

研究論文

나노-마이크로 알루미늄 혼합 입자의 공기와의 연소 모델링

윤시경* · 신준수** · 성홍계***†

Combustion Modeling of Nano/Micro Aluminum Particle Mixture

Shikyung Yoon* · Junsu Shin** · Honggye Sung***†

ABSTRACT

One dimensional combustion modeling of aluminum combustion behavior is proposed. Combustion model is assumed that region consists as follows ; preheat, reaction, post reaction region. Flame speed as a function of particle size, equivalence ratio for unitary particles and fraction ratio of micro to nano particle size for binary particles were investigated for lean burn condition at 1 atm. Results were compared with experimental data. For unitary particles, flame speed increase as particle size decreases, but opposite trend with equivalence ratio. For binary particles, flame speed increases proportionally as nano particle fraction increases. For flame structure, separated or overlapping flames are observed, depending on the fraction of nano sized particles.

초 록

금속 연료 중 널리 사용되는 알루미늄의 연소 특성에 관하여 1차원 연소모델링을 제안하였다. 연소 모델링은 예열영역, 반응영역, 반응 후 영역, 세 영역으로 나누어 수행하였다. 또한 희박연소로 가정하여 단일 입자의 경우 입자크기와 당량비에 따른 화염속도, 나노와 마이크로 입자의 혼합물의 경우 혼합 비율에 따른 화염속도를 압력이 1기압 조건에서 계산하여 실험결과와 비교하였다. 단일입자의 경우, 입자의 크기가 작아질수록 화염속도가 빨라지고, 당량비가 낮아질수록 화염속도가 느려지는 현상이 관찰되었다. 나노와 마이크로 입자의 혼합물의 경우, 나노 입자의 함유량에 따라 화염속도는 빨라지며, 화염구조는 분리화염과 중첩화염이 나타남이 관찰되었다.

Key Words: Aluminum Particle Combustion(알루미늄 입자 연소), Green Energy(청정에너지), Nano and Micro Aluminum(나노와 마이크로 알루미늄), Combustion Modeling of 1-D Aluminum Particle-air Mixture(1차원 알루미늄-공기 혼합물 연소모델)

접수일 2011. 7. 20, 수정완료일 2011. 12. 3, 게재확정일 2011. 12. 10

* 정회원, 포스코 기술연구원 제선FINEX 연구그룹

** 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

Nomenclature

B	Particle density
c	Constant-pressure specific heat

m	Mass
n	Number density
χ_n	Nano particle mass fraction
Q	Heat of reaction
r	Radius of particle
S_L	Laminar flame speed
T	Temperature
x	Distance
y	Normalized distance
Subscripts	
a	Aluminum
b	Burned
F	Fuel
i	Ignition
o	Oxidizer
p	Particle phase
s	Solid phase
st	Stoichiometric
u	Unburned
Greek alphabet	
α	Mixture thermal diffusivity
η	Normalized thermal relaxation time of gas phase
θ	Normalized temperature
κ	Normalized diffusivity
λ	Thermal conductivity
μ	Normalized heat-release
ξ	Normalized thermal relaxation time of particle phase
ρ	Density
τ_b	Burning time
ϕ	Equivalence ratio

1. 서 론

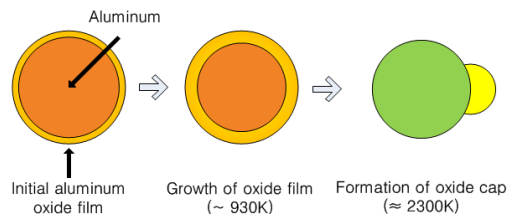
금속연료의 연소는 60년대부터 지금까지 꾸준히 다양한 연구가 진행되고 있다. 알루미늄은 연료 고갈이 매우 우려되는 탄화수소계열의 연료와 비교했을 때 매장량이 상당하여 향후 대체 에너지원으로 사용 가능성이 많으며 친환경 에너지원 (green energy)이라는 측면에서도 매우 유용하다. 또한 알루미늄 입자는 고체 추진기관

의 첨가물로 사용되어왔는데 최근에는 첨가물이 아닌 여러 추진시스템의 주 에너지원으로 연구되고 있다. [1,2,3]

금속 연료가 주연료로 사용되지 못하고 첨가제로만 사용되었던 이유는 자연적으로 산소와 반응하여 산화피막이 표면에 형성되어 점화가 어렵기 때문이다.[4,5] 알루미늄은 공기와 반응하여 산화피막이 알루미늄 표면에 생성되는데(알루미나, Al_2O_3) (Fig. 1 참조), 산화피막을 제거하여 알루미늄을 점화시키기 위해서는 2200K ~ 2300K의 온도가 필요하다. 일반적인 탄화수소계열 연료의 연소온도가 약 2000K임을 감안하면 이는 상대적으로 높은 온도이며, 전체적인 시스템 측면에서도 과도한 에너지 소모라고 할 수 있다. 뿐만 아니라, 금속 입자의 경우 일반적인 액적연료와 같이 입자크기에 따라 연소 시간이 결정되는데 입자가 큰 경우(마이크로 크기 입자) 제한된 연소실 공간 내에서 입자가 모두 연소되지 않은 채로 연소실을 빠져나가 연소 효율의 감소를 초래할 수도 있다.

