

Al 분말과 Water 혼합물의 연소특성 연구

기완도* · 김광연** · Vladimir Shmelev*** · 조용호**

Combustion Characteristics of Al powder with Water Suspension

Wando Ki* · Kwangyeon Kim** · Vladimir Shmelev*** · Yongho Cho**

ABSTRACT

The basic study for combustion characteristics of micron-sized aluminum powder with water suspension was carried out. Under atmospheric pressure, the combustion characteristics of aluminum powder with water suspension was studied by adjust the equivalent ratio and the density of a mixture which effect on burning rate. Based on atmospheric pressure's result, the device for the combustion characteristics of aluminum powder with water suspension under high-pressure environment was developed. In the pressure range from 2 to 50 atm the effect of pressure to burning rate was same as the case of nano-aluminum with water suspension, but the pressure range from 50 to 70 atm the sharp increase in burning rate was observed. In the experiment of varying the equivalence ratio, the combustion did not proceed in the condition of excess oxidizer (eq = 1.5).

초 록

미크론 크기의 알루미늄 분말과 물 혼합물의 기초 연소 특성 연구를 진행하였다. 대기압 환경에서 연소속도에 영향을 미치는 당량비와 혼합물 밀도를 변화시켜 알루미늄-물 혼합물의 연소 특성을 연구하였다. 이를 바탕으로 고압 환경하에서의 알루미늄 분말과 물 혼합물에 대한 연소 특성을 연구하기 위한 장치를 설계하였다. 고압 환경에서 2~50기압 범위에서는 압력에 따른 연소속도의 영향은 나노 분말의 연소 특성과 동일하였으나, 50~70기압 범위에서는 급격한 연소속도 증가 현상이 관찰되었다. 당량비에 따른 실험에서는 산화제 과잉(eq=1.5) 조건에서는 50기압 이상에서는 연소가 진행되지 않았다.

Key Words: Aluminum(알루미늄), Water(물), Combustion(연소), Burning rate(연소율)

1. 서 론

* (주)마이크로프렌드, 연세대학교 기계공학부

** (주)마이크로프렌드

*** ICP, RAS

† 연락처자, E-mail: kidwolf@hanmail.net

알루미늄은 지구 표면상에서 풍부하게 존재하는 원소 중의 하나로서, 쉽게 구할 수 있고 가격

이 저렴하며 알루미늄이 가지는 원소 자체의 특성으로 인하여 다양한 분야에서 이용되고 있다. 알루미늄은 반응성이 매우 커서 물과 같은 산화제와도 쉽게 반응하지만 일반적인 대기 환경 하에서는 표면을 둘러싸고 있는 산화 피막으로 인하여 화학적으로 매우 안정하다. 또한 상온에서 고체이면서 많은 연소열을 발생하여 단위 체적당 고에너지 밀도를 가지고 있으며 그 연소 생성물이 무해하기에 최근에는 친환경 에너지원으로 주목을 받고 있다. 위와 같은 이유로 알루미늄에 대한 연구가 다양한 방면에서 진행되어 왔는데, 초기에는 주로 고체로켓 모터의 비추력 향상을 목적으로 연구되었으며, 단일입자에 대한 연소 실험과 모델링에 관한 연구가 주를 이루었다[1-4]. 입자의 크기는 마이크론 사이즈 입자에 대한 것이었으나 드물게 나노 알루미늄 입자에 대한 연구도 발표되었다[5,6].

한편, 큰 반응성과 고 에너지 밀도는 군사적인 분야에서 해수를 이용한 추진기관으로도 연구되었다[7,8]. Foote, J. P.[7] 등은 O_2 및 H_2O 산화제를 이용한 균연소 실험을 진행하여 표면온도, 복사에너지를 측정하였으며 Miller, T. F.[8] 등은 가압환경(~27atm.)에서의 H_2O 산화제를 이용한 균연소 실험을 진행하고 비추력을 측정하였다.

연소생성물이 무해하다는 특성은 친환경 에너지원에 대한 연구로도 진행이 되어, F. Franzoni [9] 등은 알루미늄을 물과 반응시켜 수소를 얻고, 이 때 발생하는 연소열을 동력원으로 활용하며 생성된 알루미늄은 태양열과 같은 천연 에너지를 이용하여 다시 알루미늄으로 환원하는 완전 친환경 사이클을 제시하고 이를 위한 알루미늄 연소기의 개념도를 제안하였다.

