력을 변화시켜가면서 계산을 수행하였다 점화 지연 시간은 외기 압력의 변화에 따라 0.0499초부터 0.0508초 까지 좁은 범위 안에서 나타났는데 이는 외기 압력에 따라 점화 지연 시간의 변화가 미비하다는 이전의 연구결과와 유사하다[20,21]. 연소 시간은 압력 증가에 따라 감소한다고 알려져 있으며[14,20,22-26], 계산 결과 1기압에 비해 30기압에서 23%가 줄어들어 정량적으로 잘 일치함을 확인하였다.

연소율은 외기 압력에 대해 지수 함수로 표현 가능하며(P^n), 많은 연구자들이 0.1부터 0.4까지의 다양한 지수값(n)을 제시하였다[19,26-29]. 계산 결과, 지수 값은 Beckstead[19]의 결과와 유사한 0.095를 가지며, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

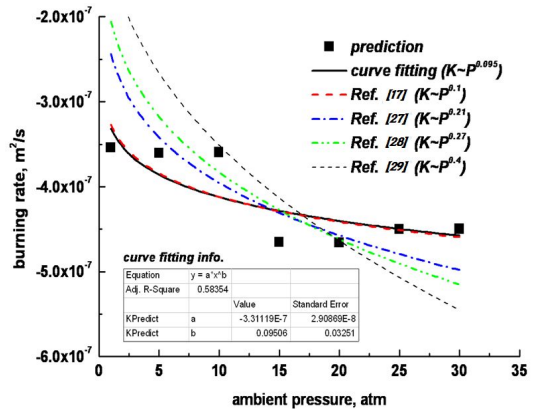


Fig. 3 Correlation between burning rate and ambient pressure (pressure power law)

준정상 연소 단계에서 압력의 증가에 따라 화염[9,21,24,30] 및 액적 표면 온도[9,30]가 증가하며, 더 높은 압력에서 화염 반경은 줄어든다[9,23,30]. 본 연구에서도 이와 같은 특징이 잘 예측 되었으며, Widener 등[30]이 수행한 정밀한 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 비록 계산 결과가 Widener의 결과 보다 높은 온도를 예측하였지만 Widener의 해석에는 많은 양의 CO₂ 와 H₂O 증기를 포함하고 있다는 점을

감안하면 계산 결과가 잘 맞는다고 할 수 있다.

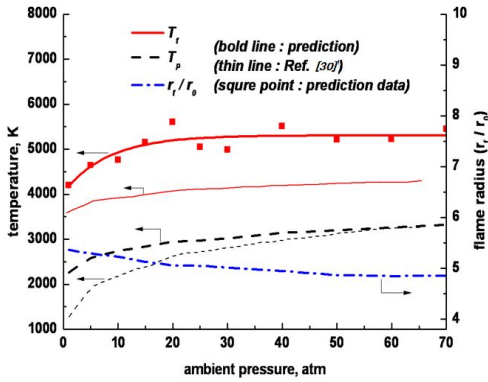


Fig. 4 Variation of relative flame radius, flame and droplet surface temperature with pressure

2.5 외기 온도

외기 온도의 효과를 확인하기 위해 1000~4000K의 외기온도에 따른 계산을 수행하였다. 주요 결과를 Table 5에 정리하였다. 외기 온도가 1000K에서 4000K로 상승하면 점화 지연 시간은 급격하게 감소하지만 연소시간은 12%만 감소한다. 점화 지연시간이 급격하게 감소하는 이유는 점화단계에서 HSR[11]에 의해 에너지가 공급되기 전까지 대류에 의한 에너지 전달이 가장 중요한 입자 가열 에너지원이며, 따라서 점화 지연 시간은 외기의 온도에 강한 의존성을 갖기 때문이다. 반면 준정상 연소 단계에서는 알루미늄 액적의 기화(연소)율이 외기의 온도 보다 액적을 둘러싼 화염의 온도에 의존 하므로, 준정상