이러한 점화 및 연소 문제 때문에 금속연료는 주연료가 아닌 첨가제로 사용되어왔다. 하지만 최근 나노 입자에 대한 물리적 이해 및 나노 입자 제조 기술의 발전으로 주요 문제점들이 상당

Micro sized aluminum particle



Nano sized aluminum particle

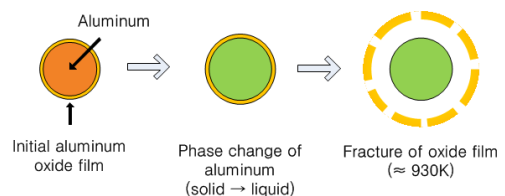


Fig. 1 Comparison of ignition processes of micro, nano-sized aluminum particle[6]

부분 해결되어 금속 입자를 주연료로 사용할 가능성이 높아졌다. [2,3]

나노 크기 알루미늄은 마이크로 크기의 알루미늄에 비해 동일 질량당 표면적이 증가하기 때문에 반응율이 증가하여 연소시간이 짧아진다.(Fig. 2 참조) 뿐만 아니라, 큰 곡률로 인해 열팽창시 더욱 큰 응력을 받아 낮은 온도에서 산화피막이 파괴되고 결과적으로 점화가 낮은 온도에서 일어난다.(Fig. 3 참조)

현재 나노 알루미늄 연소에 대한 연구는 다양한 조건(입자 크기, 압력, 산화제 종류 등)에 따른 연소 특성과 입자의 물리적 / 화학적 특성에 대한 연구가 진행되고 있다. Ingenito A. 등은[2] 나노 알루미늄을 이용한 우주 추진체에 대한 연구를 수행하였고, J.P. Foot 등은[3] 알루미늄을

이용한 해수 흡입 수중 추진체에 대한 연구를 수행하였다. Goroshin 등은[7-9] 마이크로 크기의 알루미늄 입자와 공기 산화제 환경에서 해석 및 실험을 진행하였다. 또한 예열영역에서 기상과 고상의 에너지 보존 방정식을 각각 제안하여 기상의 열손실 효과를 포함하였다. 또한 연소 시간 관계식은 Friedman 등의[10,11] 실험결과를 사용하였다. Bidabadi 등은[12-20] 마이크로 사이즈의 알루미늄 입자, 철 입자 등에 대해 공기 산화제 조건에서 1차원 및 2차원 연소해석을 수행하였고 특히 열복사에 의한 효과를 평가하였다. Yang 등은[21-24] 산화제가 공기, 증기, 물, 얼음 환경에서 나노 및 마이크로 알루미늄의 연소 모델링에 대한 연구를 수행하였으며 열평형 상태로 가정하고 기상과 고상의 온도를 동일하게 두었다. 그리고 현재까지의 실험결과를 바탕으로 나노 크기의 입자를 포함하는 연소시간의 관계식과 점화온도 관계식을 제안하였다.

현재까지의 연구들을 바탕으로 국내에서 유사한 연구가 진행되었다. 윤웅섭 등은[25-28] 마이크로 크기의 알루미늄 입자에 대한 CO₂ 레이저를 사용하여 실험적 연구를 수행하고 있으며, 단일 알루미늄 입자에 대해 수치적, 해석적 연구를 수행하고 있다. 본 연구실에서는[29-32] 2008년부터 나노 및 마이크로 크기의 알루미늄 분말과 산화제의 혼합물의 연소에 대한 1차원 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 열평형을 가정한 Yang 등의 연구와는 달리 마이크로 및 나노 알루미늄의 공기 혼합물의 예열영역에서 기상과 기상의 지배방정식을 각각 도출하여 일반화된 지배방정식으로 확장하였다. 그 결과를 실험 및 기존 해석결과와 비교하고 마이크로 및 나노 알루미늄 혼합물의 연소특성을 조사하였다. 또한 실험결과에 비해 과대예측되던 해석결과[22]와 비교해 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

