

열복사에 의한 단일 알루미늄 입자 점화-연소특성 측정

임지환* · 윤웅섭* · 이도형**

Study on the Ignition and Burning Characteristic of Single Aluminum Particle with Thermal Radiation

Jihwan Lim* · Woongsup Yoon* · Do Hyung Lee**

초 록

고체추진제의 첨가제 또는 연료로써 주로 사용되는 알루미늄 단일 입자 연소시험 장비를 제작하고 연소 실험을 수행하였다. 산화 알루미늄으로 피복된 금속입자는 약 30~100 μm 의 크기를 사용하였다. 단일 입자는 Electrodynamic Balance (EDB) 방법에 의해 공중 부양된 상태로, 중력에 의한 영향이 배제되어 금속입자 고정용 또는 측정용 장치들의 접촉에 의한 열손실을 제거시켜 실험 정확도를 높였다. Standard Hyperbolic Electrodynamic Levitator (SHEL) 내에서 부양된 입자에 CO₂ 레이저를 사용하여 점화시킨 후, 입자로부터 방사되는 열복사를 이용한 two wavelength pyrometry를 적용하여 알루미늄 입자 크기에 따른 연소시간, 평균 화염온도, 점화온도, 점화시간을 획득하였으며, 단일 알루미늄 입자의 점화-연소특성을 평가하였다.

Key Words: Aluminum combustion, two wavelength pyrometry, 이색법, Thermal Radiation, Electrodynamic Balance(EDB), Standard Hyperbolic Electrodynamic Levitator (SHEL)

1. 서 론

알루미늄 연소 현상은 액적 연소 현상과 달리 연소 중 생성물의 응축으로 인해 발생된 열로써 연소 기여, 비대칭 화염을 유발시키는 oxide cap의 성장, 연소 종료 시 잔존물이 남는 특징을 갖고 있다. 이에 알루미늄 입자의 연소율은 D² Law을 따르지 않고 Dⁿ Law를 따르게 된다고 알려져 있다[1-5]. 그래서 지수항을 정량화하기 위한 많은 노력들이 이루어져 왔고 이를 이론적

으로 해석하기 위한 연구도 1960년대 이후부터 현재까지도 수행되어지고 있다. 그 중 많은 연구가 실제로 알루미늄이 이용되고 있는 로켓 모터 내의 연소 환경이 아닌 상온의 대기 조건이나 고온로 안에서 이루어졌다[2-9]. 이는 실험적으로 실험 조건 조절이 어렵기 때문에 상대적으로 쉬운 대기나 고온로 그리고 버너 화염 속에서의 변수 제어의 편의성 때문으로 비롯되었다. 이것은 현재까지도 알루미늄 연소 메커니즘에 대한 이해가 완벽하게 이루어지지 않았고 여전히 진행 중이라는 측면에서 바라보면 연소 환경으로써 대기 중이나 버너 화염을 이용한다는 것은 충분히 가치있는 일이다[10].

알루미늄 연소 현상에 대한 기본적인 이해를

* 연세대학교 기계공학부

** 국방과학연구소

연락처, E-mail: dusts@korea.com

도모하기 위해서는 단일 입자에 대한 연구가 수행되어야 함에도 불구하고 이에 대한 연구 자료는 소수에 불과하다. 그 이유는 금속입자를 실험 환경의 제한된 조건에 의해 손실없이 순수한 연소특성을 규명하기 위한 연소 환경을 구현하기가 쉽지 않기 때문이다. Shafirovich et al.은 수 밀리미터 크기 알루미늄을 열전대에 용접하여서 온도를 측정하였고 전열방식으로 입자를 점화시켰다[11-12]. 큰 금속입자의 경우, 열손실을 감안하고 이런 실험방식이 가능하지만, 마이크로미터 크기의 금속입자의 경우 적용이 불가능하다. Sarou-Kanian et al.은 산화제로써 이산화탄소 유동을 만들고 그 위에 밀리미터 크기의 알루미늄을 띄우고, 레이저를 사용하여 점화시켰다. 그리고 연소시간, 연소온도, 액적 크기 변화율에 대해 연구하였다[13]. Melcher et al.은 HTPB 계열 추진체에 마이크로미터 크기의 알루미늄을 첨가하여 연소 시 토출되는 알루미늄을 관찰하여 시간에 따른 액적 크기 변화에 대하여 설명하였다[14]. 위 연구 결과에서는 대류에 의해 얻어지는 열적 효과가 알루미늄 연소 시 더해지기 때문에 순수한 측정값을 얻기가 힘들다.