연소에서 외기 온도의 영향은 감소한다. 연소 시간의 예측 결과는 Fabignon[9] 및 Beckstead[17]의 관계식과 10%의 오차로 잘 일치한다. 그 밖에도 외기 온도의 증가에 따라 화염 온도는 높아지며, 화염 크기는 증가한다. 이로부터 외기온도가 높아질수록 분해율이 증가하는 것보다 연소율이 증가 하는 것이 더 크다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

알루미늄 입자의 연소의 민감도에 관한 연구를 수행하였다. 주요 변수로 초기 입자의 크기, 초기 산화피막의 두께, 대류, 외기압력 및 온도를 선정하였다. 각 변수가 미치는 영향을 확인하였으며, 이를 실험연구 및 정밀한 수치연구와 비교하였다. 연구에 사용된 모델이 비록 열역학 이론을 기반으로 한 간단한 0차원 결정 모델이지만 계산 결과는 이전의 결과와 잘 일치하였다. 연구에 사용된 결정 모델은 이번 연구를 통해 고려된 몇 가지의 주요 변수에 대한 단순화를 통하여 알루미늄 화염 전산모사에 활용될 것이다.

후 기

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

Table 5 Effects of ambient temperature

T _{amb} (K)	t _{ig} (sec)	m _{max,HSR} (kg)	t _{QSC} (sec)	burning rate*	m _{max,QSC} (kg)	$\frac{\dot{m}_{max,out}}{\dot{m}_{tot}}$	D _{residue} / D ₀	T _f (K)	r _f /r ₀
1000	0.92568	8.640E-10	0.08102	-3.20	4.337E-09	4.362	0.83	3217.70	4.59
1500	0.19241	5.313E-10	0.08125	-3.25	4.132E-09	3.786	0.80	3427.23	4.81
2000	0.10530	4.485E-10	0.07947	-3.34	3.874E-09	3.428	0.78	3667.06	5.03
2500	0.06935	3.965E-10	0.07747	-3.44	3.651E-09	3.194	0.76	3939.27	5.25
3000	0.04991	3.576E-10	0.07537	-3.54	3.504E-09	3.062	0.75	4270.16	5.49
3500	0.03800	3.287E-10	0.07343	-3.64	3.303E-09	2.912	0.73	4555.42	5.71
4000	0.03018	3.025E-10	0.07184	-3.73	3.015E-09	2.734	0.71	4766.27	5.92

*(x 10⁻⁷ m²/sec)

참 고 문 헌

1. A.V. Fedorov and Y.V. Kharlamova, "Ignition of an Aluminum Particle," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 39[5] 544-547 (2003).
2. M.A. Gurevich, K.I. Lapkina, and E.S. Ozerov, "Ignition limits of aluminum particles," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 6[2] 154-157 (1972).
3. A.A. Razdobreev, A.I. Skorik, and Y.V. Frolov, "Ignition and combustion mechanism in aluminum particles," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 12[2] 177-182 (1977).
4. I. Glassman, "METAL COMBUSTION PROCESSES," pp. 43, Vol. Report No. 473, Aeronautical Engineering Laboratory, 1959.
5. C.K. Law, "A SIMPLIFIED THEORETICAL MODEL FOR THE VAPOR-PHASE ACOMBUSTION OF METAL PARTICLES," *Combustion Science and Technology*, 7[5] 197-212 (1973).
6. Y. Liang and M.W. Beckstead, "Numerical simulation of unsteady, single aluminum particle combustion in air," pp. 1-10 in 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Edited. AIAA, Cleveland, OH, 1998.
7. J.C. Melcher, H. Krier, and R.L. Burton, "Burning aluminum particles inside a laboratory-scale solid rocket motor," *Journal of Propulsion and Power*, 18[3] 631-640 (2002).
8. V.A. Babuk and V.A. Vasilyev, "Model of aluminum agglomerate evolution in combustion products of solid rocket propellant," *Journal of Propulsion and Power*, 18[4] 814-823 (2002).
9. Y. Fabignon, et al., "Combustion of Aluminum Particles in Solid Rocket Motors," pp. 1-10 in 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Edited, Huntsville, Alabama, 2003.
10. J.L. Heesung Yang, Kyungmoo Kim, Woongsup Yoon, "Simplified model for Single Aluminum Particle Combustion," pp. 1-9 in 47Th AIAA Aerospace Science Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Expositin. Edited. AIAA, Orlando, Florida, 2009.
11. V.A. Ermakov, et al., "Temperature of aluminum particles at the time of ignition and combustion," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 18[2] 256-257 (1982).
12. T.A. Brzustowski and I. Glassman, "VAPOR-PHASE DIFFUSION FLAMES IN THE COMBUSTION OF MAGNESIUM AND ALUMINUM: I. ANALYTICAL DEVELOPMENTS," pp. 1-14 in *Heterogeneous Combustion Conference*. Edited. AIAA, Palm beach, Florida, 1963.
13. A.G. Merzhanov, Y.M. Grigorjev, and Y.A. Gal'chenko, "Aluminium ignition," *Combustion and Flame*, 29[C] 1-14 (1977).
14. Sanghyup Lee. and Woongsup Yoon, "Combustion of Nano-scale Aluminum and Liquid Water for Pressure Sensitivity," *KSPE Spring Conference*, 2010.
15. E.L. Dreizin, "Experimental study of stages in aluminum particle combustion in air," *Combustion and Flame*, 105[4] 541-556 (1996).
16. J.L. Prentice, "COMBUSTION OF PULSE-HEATED SINGLE PARTICLES OF ALUMINUM AND BERYLLIUM," *Combustion Inst (Western States Sec)-Paper 2 for Spring meeting*, (1969).
17. M.W. Beckstead, "Correlating aluminum burning times," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 41[5] 533-546 (2005).