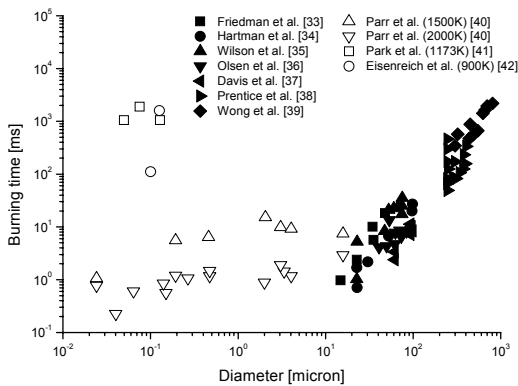


Fig. 2 Burning time of aluminum particle

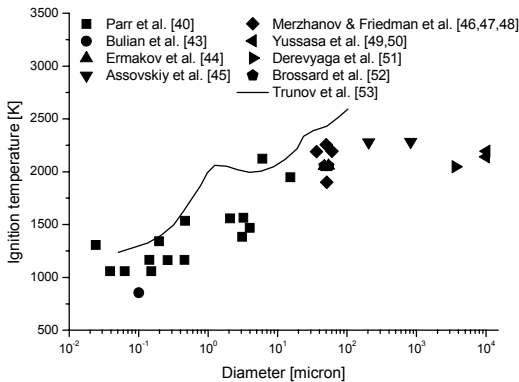


Fig. 3 Ignition temperature of aluminum particle

2. 지배방정식

본 연구에서는 공기 중에서 알루미늄의 연소를 간략화하여 1차원 정상상태로 모델링하여 온

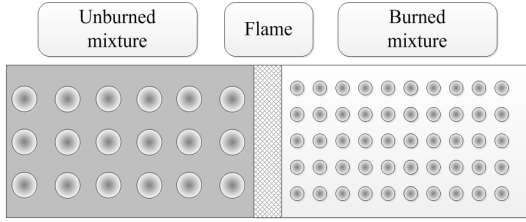


Fig. 4 Physical space

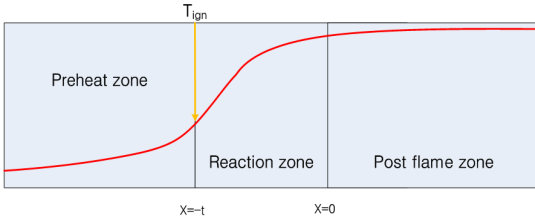


Fig. 5 Computational domain for air reaction

도 분포 및 화염전파 속도를 해석적으로 도출하였다. 동일한 크기의 알루미늄이 공간상 균일하게 분포하고 있다고 가정하였으며(Fig. 4 참조), 입자간의 충돌과 복사에 의한 열전달은 없다고 가정하였다.

위 물리공간을 수학적으로 모델링하기 위해 Fig. 5와 같이 3가지 영역으로 나누었다.

공기와 반응은 1)예열영역 2)반응영역 3)반응 후 영역으로 구분하였다. 예열영역은 반응영역으로부터 열전달에 의해 알루미늄입자 및 산화제(공기)가 가열되는 영역이다. 이 영역에서는 화학반응이 일어나지 않고 연소영역의 높은 열에 의해 가열된다. 반응영역은 실제 화학반응이 일어나는 영역으로 연소에 의한 열이 발생한다. 이 영역의 범위는 온도가 점화온도인 지점에서부터 두께 t 만큼 떨어진 지점까지이며 화염두께는 경계조건을 이용하여 반복계산을 통해 결정된다. 반응 후 영역은 연소 후 영역이다. 점화온도는 지금까지 실험한 결과들을 수식화하였으며 다음 식과 같다.[9]

$$T_i [K] = \exp(0.087 \times \log(2r \times 10^6) + 7.28) \quad (1)$$

2.1 예열 영역 (Preheating zone)

예열영역에서는 화학반응이 일어나지 않는다고 가정하며 희박 연소에 대한 입자의 에너지 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{B_u \left(\frac{m_F}{m_o} \right)}{B_{st} \left(\frac{m_o}{m_o} \right)} \rho_u S_L C_s \frac{dT}{dx} = n_p Nu \cdot 2\pi r \lambda (T - T_s) \quad (2)$$

여기서 Nu 는 Nusselt 수이며, B 는 단위 체적당의 질량, 하첨자 s 는 입자 상태의 물성치를 의미한다. 기체 상태의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_u S_L C_p \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - n_p \cdot Nu \cdot 2\pi r \lambda (T - T_s) \quad (3)$$

여기서 n_p 는 수밀도(단위 체적당 입자 수)를 뜻한다. 위 식들을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 \theta}{dy^2} - \kappa^2 \frac{d\theta}{dy} = \kappa^2 \eta (\theta - \theta_s) \quad (4)$$

$$\frac{d\theta_s}{dy} = \frac{\theta - \theta_s}{\xi} \quad (5)$$

이때 사용된 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$\theta = \frac{T}{T_u}, \theta_s = \frac{T_s}{T_u}, u = \frac{x}{S_L \tau_b} \quad (6)$$

$$\xi = \left(\frac{m_F}{m_o} \right)_{st} \frac{r^2 \rho_a c_s}{3 \alpha C_p \tau_b B_{st}} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{3 B_u \tau_b \alpha}{r^2 \rho_a} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} y \rightarrow -\infty &: \theta = 1 \\ y \rightarrow -\infty &: \theta_s = 1 \\ y = 0 &: \theta_s = \theta_i \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 화염 영역 (Reaction zone)