단일 금속입자의 연소 특성을 관찰하기 위해서는 중력장 내 입자를 외부와 접촉없는 상태로 유지할 수 있어야 한다. Marrion et al.과 Legrand et al.은 전기장을 사용한 방법으로 각각 알루미늄과 마그네슘 입자를 공중에 부양시켜 손실 조건을 제거하고 연소 실험을 수행하여, 산화제 비율과 압력 변화에 따른 점화가능성, 점화지연 시간 그리고 연소 시간을 구하고 간단한 확산화염 모델과 비교하였다[7-8,15]. 그리고 Shafirovich et al.은 역시 전기장을 사용한 방법으로 산화 알루미늄 (Al_2O_3) 보다 낮은 용융점을 갖는 니켈로 피복된 마이크로미터 크기 알루미늄에 대해, 산화피막 함량에 따른 점화지연 시간을 측정하였다. 또한 공기 중에서 티타늄 입자의 연소시간 측정 실험을 수행하였다[9, 16]. 공중에 부양된 상태로 액적이나 이온에 대한 연구가 오래 전부터 이뤄진 반면에 금속입자 연소에 대한 연구는 상대적으로 짧은 역사를 갖고 극히 소수의 제한된 조건에서만 실험이 수행되어 왔다

[17-20]. 금속입자의 점화 및 연소특성 중 입자 크기에 따른 정량적 데이터를 확보하는 것은 향후 실제 연료로써 사용할 시스템의 사양을 결정하는데 중요 설계 자료가 된다. 이 중에서 점화 및 연소온도는 연소기 설계에 있어 중요한 자료임에도 불구하고 측정방식에 있어 접촉식 방법은 액적화된 알루미늄 입자가 측정부에 들러붙어 온도를 왜곡하거나 입자가 작은 경우 접촉하는 것 자체가 불가능하다. 이에 반해 비접촉식에 의한 온도 측정 방식은 물질 표면에서 방사된 열복사를 이용하는 방법으로 고온 영역을 측정하는 것이 적당하다[21]. 또한 기술의 발전으로 반응속도는 열전대에 비해 매우 빨라졌으며 신뢰도도 매우 높아졌기에 최근 연소 특성을 진단하기 위해서 많은 연구에서 이용되어지고 있다 [7-8, 13, 22-26]. 따라서 본 연구에서는 실제 추진기관에서 적용이 가능한 마이크로미터 크기의 알루미늄 입자에 대해, 열복사에 의해 점화 및 연소특성을 측정할 수 있는 장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 동시에 알루미늄 입자의 점화 및 연소 메커니즘의 명확한 이해를 돕고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 알루미늄 입자

알루미늄 입자의 형상은 그 제조 공법에 따라 크게 구형과 침상형으로 구분된다. 본 연구에서는 형상에 의한 영향을 배제하기 위해서 구상의 알루미늄 입자를 사용한다. 순도 99.84%와 Al_2O_3 산화피막 조건을 갖은 알루미늄 입자(Angang Group Aluminum Powder, China)를 사용하였다. 그리고 입자 크기에 따른 특성을 평가하기 위해 약 63-70 μm 와 90-106 μm 의 크기로 분류하였다. (Fig. 1) 촬영된 알루미늄 입자 형상은 완벽한 구상은 아니지만, 여러 종류의 입자의 형상을 평가했을 때, 가장 구상형에 가까운 것으로 판단되어 본 연구에 사용하였다. 또한 구형의 30 μm 알루미늄 입자(국방과학연구소 제공)도 실험에 사용하였다.

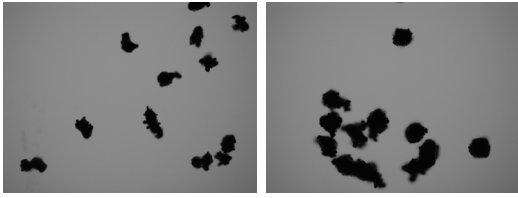


Fig. 1 Aluminum particle, 63–75 μm (left) and 90–106 μm (right) (Angang Group Aluminum Powder, China)

2.2 Standard Hyperbolic Electrodynamic Levitator

입자를 부양시키기 위해서는 자기장, 전기장, 빛, 음향을 이용하는 방법들이 연구되어 왔고, 각각의 방법들은 부양시키고자 하는 물질의 물리적 특성에 따라 선택하게 된다[27]. 이 중에서 알루미늄 입자를 대상으로 하는 본 연구에서는 가장 일반적이고 오랫동안 연구된 전기장을 이용한 방법을 사용한다. 전기장을 이용한 방법은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 중력 반대방향으로 발생된 전기력으로 입자의 중력을 상쇄하여 공중에서 힘의 평형 상태를 유지하게 하는 원리를 이용한다.