최근에는 알루미늄과 물을 혼합한 상태에서 연소시켜 수중 추진체로의 응용이 가능하거나 수소 포집 및 친환경 동력원으로 이용을 목적으로 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다[10-12].

국내의 경우, 알루미늄 연소에 대한 연구는 아직 기초 단계이나 최근 들어 단일 알루미늄 입자의 연소 모델에 관한 연구 및 CFD에의 적용, 물과 나노 알루미늄 분말을 혼합한 상태에서의 연소 실험, 또는 마이크론 사이즈 알루미늄 분말에

대한 균연소 실험 등에 대한 연구가 점차 활성화되고 있다[13-17].

본 연구는 초고압 상태에서 마이크론 사이즈의 알루미늄 분말과 물 혼합물의 연소 특성을 바탕으로 추진체 적용 가능성을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 통해 수중 추진체로의 적용 또는 친환경 에너지원으로 확장을 목적으로 한다. 본 실험에서 주요한 인자인 연소속도는 초기 조건, 당량비와 혼합물의 밀도에 의존하며, 고압 환경에서의 연소 시험을 수행하기 위해 압력 용기를 설계하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치의 구성

대기압, 고압 환경 하에서 알루미늄과 물 혼합물의 연소 특성을 연구하기 위해서는 혼합물 샘플과 전기 공급에 의한 점화장치가 필요하다. Fig. 1은 대기압 하에서 연소 시험을 수행하기 위한 개략도이다.

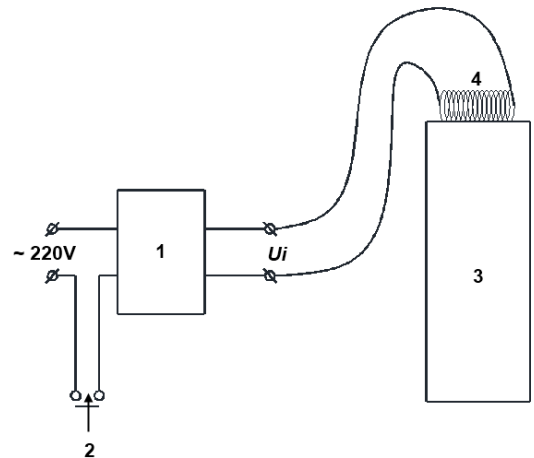


Fig. 1 The scheme of ignition of the sample. 1-autotransformer, 2-switch, 3-sample, 4-nichrome wire

샘플의 제작에는 PAP-2 상용 알루미늄 분말을 사용하였으며, 분말의 크기와 샘플의 기본 사양

은 Table 1에 나타내었다. 분말은 두께 1 μm 의 30 X 30 μm 크기의 박판형상이다. 실험에 사용된 샘플은 Fig. 2와 같다. 외경 12 mm, 높이 40 mm의 종이 튜브에 충전되었으며, 당량비와 혼합물 밀도를 변경하여 실험하였다.

원격 점화를 위해 니크롬선 가열 시스템을 채택하였다. 오토트랜스포머를 통하여 8~10 V의 전압이 공급되고, ~4 A의 전류가 인가되었다. 전원 인가 후 1~2초 내에 샘플이 점화되었고, 이때 니크롬선의 온도는 약 1500K이다. 점화기는 0.35~0.4mm의 니크롬선을 사용하였고, 지름 4mm 나선으로 10회 감아 샘플의 위 표면에 접촉시켰다.

Table 1. Specification of Al powder sample

size, μm	density, g/cm^3	Density, g/cm^3	Oxidizer	Porosity n_v , %
1x30x30	0.17	0.32	H ₂ O	79



Fig. 2 Sample of 12mm diameter with composition Al/H₂O=1:1

고압 환경하에서 실험을 위해 Fig. 3과 같은 실험 장치를 구성하였다. 샘플과 점화 방식은 Fig. 1과 같으며, 고압 환경 형성을 위해 높이 20 cm, 내경 14 cm, 내부 부피는 3 L의 압력 용기를 설계하여 연소 시 발생하는 가스에 의한 압력 변화를 최소화 하였다. 샘플의 상, 하부에 적은 양의 점화보조제를 삽입하여 점화의 시작과 종료를 압력의 증가를 통해 확인할 수 있도록

구성하였다.