화염영역에서 연속방정식과 에너지 방정식을 적용하고 앞서 예열 영역에서 사용한 열전달량 Q 를 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_u S_L c_p \frac{dT}{dx} \\ = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{B_u Q}{\tau_b} - n_p Nu \cdot 2\pi r \lambda (T - T_i) \end{aligned} \quad (10)$$

화염 영역에서 에너지 방정식은 예열 영역에서의 에너지 방정식과 유사한 형태를 띠고 있지만 화학반응이 수반되기 때문에 그에 따른 열 발생량을 고려한다. 화염 영역에서 알루미늄 입자는 모두 기화되어 기체 상태로 존재하기 때문에 예열 영역과는 다르게 입자의 에너지 방정식은 별도로 고려하지 않는다. Eq. 10을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2 \theta}{dy^2} - \kappa^2 \frac{d\theta}{dy} = -\mu \kappa^2 (\theta_i - 1) \quad (11)$$

$$\mu = \frac{-B_u Q}{\rho_u C_p (T_{ign} - T_u)} \quad (12)$$

위 식에 대한 경계 조건은 다음과 같다.

$$y=0: \theta|_{0+} = \theta|_{0-}, \frac{d\theta}{dy}|_{0+} = \frac{d\theta}{dy}|_{0-} \quad (13)$$

2.3 연소 가스 영역(Post reaction zone)

연소 가스 영역은 화학반응(연소)이 끝난 이후 영역이며 기체 상태로 고온가스 영역에서 열전달만 존재한다.

$$\rho_u S_L c_p \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (14)$$

위 식을 무차원화하면 다음과 같다

$$\frac{d^2 \theta}{dy^2} - \kappa^2 \frac{d\theta}{dy} = 0 \quad (15)$$

위 식에 대한 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y=0: \theta|_{1+} = \theta|_{1-}, \frac{d\theta}{dy}|_{1+} = \frac{d\theta}{dy}|_{1-} \\ y \rightarrow \infty: \frac{d\theta}{dy} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

화염속도는 예열영역과 화염영역 사이의 $x=t$ 점에서의 열전달량이 같다는 경계조건을 이용하여 도출될 수 있으며, 도출된 식의 해를 구하기 위하여 수치적 방법이 사용되었다.

3. 결 과

3.1 알루미늄 입자의 연소특성

Figure 6은 단일 입자에 대해 입자 크기에 따른 연소속도를 나타낸 결과이다. 연소속도 경향이 입자의 크기가 약 $10\mu m$ 에서 변하는데 이는 공기와 연소반응 시 $10\mu m$ 에서 연소 메커니즘이 확산 지배연소에서 화학반응 지배연소로 변경되기 때문이다.[54] 본 연구의 계산 결과가 기존 실험결과들과 경향이 유사하지만 약간의 오차가 발생한다. 오차는 각 실험데이터의 분산의 범주임을 알 수 있는데 이러한 실험의 분산은 알루미늄의 순도와 산화(passivation) 정도에 의해 발생한 것으로 추측된다.

Figure 7은 당량비에 따른 연소 속도를 나타낸 결과이다. 당량비가 이론 당량비에 근접할수록 연소속도가 증가되며 당량비에 따른 연소속도는 당량비 0.65 ~ 1.0 구간에서 Eq. 17과 같은 근사식으로 표현될 수 있다.

$$S_L = -0.51976 + 1.51035 \times \phi - 0.6624 \times \phi^2 \quad (17)$$

또 본 연구에서는 각 상(알루미늄 입자와 공기)에 대한 에너지방정식을 세워 각 상에 열전도에 따른 온도 차와 그에 의한 열손실을 고려한 결과(검은 실선)와 열손실을 고려하지 않은 결과(사각형 점선+점)를 비교하였다.

열손실을 고려하지 않은 경우가 열손실을 고려한 경우보다 연소속도가 당량비 0.65에서

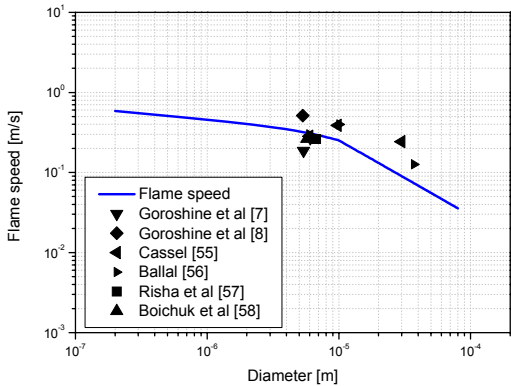


Fig. 6 Flame propagation speed of various particle size (1 atm, $\phi = 0.85$)