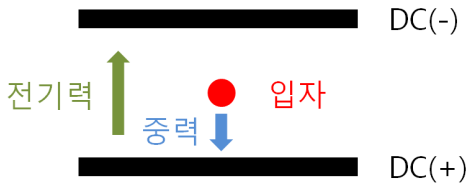


Fig. 2 Particle levitation theory

전기장을 이용한 입자부양 기술 중에서 Paul에 의해 제안된 electrodynamic levitation은 오랜 연구에 의해 변형된 다양한 형태를 가지고 있으며, 이 중 본 연구에서는 널리 사용되어지고 있는 Standard Hyperbolic Electrodynamic Levitator (SHEL)를 제작 및 적용하였다[28].

2.3 Two wavelength pyrometry

대표적인 연소특성인 온도는 접촉식과 비접촉식 측정 방법이 있다[21]. 본 연구에서는 공중에 부양된 마이크로미터 크기 입자의 온도를 측정하기 위해 비접촉식 방법으로써 연소 시 방출되

는 열복사를 이용한 two wavelength pyrometry를 이용하기로 한다[21-26].

입자에서 방사된 spectral blackbody emissive power distribution은 Planck's law(Eqn. 1)를 따르며 Wien's law에 의해 단순화된 식을 바탕으로 빛의 강도의 비(I_1/I_2)와 온도(T)의 관계는 Eqn. 2처럼 표현된다.

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

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

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right) - \ln \left(\frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)} \right) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad \text{Eqn. 2}$$

C_1 : First Planck constant C_2 : Second Planck constant

Two wavelength pyrometry는 ± 100 K 의 온도 오차를 갖는 것으로 알려져 있다[24]. 이는 알루미늄 연소에서 표면의 방사율에 대한 부정확한 정보에 대한 것을 포함하기 때문이다. 하지만 방사율은 온도와 파장에 따라 달라지며, 이에 대한 연구는 1000 K 근방 또는 그 이하 영역에서 이루어지거나, 실험적으로 고온 영역에서 방사율 오차에 의해 약 $\pm 6\%$ 의 온도 오차를 갖는 것으로 알려져 있다[24]. 본 연구에서는 방사되는 빛의 강도를 실시간으로 읽어 들여 방사율을 파장만의 함수가 되게 하였고, 결과 처리의 단순화를 위해 연소 중인 알루미늄 입자를 회색체로 가정하여 파장에 대한 방사율 오차의 영향을 무시하였다. 연소 중 방사되는 빛의 강도는 photomultiplier tube (PMT, H5784-20, Hamamatsu)를 사용하여 전류로 변환하였고, SHEL과 결합하여 온도 측정을 위해 사용하였다.

Figure 3는 열복사를 이용한 온도 측정 장치를 시험 평가하기 위해서, 흑체 복사와 유사한 스펙트럼을 갖는 텅스텐-할로겐 램프를 한국표준과학

연구원의 시험을 통해 획득된 공급 전류 대 색 온도에 대한 결과 자료와 two wavelength pyrometry에 의한 온도 측정값을 비교한 그림이다. 오차가 거의 없음을 확인 후 본 실험에 적용하였다. 이때 넓은 영역에서의 온도측정을 위해서 532 nm 와 780 nm 의 band pass filter에 의해 분리된 두 파장대의 빛을 이용하였다.

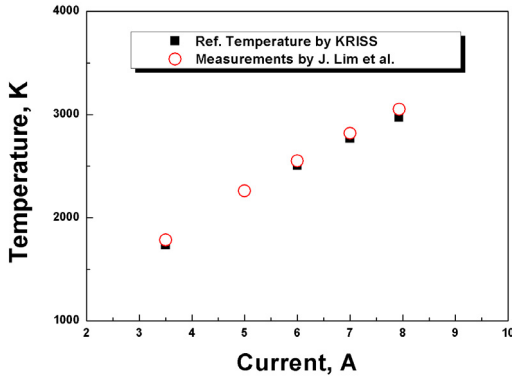


Fig. 3 Comparison with measurements and known temperature of standard tungsten-halogen lamp which is tested by KRISS

2.4 실험 장치

금속입자 연소를 위한 실험 장치는 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 입자부양을 위한 SHEL 챔버, 전기장 생성을 위한 신호발생기 및 증폭기, 금속입자 점화를 위한 열원으로 CO₂ 레이저, 입자가시화를 위한 He-Ne 레이저, 연소시간 측정을 위한 CCD 카메라와 PMT 모듈, 그리고 실험 장치를 제어하고 데이터를 기록할 컴퓨터로 구성된다[28].

