알루미늄 분말 연소시험을 위한 장치 개발

황용석*† · 이지형* · 이경훈* · 김광연** · 이성웅** · 여태민***

Development of combustion test device for study of aluminum powder combustion

Yongseok Hwang*† · Jihyung Lee* · Kyunghun Lee* · Kwangyun Kim**
Sungwoong Lee** · Taemin Yeo***

ABSTRACT

The device for studying combustion characteristic of aluminum powder and water was developed. The device has ability to adjust temperature, pressure, and equivalent ratio to some specified value which effect on combustion characteristic of aluminum and water mixture. Methane combustor, water supply device, aluminum powder feeder, and linear combustor are assembled to aluminum combustion test device. Each device has the ability to supply matter to combustor on steady and quantitatively controlled manner and test sequence specified by user can be automatically controlled. The combustion of aluminum powder was observed when integrated device was operated normally.

초 록

알루미늄 분말과 물의 연소 특성을 연구하기 위한 장치를 고안하였다. 알루미늄 분말의 점화를 포함한 연소특성은 초기온도, 압력, 당량비등에 의존하게 되므로 이러한 인자를 변화시켜 연소환경을 적응시킬 수 있는 장치를 설계하였다. 연소 시험 장치는 메탄 연소기, 물공급장치, 알루미늄 분말 정량 공급장치, 선형 형태의 연소기 및 제어장치로 구성되어 있다. 각각의 장치들은 필요한 물질을 정량적으로 공급할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 정해진 시험 과정에 따라 자동으로 제어될 수 있도록 설계되었다. 제작된 장치를 시운전하여 각 구성품이 정상작동하였을 때, 알루미늄 분말이 연소되는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words: Aluminum combustion(알루미늄 연소), Combustion device(연소장치), Energetic material combution(고에너지 물질 연소), Powder feeding system(분체 공급 시스템)

* 국방과학연구소 1본부-6부
** (주)마이크로 프랜즈
*** 삼성테크윈
† 교신저자, E-mail: hpolaris@hanmail.net

1. 서 론

추진 분야에서 알루미늄 분말은 전통적으로

고체 추진제의 에너지를 높이기 위한 첨가물로 사용되었으며, 최근에는 친환경 및 고효율에 대한 관심이 높아지면서 첨가물이 아닌 주 에너지원으로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근에 연구되고 있는 응용분야는 동결된 물과 알루미늄(ALICE)을 연료로 활용하여 우주추진에 활용하거나[1], 수중의 물을 산화제로 활용하고 분말 상태의 알루미늄을 연료로 사용하여 초공동 어뢰와 같은 수중 운동체의 추진동력으로 사용하는 것이다. 알루미늄을 수중 추진 동력으로 사용하는 아이디어는 오래전부터 고려되어 왔으나[2,3], 초공동 현상과 연결하여 분말 형태의 알루미늄을 연료로 사용하고자 노력한 것은 최근의 일로 독일 등의 선진국 등에서 일부 성공한 것으로 추측될 뿐 아직까지 확실히 알려진 예는 없다.

두 응용 분야 모두 알루미늄 분말과 물의 반응에 대한 지식을 바탕으로 설계가 이루어졌다는 공통점이 있으며, 이에 대한 연구가 세계적으로 진행되고 있다. Miller,T.F.등[4] 은 본격적으로 분말 알루미늄과 물을 연소시킬 수 있는 선형적 형태의 연소기와 분말공급장치, 스팀 공급장치를 갖춘 시험장치를 고안하여 압력과 당량비에 따른 연소특성을 관찰하였다. 이와같은 형태의 연소시험장치는 실제 추진기관과 유사한 구조를 가지고 있다는 장점이 있다. 고태호 등[5]은 이와같은 선형적 형태의 연소기에 와류를 이용한 인젝터를 고안하여 연소효율을 높이는 연구를 수행하였으며, 천홍기 등[6]은 버너 형태의 연소장치를 고안하여 마그네슘 입자의 군집연소 현상을 관찰하였다.

본 연구에서는 알루미늄 분말의 연소특성을 연구하기 위해 선행 연구자들과 마찬가지로 선형적 연소기를 설계/제작하였으며, 압력 및 당량비 외에 알루미늄의 연소초기 온도를 조절할 수 있는 메탄 버너를 추가하고 알루미늄 분체의 공급 정밀도를 높인 연소시험장치를 고안하여 성공적인 시운전을 실시하였다.

2. 알루미늄 분말 연소 시험장치

2.1 알루미늄의 연소

본 시험장치에서 알루미늄의 연소과정은 3단계로 이루어진다. 1단계는 알루미늄의 초기 연소환경을 만들어주기 위한 메탄연소기의 연소과정이며 당량비 1의 경우에 (1)의 화학반응이 이루어진다.