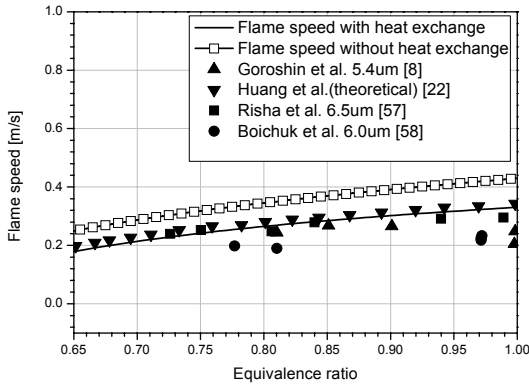


Fig. 7 Flame propagation speed of various equivalence ratio (1 atm, $d_p = 6.5\mu m$)

25% 빠르며, 당량비가 증가할수록 그 차이는 증가한다. 또한 기상과 고상의 열교환을 고려하지 않은 기존의 해석결과[22]에 비교하여 기상과 고상의 열교환을 고려한 본연구의 결과가 상대적으로 더 정확하게 실험결과를 예측하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 각 상의 열전도도 차이가 큰 경우 (공기:26.3 $kW/m\cdot K$, 알루미늄:0.237 $kW/m\cdot K$)에는 각 상의 온도차에 따른 열손실을 고려해야 함을 알 수 있다.

또한 입자크기가 다른 경우 당량비에 따라 약간의 오차를 보이며 이론 당량비 영역($\phi = 1$)으로 갈수록 오차가 증가하는 경향이 있다. 이는 본 모델에서 입자간의 연소열 교환을 무시하였는데 이는 희박연소에 더 적합하기 때문이다. 흥

미있는 것은 실험결과들도 이론 당량비 영역으로 갈수록 실험분산이 커짐을 보여준다. 이는 앞에서도 언급하였듯이 알루미늄의 순도와 산화정도의 영향으로 판단된다.

3.2 나노-마이크로 알루미늄 혼합물의 연소특성

Figure 8은 나노 입자 함량에 따른 연소 속도를 정량적으로 나타낸 결과이다. 마이크로 입자 크기에 대한 영향과 유사하게 나노 입자의 함량이 증가할수록 연소속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 나노입자의 함량의 효과가 마이크로 입자의 함량효과보다 더 크게 연소속도에 영향을 미치고 있다. 연소속도는 나노 알루미늄의 질량분율 0.05~1.0 구간에서 Eq. 18과 같은 근사식으로 표현된다. 이는 나노입자와 마이크로입자의 혼합비율을 이용한다면 다양한 연소속도를 구할 수 있음을 의미한다.

$$S_L = 0.28272 - 0.20312 \times \chi_n + 2.07538 \times \chi_n^2 - 1.20378 \times \chi_n^3 \quad (18)$$

Figure 9, 10에 두가지 입자(100nm, 65 μm)의 혼합비가 다른 혼합물이 당량비가 0.85일 때, 온도 분포 및 화염구조를 나타내었다. Fig. 9는 점화 후 동일 시간에서 나노 크기 알루미늄과 마이크로 크기 알루미늄 혼합물의 함량비에 따른 온도 분포와 화염위치를 나타낸다. 반응율이 빠른 나노 크기 입자의 함량이 많을수록 화염속

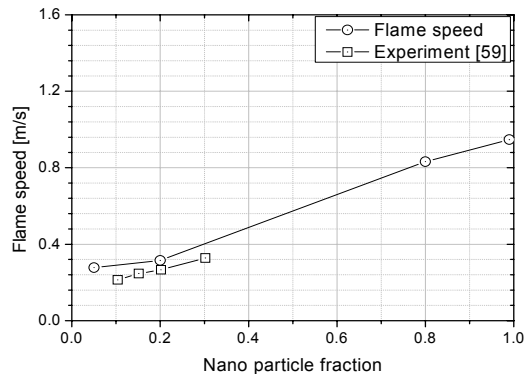


Fig. 8 Flame speed depending on nano aluminum particle fraction(1 atm, $\phi = 0.85$)

도가 빠름을 알 수 있다. 또한 나노 크기 입자의 함량이 높은 경우 화염의 두께가 뚜렷하게 얇은 것을 알 수 있다. Fig 9, 10에서 마이크로 크기 입자의 함량비가 높아질수록 연소속도가 낮아지는 구간이 생겨 변곡점이 발생하며, 함량비가 더 높아지면 변곡점이 사라지며 화염이 분리된 구간이 사라지는 것을 볼 수 있다. 마이크로 크기