SHEL 내 전기장 생성을 위해서 함수발생기(WF1944B, NF Corp.)에서 발생된 직류와 교류 신호는 증폭기(610E, TREK INC.)를 통해 증폭되어 각 전극으로 공급된다. 이때 교류 신호의 주파수는 부양된 입자의 거동 관찰을 통해 적정 수준에서 조정되었다. 그리고 금속입자의 부양상태를 가시화하기 위해 He-Ne 레이저(JDSU)를 사용하였고, 연소시간 측정을 위해 최대 1200 fps 의 초고속 카메라(EX-F1, CASIO)와 PMT 모듈(collimator, 광섬유관, PMT)을 사용하였다. SHEL 내부에 부양된 금속입자를 점

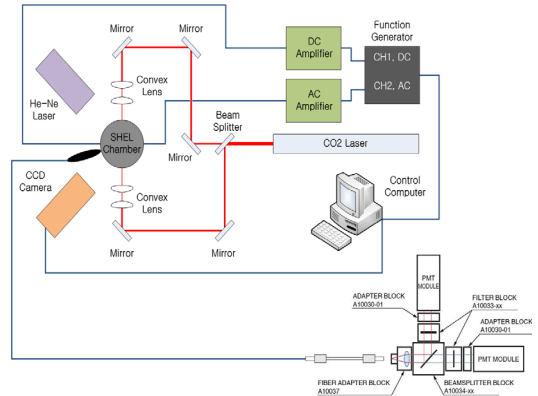


Fig. 4. Experimental apparatus

화시키기 위한 열원으로 30W CO₂ 레이저를 사용하였다. CO₂ 레이저 광이 부양된 금속입자 표면으로 조사될 때, 한쪽으로만 조사될 경우 열영동력에 의한 불안정성이 발생할 것을 대비하여, 레이저 출구 앞에 beam splitter를 두어 광을 분광시키고 ZnSe 렌즈를 사용하여 집광 후, SHEL 양쪽에서 내부로 들어 갈 수 있도록 하였다[28].

교류 전기장(1500~2500V, 60~70Hz)에 의해 형성된 SHEL 내부의 안정적 공간은 직류 전기장의 미세 조정으로 위치 보정을 하면 입자는 안정적 거동을 하게 된다. 그러나 예비 실험에서 완벽한 구형이 아닌 입자는 진동을 하게 되고 연소 시 입자 파열에 의해 기존 관측부를 통한 영상 기록을 어렵게 하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 직류 전극을 사용하지 않고, SHEL 상단 직류 전극을 제거하고 촬영 범위를 넓혀 연소 영상을 기록하였다. 금속입자는 교류 전기장 바로 위에서 미세구멍을 가진 바늘을 이용하여 자유낙하 시켰고, 자유낙하 하는 금속입자는 교류 전기장에 의해 충분히 감속되고 공간 내에서 안정적인 움직임을 하게 되어, 충분히 연소 시킬 수 있었다[28].

2.5 점화 - 연소특성 정의

현재까지 알루미늄의 연소 형태는 점화는 쉽지 않으나 일단 점화되면 급격히 온도가 상승하면서 oxide cap에 의한 비대칭 화염, 파열

(fragmentation) 등의 현상이 있는 것으로 알려져 있다[10]. Figure 5는 알루미늄 입자 연소 시 방출되는 빛의 강도를 측정 후 시간에 따라 연소온도를 계산한 그래프이다. 본 연구에서는 기존 문헌을 참고하여 PMT 출력과 초고속 촬영된 영상 자료 비교를 통해서 PMT 신호가 상승하는 시작점(t_s)으로부터 신호가 다시 바닥상태로 떨어질 때의 지점(t_e)까지의 시간을 총 연소시간(t_b , $t_e - t_s$), PMT 신호 상승 후 정상연소에 도달하기 전에 온도가 급격하게 상승하는 지점(t_i)을 점화시간, 그리고 그 때의 온도를 점화온도(T_i)로 정의한다. 또한 연소 도중 연소생성물인 산화 알루미늄의 강한 열복사가 검출되는 영역을 평균 화염온도(T_{mf})로 정의한다. PMT 신호는 크게 진동하고 있고 이것은 연소율의 변화, oxide cap의 존재, 표면 위에서의 균소 화염에 의한 것이다[7]. 그럼에도 불구하고, 이로부터 유용한 결과를 획득하는 것은 충분히 가능하다[6].