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2 \quad (1)$$

2단계는 알루미늄이 분사되어 메탄 연소기에 의해 만들어진 산화물과 반응하는 단계로 (2)의 화학반응이 이루어진다.

$$CO_2 + 2H_2O + 2Al + \beta Al + (7.52+\alpha)N_2 \rightarrow Al_2O_3 + CO + (2-\gamma/2)H_2 + \beta Al + \gamma H + (7.52+\alpha)N_2 \quad (2)$$

3단계는 잔류 알루미늄과 분사된 물이 연소하여 화학반응하는 단계로 (3)과 같이 표현된다.

$$Al_2O_3 + CO + (2-\gamma/2)H_2 + \beta Al + \gamma H + (7.52+\alpha)N_2 + \delta H_2O \rightarrow (1+\beta/2)Al_2O_3 + CO + (2+3\beta/2)H_2 + (7.52+\alpha)N_2 + (\delta-3\beta/2)H_2O \quad (3)$$

따라서, 연소기 전체에서 일어나는 화학반응은 아래 (4)식과 같이 요약된다.

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) + \epsilon Al + \alpha N_2 + \delta H_2O \rightarrow (1+\beta/2)Al_2O_3 + CO + (2+3\beta/2)H_2 + (7.52+\alpha)N_2 + (\delta-3\beta/2)H_2O \quad (4)$$

여기서, $\epsilon = 2+\beta$ 이다.

분사된 알루미늄을 모두 연소시키기 위해 필요한 물의 양은 $\delta_{stoi} = 1.5\epsilon - 3$ 이다.

따라서, Stoichiomatric 조건은 Table 1과 같이 요약된다.

Table 1. Stoichiometric condition

화학종	mole
Methane	1
Air	2
Aluminum	ϵ
Water	1.5ϵ - 3

2.2 연소 시험 장치의 구성

알루미늄 분말 연소 시험을 위한 장치는 메탄 연소기, 알루미늄 분말 공급 장치, 물 공급 장치, 연소기 및 제어계측장치로 구성되어 있다. 각각의 장치는 독립적 모듈로 구성되어 있으며 Fig. 1 과 같이 통합된다.

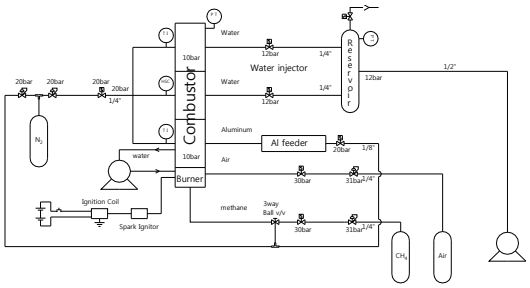

Fig. 1 Schematic of aluminum combustion device

2.2 알루미늄 연소기

알루미늄 연소기는 크게 3단계로 구분된다. 1단계는 메탄 연소기로 식(1)의 화학반응이 일어난다. 다음으로 알루미늄 분사구가 위치하는 1단계 알루미늄 연소부가 있으며 여기서는 식(2)의 화학반응이 발생한다. 1단계로 연소된 알루미늄은 2단계 알루미늄 공급부에서 물과 반응하여 식(3)의 화학반응을 겪게 된다. 이 단계에서 물이 분무의 형태로 공급된다.

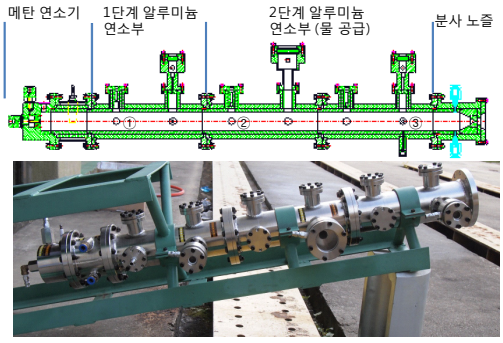

Fig. 2 Aluminum combustor

연소시험 시에 발생하는 물리량의 변화는 6개의 계측포트와 3개의 관측창 및 1개의 압력 전용 계측 포트를 통해 관찰할 수 있도록 하였다. 6개의 계측포트는 주로 열전대와 압력센서를 위해 사용되며, 3개의 관측창은 Pyrometer나 고속촬영을 위한 용도로 사용된다. 각 가시창은 질소를 사용하여 입자가 달라붙는 현상을 방지하도록 설계되었다. 연소기의 내경은 50mm 이며, 길이는 1,115mm 이다.

연소기의 내부 압력은 최종단에 장착된 분사노즐의 크기를 변경함으로서 조절가능하다. 연소기의 벽면은 내열재를 사용하여 단열하였다.

2.3 메탄 연소기

메탄 연소기는 알루미늄 분말이 연소되기 위한 고온을 만들어 주고, 온도 조건을 조절하는 역할을 한다. 메탄이 연료로 공급되며, 공기가 산화제로 공급된다. 메탄 연소기는 안정된 화염을 유지하기 위해 중심부에서 메탄 연료가 공급되고 선회기를 장착한 동축인젝터에서 공기가 산화제로 공급되도록 설계하였다. 연소기의 용량은 2kW와 8kW가 되도록 설계하였으며, 연료 및 산화제의 공급유량을 안정적으로 공급하기 위해 쵸킹 오리피스를 사용하였다. 연소기의 점화는 스파크 점화기를 사용하여 수행하였다. Fig. 3은 설계된 메탄 연소기의 형상을 보여준다.