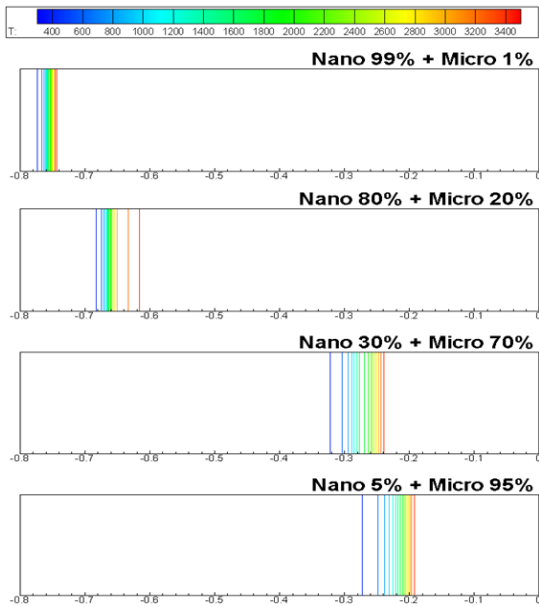


Fig. 9 Temperature contour of various nano aluminum contents at the same burn time; flame propagates from right to left

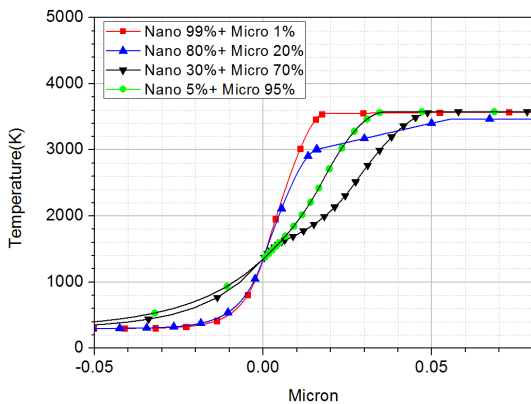


Fig. 10 Flame structure as a function of nano aluminum content; flame propagates from right to left

알루미늄과 나노 크기 알루미늄의 혼합 시 점화 온도가 낮은 나노 크기 입자가 먼저 점화되고 그 연소열을 이용해 점화온도가 높은 마이크로 크기 입자가 점화되는데 나노 크기 입자의 함량이 낮은 경우(5%, 30%) 나노 크기 입자의 연소열이 충분하지 못하여 마이크로 크기 알루미늄을 점화시키는데 오랜 시간이 걸린다. 결과적으로 연소 시간이 짧은 나노 크기 입자와 연소 시간이 상대적으로 긴 마이크로 크기 입자가 서로 다른 영역에서 화염면을 형성하게 되어 총 화염면이 두꺼워진다(separated flame). 반면에 나노 크기 입자의 함량이 높은 경우(80%, 99%) 충분한 연소열로 인해 마이크로 크기 입자가 빨리 점화된다. 따라서 나노 크기 입자와 마이크로 크기 입자의 화염면이 어느 정도 겹치게 되어 전체 화염면이 상대적으로 얇게 된다(overlapping flame). 이러한 관찰은 선진연구자의 결과에서도 보고된바 있다.[9,12,21,59]

나노 크기 입자와 마이크로 크기 입자의 비율에 따라 연소속도가 변하기 때문에 연소 속도가 빠른 나노 입자 함량비의 조절로 연소속도를 제어할 수 있으며 나노 입자보다 발열량이 크고 연소 시간이 상대적으로 긴 마이크로 입자의 함량으로 발열량을 제어할 수 있기 때문에 알루미늄 분말 연소는 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

마이크로 및 나노 크기 알루미늄 혼합 입자와 공기와의 연소 특성을 살펴보았다. 물리적 모델을 1차원으로 가정하였으며 입자와 공기의 열전도도차이에 의한 온도차를 고려한 열손실을 고려하여 다음의 사항들을 알 수 있었다.

- 입자 크기가 작아질수록 화염전파속도가 증가하며 계산결과와 실험결과가 일치하는 것을 확인하였다.
- 본 연구범위 내에서는 당량비가 증가할수록 화염전파속도가 증가한다.
- 각 상의 열전도도 차이가 큰 경우 온도차에

의한 열손실을 고려해야 한다.