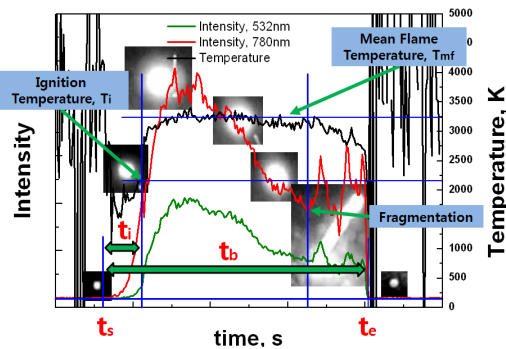


Fig. 5 Definition of ignition and burning characteristic (burning time, mean flame temperature, ignition temperature, ignition time)

3. 실험결과 및 분석

3.1 Burning Time, t_b

Figure 6에서 보면, 부양된 알루미늄 입자는 점화 후 안정적 연소를 보이다가 연소 끝부분에서 과열되면서 불규칙한 움직임을 보이는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 거의 모든 실험에서 관측

되었고, 작은 입자일수록 더욱 빨리 발생하는 것을 볼 수 있었다.

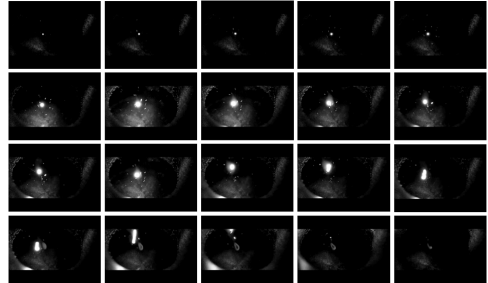


Fig. 6. Burning image of aluminum particle (90-106 μm) by recording sequently with 600 fps

Figure 7은 본 연구에서 획득한 연소시간에 대한 실험 결과를 2004년 Beckstead에 의해서 정리된 기존 연구 결과들과 비교한 그림이다[10]. 이는 1960년대 이후부터 현재까지 경향성을 보이는 데이터들을 선별하여 모은 것이다. 또한 고체추진제 안에서의 점화, 고온로 안에서의 점화, 버너화염 안에서의 점화, 레이저 또는 충격파 등에 의한 점화 방식에 대한 자료를 총 망라하고 있다.

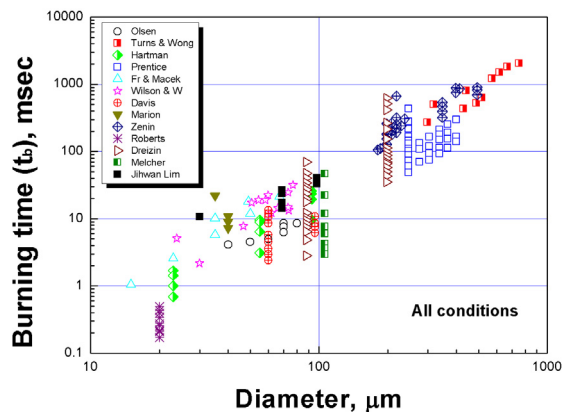


Fig. 7. Comparison with aluminum burning time, measured under a wide variety of conditions and test techniques including 11 ignition sources [11]

Beckstead는 일반 액적연료 현상과 달리 고체

인 알루미늄 연소의 경우 화염대에서의 산화물 응축에 의한 입자표면으로의 열전달, oxide cap의 형성, 연소 종료 후에 남은 잔존물 등의 요인으로 인해 D^2 Law를 따르지 않고 D^n Law를 따르고 그 지수값은 약 1.5~1.8 사이에서 분포한다고 하였다. 그 지수값이 산포된 이유는 각기 다른 연소 환경과 연소 시간의 정의에 따라 조금씩 다를 수 있다[10]. Figure 7에서 실험 방법적 측면에서 보면 Marion et al.의 실험 방식과 본 연구 방식은 동일하지만 다른 크기의 알루미늄 입자를 대상으로 하고 있으므로 직접 비교는 맞지 않다[7-8].