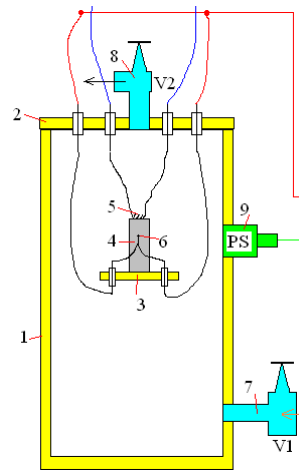


Fig. 3 schematic diagram of pressure chamber 1-Pressure vessel, 2-Cap, 3-Platform, 4-Sample, 5-Ignition wire, 6-Thermocouple, 7-Inlet valve, 8-Outlet valve, 9-Pressure sensor

2.2 대기압 환경에서의 실험

원통형 크리스탈 내부에 샘플을 충전하여 실험을 수행하였으나, 점화에 실패하였다. 그 원인으로 연소 시 발생하는 수소와 그 열로 인한 H₂O의 기화가 연소 영역과 미연소 영역 사이의 간격을 증가시켜 미연소 영역으로의 열전달을 방해하기 때문이다. 연소 안정화를 위해 종이튜브를 제작하여 실험을 수행하였다. 종이 튜브의 경우 Fig. 4에 보이는 것처럼 수소에 의한 매우 밝은 화염을 형성하며 연소가 유지되었다.



Fig. 4 Combustion of aluminum sample in the soft shell with water.

2.2.1 금속 와이어에 의한 연소속도 변화

연소 영역과 미연소 영역의 분리를 방지하기 위해 샘플 중심에 금속 와이어를 삽입하였다. 이를 통해 새로운 결과를 도출할 수 있었다. 금속 와이어를 삽입하였을 경우, 연소속도가 더 빨라짐을 확인하였다(Fig. 5). 금속 와이어의 역할은 국부 열전달을 높임으로써 연소속도를 증가시키는 것으로 파악되었다. 하지만, 와이어가 일정 크기 이상 굵어질 때 연소속도가 감소하는 것은 와이어의 면적 증가로 인해 미연소 영역으로의 열전달을 감소시키는 것으로 판단된다(Fig. 6).

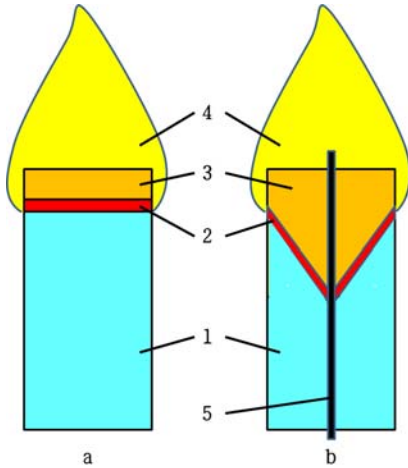


Fig. 5 The scheme of burning the samples in conventional variant (a) and with a wire stabilizer of the combustion wave (b)
1-sample, 2-combustion zone, 3-overheat crust, 4-hydrogen flame

2.2.2 당량비에 따른 연소속도 변화

Figure 6은 금속 와이어의 굵기 변화에 대한 각각의 당량비에 따른 샘플의 연소속도를 나타내고 있다. 당량비 변화에 따른 연소속도는 $\beta = 0.5$ 즉, fuel rich 상태인 당량비가 2일 때, 최대가 되었으며 그 속도는 2 mm/s로 측정되었다. 금속 와이어를 삽입하였을 때 연소속도는 3~4 mm/sec로 빨라졌으며 Fig. 6에서처럼 최대 속도의 영역이 당량비 1 근처로 이동하였다. 이는 금속 와이어 삽입 시, 완전연소율이 증가하여 알루

미늄 분말과 물 혼합물 연소를 통해 더 많은 수소가 발생된다는 의미이다.

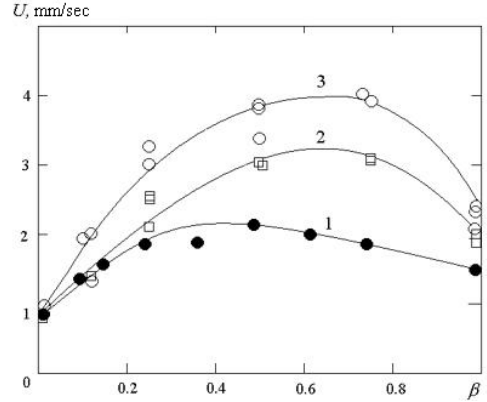


Fig. 6 Dependence of the burning rate from the water-aluminum mass ratio $\beta = M_w/M_{Al}$ without metal wire (1) and with copper wire of 1 mm (2) and 0.5 mm (3) in diameter.