- 나노 크기와 마이크로 크기 알루미늄을 혼합하였을 경우 나노 입자 함유량으로 연소 속도를 제어할 수 있음을 확인하였다.
- 나노 크기와 마이크로 크기 알루미늄의 혼합비에 따라 화염두께와 화염구조가 달라진다. 나노크기 입자의 함유량이 낮은 경우 (5%, 30%)는 화염면이 두꺼워지고 분리화염 (separated flame) 구조이다. 나노 함유량이 높은 경우(80%, 99%) 화염면이 얇아지며 중첩화염(overlapping flame) 구조를 나타낸다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 기초연구사업(과제 번호 20090070395) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Richard A. Yetter, Grant Risha, Steven F. Son, "Metal particle combustion and nanotechnology," Proceedings of the Combustion Institute 32, 2009, pp.1819-1838
2. Ingenito, A., Bruno, C., "Using powdered aluminum for space propulsion," Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 6, 2004, pp.1056-1063
3. Foote, J.P., Thompson, B.R., Lineberry, J.T., "Combustion of Aluminum with Steam for Underwater Propulsion," Advances in Chemical Propulsion, edited by G. Roy, CRC Press, Florida, 2002, pp.133-146
4. Edward L. Dreizin "Metal-based reactive nanomaterials," Proceedings of the Combustion Institute 35, 2009, pp.141-167
5. Huang, Y., Yang, V., Yetter, R. A., Risha, G. A. "Analysis of Aluminum Particle Combustion in Different Oxidizer Environments," AIAA 2005-0738, 2005
6. Puri, P., Yang, V., "Thermo-Mechanical Behavior of Nano Aluminum Particles with Oxide Layers," 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2008-938, 2008
7. Goroshin, S., M. Bidabadi, Lee, J.H.S., "Quenching Distance of Laminar Flame in Aluminum Dust Clouds," Combustion and Flame, 105: 147 - 160, 1996
8. Goroshin, S., Fomenko, I., Lee, J.H.S., "Burning Velocity in Fuel-Rich Aluminum Dust Clouds," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 26, 1996, pp.1961-1967
9. Goroshin, S., Kolbe, M., Lee, J.H.S., "Flame speed in a binary suspension of solid fuel particles," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, 2000, pp.2811-2817
10. Friedman, R., Macek, A., Combust. Flame 6:9-19, 1962
11. Friedman, R., Macek, A., Ninth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, 1963, pp.703-709
12. Bidabadi, M., Mooallemi, N., I. Shafieenejad, M. Jadidi. "Combustion of Bimodal Nano/Micro Aluminum Suspension with New Reaction Rate Model," American Journal of Engineering and Applied Sciences 1 (4), 2008, pp.295-301
13. Bidabadi, M., Rahbari, A., "Combustion modeling of the premixed flame propagation," Proceedings of ECTC, 2008
14. Bidabadi, M., Shabani, A., "An analytic model for flame quenching distance in aluminum dust suspensions," Australian Journal of Basis and Applied Sciences, 2(4):1058-1067, 2008
15. Bidabadi, M., Shabani, A., Jadidi, M., "An analytic study of radiation effects on the

- premixed laminar flames of aluminum dust clouds," J. Mechanical Engineering Science, Proc. IMechE Vol. 224, Part C, pp.1679-1695
16. Bidabadi, M., Moallemi, N., Shafieenejad, I., Khalilinejad, R., Novinzadeh, A. B., "Perturbation technique to investigate the role of radiation from flame to dust particle," Australian Journal of Basic and Applied Science, 3(2), 2009, pp.1347-1356
 17. Bidabadi, M., Haghiri, A., Rahbari, A., "Mathematical modeling of velocity and number density profiles of particles across the flame propagation through a micro-iron dust cloud," Journal of Hazardous Materials, HAZMAT-10873, 2009
 18. Bidabadi, M., Rahbari, A., "Modeling combustion of Lycopodium particles by considering the temperature difference between the gas and the particles," Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 45, No. 3, 2009, pp.278-285
 19. Jadidi, M., Bidabadi, M., Hosseini, M. E., "Prediction of laminar flame in aluminum dust clouds with a two-dimensional analytical model," J. Aerospace Engineering, Proc. IMechE Vol. 223, Part G, 2009, pp.915-925
 20. Bidabadi, M., Haghiri, A., Rahbari, A., "The effect of lewis and Damkohler numbers on the flame propagation through micro-organic dust particles," International Journal of Thermal Science 49, 2010, pp.534-542
 21. Huang, Y., Risha, G.A., Yang, V., Yetter, R.A., "Combustion of Bi-Modal Nano/Micron-Sized Aluminum Particle Dust in Air," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, No. 2, 2007, pp.2001-2009
 22. Huang, Y., Risha, G.A., Yang, V., Yetter, R.A., "Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air," Combustion and Flame, Vol. 156, No. 1, 2009, pp.5-13
 23. Sundaram, D.S., Puri, P., Huang, Y., Yetter, R.A., Yang, V., 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA 2009-641, 2009
 24. Sundaram, D.S., Yang, V., Cornell, T.L., Risha G.A., Yetter, R.A., Young, G., "Combustion of aluminum, aluminum hydride, and ice mixtures," 49th AIAA Aerospace Science Meeting include the New horizons forum and Aerospace Explosion, AIAA 2011-603, 2011
 25. Heesung Yang, Jihyung Lee, Kyungmoo Kim, Woongsup Yoon, "Simplified Model for Single Aluminum Particle Combustion," 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA 2009-636, 2009
 26. Heesung Yang, Woongsup Yoon, "Parametric Investigation on the Sensitivity of the Simplified Aluminum Combustion Modeling," 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace, AIAA 2010-958, 2010
 27. Heesung Yang, Woongsup Yoon, "Modeling of aluminum particle combustion with emphasis on the oxide effects and variable transport properties," Journal of Mechanical Science and Technology 24 (4), 2010, pp.909-921
 28. Heesung Yang, Jihwan Lim, Jihyung Lee, Kyungmoo Kim, Woongsup Yoon, "Simplified Modeling of an Aluminum Particle Combustion," Proceedings of KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, 2008
 29. 성홍계, 윤시경, "청정 고에너지 금속 나노입