18. A. Zenin, G. Kusnezov, and V. Kolesnikov, "Physics of aluminum particle combustion at convection," pp. 1-12 in 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Vol. AIAA-2000-0849. Edited, 2000.
19. M.W. Beckstead, "Correlating aluminum burning times," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 41[5] 533-546 (2005).
20. M. Marion, C. Chauveau, and I. Gokalp, "Studies on the Ignition and Burning of Aluminum Particles," pp. 1-10 in 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Vol. AIAA 95-2861. Edited. AIAA, San Diego, 1995.
21. M. Marion, C. Chauveau, and I. Gokalp, "Studies on the ignition and burning of levitated aluminum particles," *Combustion Science and Technology*, 115[4-6] 369-390 (1996).
22. A.F. Belyaev, Y.V. Frolov, and A.I. Korotkov, "Combustion and ignition of particles of finely dispersed aluminum," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 4[3] 182-185 (1968).
23. P. Bucher, et al., "Flame structure measurement of single, isolated aluminum particles burning in air," pp. 1899-1908 in 28th Symposium (International) on Combustion, Vol. 2, Proceedings of the 1996 26th International Symposium on Combustion. Part 2 (of 2). Edited by Anon. Combustion Inst., Napoli, Italy, 1996.
24. Y.V. Frolov, P.F. Pokhil, and V.S. Logachev, "Ignition and combustion of powdered aluminum in high-temperature gaseous media and in a composition of heterogeneous condensed systems," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 8[2] 168-187 (1974).
25. M. Marion, et al., "Studies on the burning of levitated aluminum particles: Effects of CO₂ and pressure," 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA paper 97-2704[1-9] (1997).
26. J.F. Widener and M.W. Beckstead, "Aluminum combustion modeling in solid propellant combustion products," AIAA Paper, 98-3824 1-10 (1998).
27. R.O. Foelsche, R.L. Burton, and H. Krier, "Ignition and combustion of aluminum particles in H₂/O₂/N₂ combustion products," *Journal of Propulsion and Power*, 14[6] 1001-1008 (1998).
28. K.O. Hartman, "ignition and combustion of aluminum particles in propellant flame gases," pp. 1-24 in 8th JANNAF Combustion Meeting, Vol. Volume 1. Edited, 1971.
29. R.W. Hermsen, "ALUMINUM COMBUSTION EFFICIENCY IN SOLID ROCKET MOTORS," AIAA Paper, (1981).
30. J.F. Widener, Y. Liang, and M.W. Beckstead, "Aluminum combustion modeling in solid propellant environments," pp. 1-16 in 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Edited. AIAA, Los Angeles, California, 1999.