2.3 고압 환경에서의 실험

앞서 언급한 것처럼 고압 환경에서의 실험은 Fig. 3의 실험 장치를 사용하여 수행하였다. 압력 용기 캡에 고정시킨 받침대 위에 Fig. 1의 샘플(직경 12 mm, 높이 40mm) 및 점화장치를 고정시킨 후 압력 용기 내부에 질소를 가압하여 고압 분위기를 형성한다.

2.3.1 압력 조건에 따른 연소속도 변화

Figure 7은 3종류의 당량비에 대하여 1기압에서부터 80기압까지 압력 변화에 따른 샘플의 연소속도 변화를 보여준다. 연소는 점화가 시작된 후 폭연이 발생한 후, 하부로 점차 진행되어 샘플이 다 반응할 때까지 지속되었다.

Figure 7에서 알 수 있듯이 1기압부터 80기압까지 모든 범위에서 당량비가 1일 때(case 1) 연소속도가 가장 빨랐으며 당량비를 2로 증가시킬 경우($\beta=0.5$)에도 연소는 전 영역에서 지속되었다(case 2). 이 때 1기압에서 50기압까지는 당량비 1일 때에 비하여 연소속도가 15~20% 정도 느렸으나, 압력이 점차 증가할수록 연소속도 증가율

이 증가하여 80기압에서는 당량비 1일 때와 동일하였다. 반면, H₂O가 이론혼합비를 초과하여 혼합되었을 때(case 3), 연소속도는 급격하게 줄어들면서 50 기압 이후에는 점화가 이루어지지 않았다. 이는 V. G. Ivanov 등[5]의 나노 알루미늄 물 혼합물의 연소실험 결과와 다른 결과이다. Ivanov 등[5]은 H₂O가 이론혼합비를 초과하여 혼합되었을 때, 연소가 진행됨에 따라 연소 영역 내부에 H₂O가 기화된 수증기의 비율이 더욱 증가하여 당량비 1을 초과하게 된다고 판단하였다. 이로 인하여 완전연소율이 급격히 증가하는 것을 실험으로 증명하였다. 40%의 나노 알루미늄과 60%의 H₂O이 혼합되었을 때 50 기압 조건에서 연소율이 99%에 이르렀으며 50 기압 이상의 조건에서는 연소속도에 대한 압력의 영향이 증가되었다. 나노 입자 알루미늄의 연소속도는 기화된 H₂O의 dynamics의 영향보다 물이 풍부할 경우의 알루미늄 산화반응 kinetics의 영향이 더 큰 것으로 사료된다.

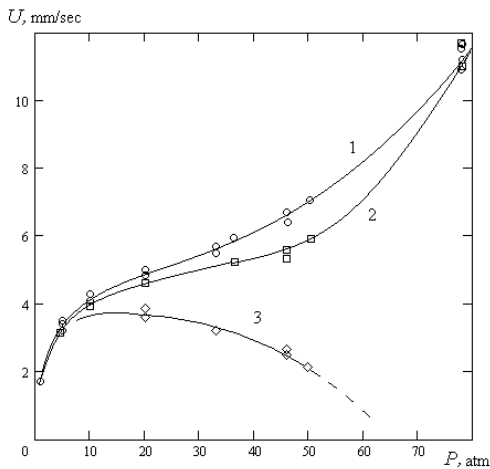


Fig. 7 Effect of pressure on burning rate for a stoichiometric mixture at $\beta=1$ (1), rich mixture at $\beta=0.5$ (2), lean mixture at $\beta=1.5$ (3).

3. 결 론

미크론 사이즈의 박판형 상용 알루미늄 분말과 물을 혼합한 추진제의 연소특성에 관한 연구를 진행하였다. 혼합물의 용기를 종이튜브로 하였을 경우 대기압 하에서도 연소가 진행됨을 확인하였으며 주요한 결과는 아래와 같다.