약 $69 \mu\text{m}$ 의 경우, Friedman & Macek의 연구는 프로판을 사용한 평판 화염 내로 입자를 공급하여 연소시키는 방법으로 주변 온도가 약 2500 K 이고, 1/50 초로 촬영된 사진에서 입자 파열이 포함된 시간까지 고려하여서 측정된 값이다. 또한 주변 온도는 버너 냉각수에 의한 열손실을 측정하여 보정된 단일화염온도를 사용하였다[4-5]. 이 때 얻어진 값은 약 21 ms 로, 본 연구에서 얻어진 평균 연소시간 20.4 ms 와 비교해보면 대기 중에서 수행된 본 연구와 달리, 다른 산화제 조건에서 부정확하고 높은 주변 온도 조건에서 비롯된 결과로 본다. Olsen et al.의 연구 역시 버너 화염(수소/산소)을 사용한 고온장 (약 3000 K)에서 연소를 수행하였고, 이로부터 4.3~8.8 ms 의 값을 얻었다. 이들의 연구에서는 구형의 마이크론 크기의 입자를 직접 만들어서 이용하여 정밀도를 높이고, 3종류의 연소시간 평가방법을 사용하여 비교하였으나, 매우 높은 주변 온도로 인해 매우 빠른 연소시간을 획득하게 된다[6]. 또한 Wilsion & Williams 의 실험 결과는 약 17 ms를 보여줬고, 이는 연소 후 입자가 멎는 것을 예방하기 위해서 상당량의 아르곤 가스를 사용한 고압 조건에서의 결과이다[10]. 이 또한 본 연구와 연소 조건이 다르기 때문에 직접 비교는 불가능하다. 약 $98 \mu\text{m}$ 의 경우에서도 Davis는 약 2200~3200 K, 1-204 기압에서, Hartman은 약 3000 K, 25.5 기압에서 대기가 아닌 각기 다른 산화제 조건에서 연소 실험을 수행하였기 때문에 본 연구에서 얻어진 약 36.4

ms 보다 빠른 연소시간을 보이게 된다[2, 10]. 이처럼 해외 연구 사례를 보면, 금속 입자의 어려운 점화성을 극복하기 위해 고온 고압의 주변 환경을 이용했다는 것이 본 연구와 큰 차이점을 갖게 되고, 이것으로부터 이 연구는 외부 영향이 배제된 상황에서 알루미늄 연소 특성 이해에 기여하게 된다.

그리고 본 실험결과에서 얻어진 연소율의 지수값은 약 1.5로 기존 연구 결과와 유사한 것을 확인하였다. (Fig. 8) 약 $30 \mu\text{m}$ 의 경우, 실험 횟수가 부족하기 때문에 부정확도를 포함하고 있고, 정확한 정량화를 위해 추가 실험이 필요하다.