- 자의 유용성," 대한기계학회저널, 제49권, 제 9호, 통권 346호, 2009, pp.40-46
30. 윤시경, 성홍계, "알루미늄 분말의 유용성과 화염전파 특성," 한국군사과학기술학회, 제15차 유도무기 학술대회, 2009, pp.267-272
 31. 윤시경, 성홍계, "나노 알루미늄-물 혼합물의 수반응 연소 모델링," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.472-475
 32. Shi-Kyung Yoon, Hong-Gye Sung, "Combustion analysis of Nano-Aluminum with water," 3rd Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2011
 33. R. Fridman, A. Macek, *Combust. Flame* 6 (1962) 9 - 19.
 34. K.O. Hartman, in: *Proceedings of 8th JANAF Combustion Meeting*, Vol. 1, 1971, pp.1-24
 35. R.P. Wilson, F.A. Williams, *Proc. Combust. Inst.* Vol. 13, 1971, pp.833-845
 36. S.E. Olsen, M.W. Beckstead, *Journal of Propulsion and Power* 12 (4), 1996, pp.662-671
 37. A. Davis, *Combust. Flame* 7 (4), 1963, pp.359-367
 38. J.L. Prentice, *AIAA Paper*, AIAA-1974-146, 1974
 39. S.C. Wong, S.R. Turns, *Combustion Science and Technology* 52, 1987, pp.221-242
 40. T.P. Parr, C. Johnson, D. Hanson-Parr, K. Higa, K. Wilson, 39th JANNAF Combustion Subcommittee Meeting, December, 2003
 41. K. Park, D. Lee, A. Rai, D. Mukherjee, M.R. Zachariah, *J. Phys. Chem. B* 109 7290, 2005
 42. N. Eisenreich, H. Fietzek, M. Juez-Lorenzo, V. Kolarik, A. Koleczko, V. Weiser, *Propel. Explos. Pyrotech.* 29, 2004, pp.137-145
 43. C.J. Bulian, T.T. Kerr, J.A. Puszynski, in: 31st International Pyrotechnics Seminar, Fort Collins, CO, 12 - 14 July, 2004, pp.327
 44. V.A. Ermakov, A.A. Razdobreev, A.I. Skorik, V.V. Pozdeev, S.S. Smolyakov, *Combust. Explos. Shock Waves* 18, 1982, pp.256-257
 45. I.G. Assovskiy, O.M. Zhigalina, G.P. Kuzhntsov, V.I. Kolesnikov-Svinarev, in: 5th International Microgravity Combustion Workshop, Cleveland, USA, May 18 - 20, 1999
 46. R. Fridman, A. Macek, *Combust. Flame* 6, 1962, pp.9-19
 47. R. Fridman, A. Macek, *Proc. Combust. Inst.* 9, 1963, pp.703-709
 48. A.G. Merzhanov, Yu.M. Grigorjev, Yu.A. Gal'chenko, *Combust. Flame* 29, 1977, pp.1-14
 49. S. Yuasa, Y. Zhu, S. Sogo, *Combust. Flame* 108, 387 - 396, 1962
 50. Y. Zhu, Y. Yuasa, *Combust. Flame* 115, 1998, pp.327-334
 51. M.E. Derevyga, L.N. Stesik, E.A. Fedorin, *Combust. Explos. Shock Waves* 13, 1977, pp.722-726
 52. C. Brossard, A. Ulas, C.L. Yen, K.K. Kuo, in: 16th International Colloquium on the Dynamic of Explosions and Reactive Systems, Krakow, Poland, August, 1997, pp.3-8
 53. M.A. Trunov, M. Schoenitz, F.L. Dreizin, *Combust. Theory Modell.* 10 (4), 2006, pp.604-623
 54. Bazyn, T., Krier, H., Clumac, N., "Evidence for the transition from the diffusion-limit in aluminum particle combustion," *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 2007, pp.2021-2028
 55. Cassel, H.M., "Reports of Investigations 6551," Bureau of Mines, 1963.
 56. Ballal, D.R., *Proceedings of Royal Society London A*, Vol. 385, 1983, pp.21-51
 57. G.A. Risha, Y. Huang, R.A. Yetter, V.

- Yang, "Experimental Investigation of Aluminum Particle Dust Cloud, Combustion Under Various Oxidizing Environments," AIAA Paper, AIAA-2005-0739, 2005
58. L.V., Boichuk, V.G. Shevchuk, A.I., Shvets, "Flame Propagation in Two-Component Aluminum-Boron Gas Suspensions" Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 38, No. 6, 2002, pp.651-654
59. Huang, Y., G.A. Risha, Yang, V. and R.A. Yetter, "Flame propagation in Bimodal Nano/Micro-sized Aluminum Particles/Air Mixtures", 44th Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2006