1. 대기압에서 종이튜브 용기를 이용하여 알루미늄과 물 혼합물을 성공적으로 점화시켰으며 $\beta=0.5$ 근처에서 최고의 연소속도(2 mm/s)가 관찰되었다.
2. 샘플에 금속 와이어를 삽입하면 연소속도가 상승하여 이론혼합비 근처에서 최고의 연소속도(3~4 mm/s)를 얻을 수 있으나 금속 와이어의 굵기에 의한 열전달 영향을 고려해야 한다.
3. 고압 환경하에서는 일정 압력에서 $\beta=1$ 일 때 최고 연소속도를 나타내며, 당량비에 따른 연소속도가 기존의 나노 알루미늄 분말의 연소실험과 반대의 경향을 갖는다.

본 연구는 알루미늄과 H₂O 산화제와의 반응을 통한 수소 발생을 그 배경에 두고 진행되었으며, 실제 시스템에 적용하기 위해서는 정량적 수소 포집에 대한 연구가 추가 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. C. K. Law, "A Simplified Theoretical Model for the Vapor-Phase Combustion of Metal Particles", *Combustion science and technology*, Vol. 7, 1973, pp. 197-212
2. K. P. Brooks and M. W. Beckstead, "Dynamics of aluminum combustion", *Journal of propulsion and power*, Vol. 11, No. 4, 1995, pp. 769-780

3. P. E. DesJardin, J. D. Felske and M. D. Carrara, "Mechanistic model for aluminum particle ignition and combustion in air", *Journal of propulsion and power*, Vol. 21, No. 3, 2005, pp. 478-485
4. J. C. Melcher, H. Krier and R. L. Burton, "Burning Aluminum Particles Inside a Laboratory-Scale Solid Rocket Motor", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 3, 2002, pp. 631-640
5. V. G. Ivanov, O. V. Gavriluk, O. V. Glazkov and M. N. Safronov, "Specific Features of the Reaction between Ultrafine Aluminum and Water in a Combustion Regime", *Combustion, Explosion and Shock waves*, Vol. 36, No. 2, 2000, pp. 213-219
6. A.P. Il'in, A.A. Gromov, V.I. Vereshchagin, E.M. Popenko, V.A. Surgin and H. Lehn, "Combustion of Ultrafine Aluminum in Air", *Combustion, Explosion and Shock waves*, Vol. 37, No. 6, 2001, pp. 664-668
7. J. P. Foote, B. R. Thompson and J. T. Lineberry, "Combustion of aluminum with steam for underwater propulsion", *Advances in Chemical Propulsion*, Chapter 8, 2001
8. Timothy F. Miller and 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
9. F. Franzoni, M. Milani, L. Montorsi and V. Golovitchev, "Combined hydrogen production and power generation from aluminum combustion with water: Analysis of the concept", *Internal Journal of Hydrogen Energy*, 2010
10. G. A. Risha, S. F. Son, R. A. Yetter, V. Yang and B. C. Tappan, "Combustion of nano-aluminum and liquid water", *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 2007
11. G. A. Risha, J. L. Sabourin, S. F. Son, R. A. Yetter, V. Yang and B. C. Tappan, "Combustion and Conversion Efficiency of Nano aluminum - Water Mixtures", *Combustion Science and Technology*, Vol. 180, 2008, pp. 2127-2142
12. T. L. Connell, G. A. Risha, R. A. Yetter, G. Young, D. S. Sundaram and V. Yang, "Combustion of alane and aluminum with water for hydrogen and thermal energy generation", *Proceedings of the Combustion Institute* 33, 2011
13. 김상민, 양희성, 윤용섭, "단일 알루미늄 입자 연소 모델에 따른 2상 알루미늄 분말 연소장 시뮬레이션", *한국 추진공학회 춘계 학술대회 논문집*, 2010
14. 이상협, 임지환, 윤용섭, "물을 산화제로 하는 나노 알루미늄 분말 연소의 압력 민감도 실험", *한국 추진공학회 춘계 학술대회 논문집*, 2010
15. 황용석, 이지형, 이경훈, 김광연, 이성웅, 조용호, "알루미늄 분말 연소시험을 위한 장치 개발", *한국 추진공학회 추계 학술대회 논문집*, 2011
16. H. yang and W.S. Yoon, "Modeling of aluminum particle combustion with emphasis on the oxide effects and variable transport properties", *JMST*, Vol. 24, No. 4, 2010
17. 김광연, V. Shmelev, 고현, 이성웅, 조용호, "금속분말 연소기의 slag 제거기법 개념 설계 및 Water Film 형성 조건 기초실험", *한국 추진공학회 추계 학술대회 논문집*, 2011