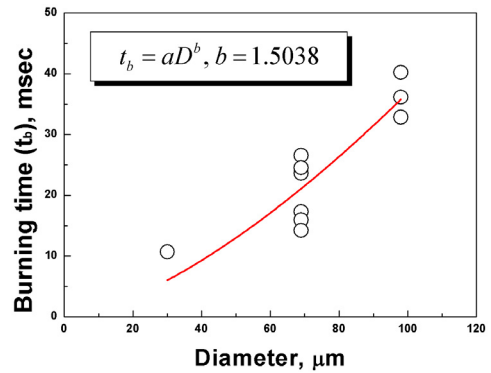


Fig. 8 Burning rate with showing a power law fit in terms of particle diameter

3.2 Effective Mean Flame Temperature, T_{mf}

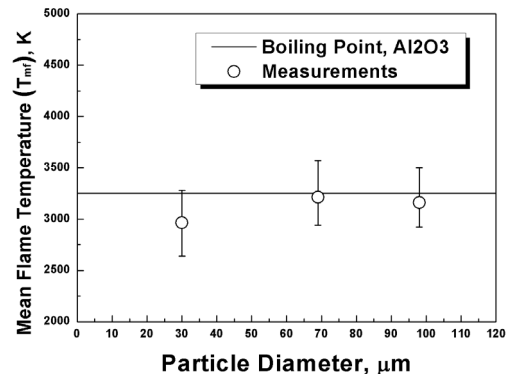


Fig. 9 Effective mean flame temperature (T_{mf}) in terms of particle diameter

알루미늄 연소 도중 표면 밖으로 방사되는 빛은 용해된 알루미늄, 산화 알루미늄, oxide smoke 에서 방사되는 것으로 구분된다. 그 중 산화 알루미늄에서 방사되는 빛의 강도가 가장 강하며 이는 알루미늄 연소 시 매우 빠르게 형성되어 알루미늄 입자 표면에서의 온도 측정을 어렵게 한다[22]. 따라서 점화 직후 급격한 온도 상승 이후 부분은 표면보다 화염의 온도라고 보는 것이 타당하며 실험결과는 입자 크기와 상관없이 산화 알루미늄 기화점인 3250 K 근방에서 형성되는 것을 볼 수 있었다. 현재까지 알려진 알루미늄의 연소 메커니즘에 따르면 화염 온도는 Clausius-Clayperon 방정식을 사용한 산화 알루미늄 라디칼과 산화 알루미늄의 부분압의 함수로 표현되고 액상의 산화 알루미늄의 해리 온도로써 제한을 받는다. 그리고 이것은 기상의 산화 알루미늄이 실험적으로 검증되지 않았기에 기화하지 않고 바로 해리가 발생했다는 추론으로부터 기인한다[10]. 따라서 알루미늄 연소에서는 항상 위 해리 반응이 수반되므로 입자 크기에 상관없이 화염온도가 일정하게 유지되고, 그 온도는 기화점과 동등하거나 낮을 것으로 예상된다. 따라서 본 실험 결과는 측정 방식의 오차를 고려한다면 이에 부합한다고 볼 수 있다.

3.3 Ignition Temperature, T_i

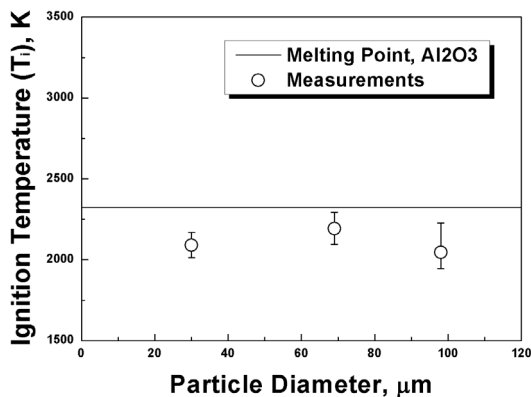


Fig. 10 Ignition temperature (T_i) in accordance with particle diameter

점화온도는 모든 실험에서 산화 알루미늄의 용융점(2345 K)보다 낮게 측정되었다. 이는 알루미늄은 굳이 산화 피막이 녹지 않아도 입자 내부에서의 열팽창율 차이에 의한 기계적 응력차이로 균열이 발생함으로써 알루미늄이 산화제 환경에 일부 노출이 되면서 점화가 될 수도 있다는 연구 결과를 뒷받침한다[29-30]. 그리고 점화온도는 입자크기 30~100 μm 사이에서 거의 차이를 보이지 않았다.

3.4 Ignition Time, t_i

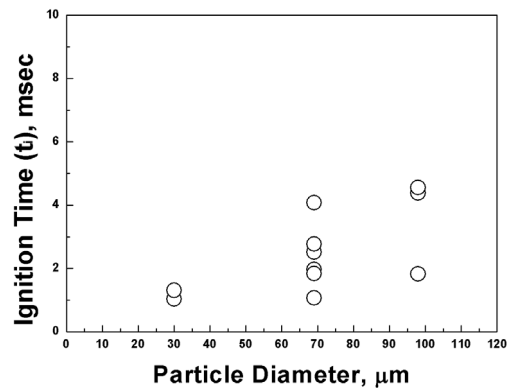


Fig. 11 Ignition time (t_i) in accordance with particle diameter

통상적인 점화 지연시간 (ignition delay time) 은 외부 열원으로부터 에너지가 공급되기 시작해서 점화되기 직전까지의 시간을 의미한다. 하지만 본 연구에서는 SHEL 내부에서 부양된 입자의 고유운동으로 인해 알루미늄 입자는 CO₂ 레이저가 집광된 영역에 아주 짧은 순간만 노출된다. 그리고 찰나에 알루미늄 표면으로 공급된 열에너지는 입자 내부로 매우 빠르게 전달되면서 점화될 수 있는 상태를 만들게 된다. 이 때 소요되는 시간을 점화시간으로 정의하였고, 본 연구에서 측정된 점화시간은 정성적으로 입자크기 클수록 증가하는 것으로 보인다. 이는 추가 실험을 통해 정량화하여, 추후 2차 연소를 목적으로 하는 시스템에서 설계 파라미터로써 이용할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기 중에서 알루미늄 입자의 점화 및 연소현상에 대한 이해를 높이기 위해서, 알루미늄을 전기장을 이용해 공중에 부양시켜 외부의 영향을 차단한 상태에서 연소 실험을 수행하였다. 그리고 연소 중인 알루미늄으로 방사된 열복사를 이용해 온도를 측정하여 점화 및 연소특성을 분석하였다. 알루미늄 입자 연소율은 D^2 Law를 따르며 연소가 진행되었고, 이때의 지수는 약 1.5로 예측되었다. 하지만 방사된 빛을 가지고 연소시간을 측정하는 방법은 산화 알루미늄의 영향을 포함하고 있기 때문에 연소시간 정의에 대한 심도깊은 논의가 추가로 필요할 것으로 본다. 화염온도는 산화 알루미늄의 기화 온도에 의해 제한되는 것을 확인하였다. 또한 측정된 점화온도로부터 산화 알루미늄의 녹는점보다 낮은 온도에서도 점화 될 수 있음을 확인하였지만 입자 크기에 따른 점화온도의 영향을 정성적 및 정량적인 평가를 위해서는 더 많은 실험 결과를 필요로 한다. 입자 크기에 따른 점화시간에 대해서 정성적 평가를 수행하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD100011CD)

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. Davis, A., "Solid Propellants: The Combustion of Particles of Metal Ingredients," Combustion and Flame, Vol.7, 1963, pp.359-367
3. Wilson, R. P. and Williams F. A., "Experimental Study of the Combustion of Single Aluminum Particles in O₂/Ar," Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1971, pp.833-845
4. Friedman, R. and Macek A., "Combustion Studies of Single Aluminum Particles," Ninth Symposium (International) on Combustion, 1963, pp.703-709
5. Friedman, R. and Macek A., "Ignition and Combustion of Aluminum Particles in Hot Ambient Gases," Combustion and Flame, Vol.6, 1962, pp.9-19
6. Olsen, S. E. and Beckstead M. W., "Burn Time Measurements of Single Aluminum Particles in Steam and Carbon Dioxide Mixtures," J. of Propulsion & Power, Vol.12, No.4, 1996, pp.662-671
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, 1996, pp.369-390
9. E. Shafirovich, P. Escot Bocanegra, C. Chauveau, I. Gokalp, U. Goldshleger, V. Rosenband, and A. Gany, "Ignition of Single Nickel-Coated Aluminum Particles," Proceedings of the Combustion Institute, 2005, pp.2055-2062
10. M.W. Beckstead, "A Summary of Aluminum combustion," International Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion, 2004
11. Timothy A. Andrzejak, Evgeny Shafirovich, David G. Taylor, and Arvind Varma, "Apparatus for studies of high-temperature chemical reactions in single particle system," Review of Scientific instruments,

- vol.78, 2007
12. Timothy A. Andrzejak, Evgeny Shafirovich, and Arvind Varma, "Ignition mechanism of nickel-coated aluminum particles," *Combustion and Flame*, Vol.150, 2007, pp.60-70
 13. 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, 2006, pp.220-230
 14. John C. Melcher, Herman Krier, and Rodney L. Burton, "Burning Aluminum Particles Inside a Laboratory-Scale Solid Rocket Motor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.18, 2002, pp.631-640
 15. Benjamin Legrand, Evgeny Shafirovich, M. Marion, C. Chauveau, and I. Gokalp, "Ignition and Combustion of Levitated Magnesium Particles in Carbon Dioxide," 27th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1998, pp.2413-2419
 16. Evgeny Shafirovich, Soon Kay Teoh, and Arvind Varma, "Combustion of Levitated Titanium Particles in Air," *Combustion and Flame*, Vol.152, 2008, pp.262-271
 17. 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
 18. E. James Davis and Periasamy Ravindran, "Single Particle Light Scattering Measurements Using the Electrodynamic Balance," *Aerosol Science and Technology*, 1982, pp.337-350
 19. Mark A. Philip, Fred Gelbard, and Stephen Arnold, "An Absolute Method for Aerosol Particle Mass and Charge Measurement," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.91, 1983, pp.507-515
 20. Mariam Abdou Mahmoud Hamza, "Laboratory Study on the Physical Properties of Sea Salt Aerosol Particles and Model Systems," Ph.D. Thesis, 2004
 21. L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, and Journal McGhee, "Temperature Measurement," John Wiley & Sons LTD, 2001
 22. 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
 23. 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, 1985, pp.486-491
 24. 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
 25. 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
 26. 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
 27. E. James Davis and Gustav Schweiger, "The Airborne Microparticle," Springer, 2002
 28. 임지환, 윤웅섭, 김경무, "EDB에 의해 부양된 단일 금속입자 연소장치 제작 및 연소 실험," 제15차 유도무기 학술대회, 2009

29. Rozenband, V. I. and Vaganova N. I., "A Strength Model of Heterogeneous Ignition of Metal Particles," *Combustion and Flame*, Vol.88, 1992, pp.113-118
30. Gremyachkin V.M., "Theory of Ignition of Metallic Particles," *Combustion, Explosion & Shock Waves*, Vol.19, 1983, pp.259-262