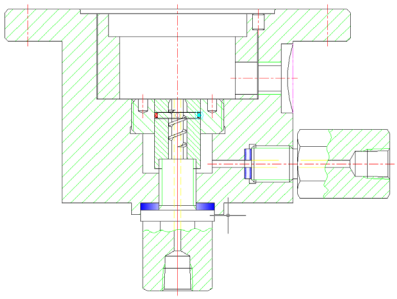

Fig. 3 Methane combustor

2.4 알루미늄 분말 공급 장치

알루미늄 분말을 연소기에서 정상적으로 연소시키기 위해 가장 중요한 것은 분말을 지정된 양만큼 안정적으로 공급하는 것이다. 본 연구에서는 [주]화인테크사에서 개발한 ROVO Feeder를 사용하였다. 이 장치는 분체를 기계적으로 압축하여 Bulk Density를 일정하게 유지함으로써 비교적 정밀한 분체 공급을 실현한다. 공급되는 분말의 양은 장치 내부의 공급 디스크의 회전속도에 의해 결정되며, Fig. 4와 같은 경향을 보인다. 공급장치는 그림에서 확인가능한 것처럼 상당한 선형성과 반복성을 보인다.

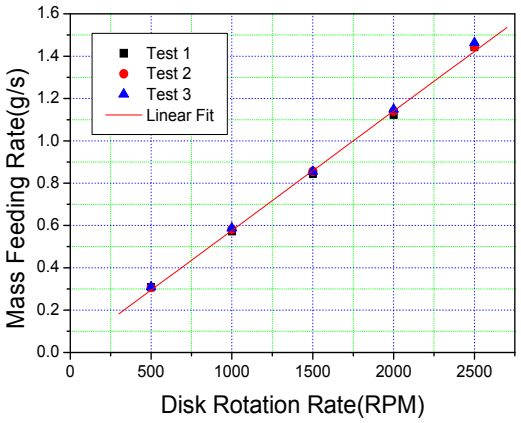

Fig. 4 Performance of aluminum feeder

ROVO Feeder에서 토출되는 분말은 질소를 이송가스로 하여 연소기로 공급된다. 토출되는 분말을 손실없이 안정적으로 공급하기 위해 질소가스로 작동되는 이젝터를 사용하였다.

Fig. 5 Photograph of aluminum feeder

정밀저울을 사용하여 ROVO Feeder의 무게를 계측함으로써 시간에 따라 공급되는 알루미늄의 양을 정량적으로 계측하였다. Fig. 5는 알루미늄 정량 공급장치를 보여준다.

2.5 물 공급 장치

물 공급장치는 수조, 고압펌프, 필터 및 펌프의 맥동을 없애주는 축압기와 유량계 및 인젝터로 구성된다. 고압펌프는 최대 30bar의 압력으로 가압 가능하며, 가압된 물은 인젝터를 통해 연소실로 분사된다. 연소실로 공급되는 물은 연소특성을 증진시키기 위해 압력선회형 인젝터를 통해 미립화되어 공급된다. 압력선회형 인젝터는 0.5 mm 지름의 출구 직경을 가지며 0.32의 유출계수 특성을 갖는다. Fig. 6은 물 공급장치 및 인젝터의 사진이다.

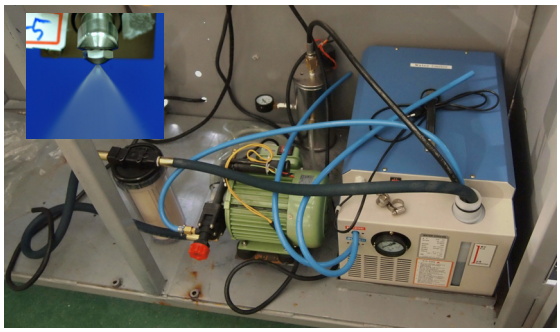

Fig. 6 Water supply device and pressure swirl type water injector

3. 시험장치의 시운전

3.1 연소시험 준비 및 과정

연소시험은 사용자에 의해 미리 설정된 시퀀스를 자동으로 실행하는 방식으로 수행되었으며, 설정된 시퀀스는 Table 2와 같다.

Table 2. Sequence of test run

Event	발생시간(초)	종료시간(초)
스파크 점화	1	31
메탄/공기 공급	2	55
알루미늄 운반 질소공급	12	55
알루미늄 공급	17	45
물 공급	25	55

연소온도를 계측하기 위해 C-Type 열전대를 Fig. 1에 ①, ②, ③으로 표시된 계측 포트에 장착하였다. 시험의 안전성 확보를 위해 연소기의 분출노즐은 제거한 상태에서 시험을 진행하였으므로 연소기 압력은 거의 대기압 상태로 유지된다.

시험에 사용된 알루미늄 분말은 Flake type이며 97%의 분말이 100 micron 이하, 85%가 71

micron 이하의 입도를 가지는 제품을 사용하였다.

3.2 알루미늄 연소 시험 장치의 시운전

Table 2 와 같은 시험 시퀜스를 통해 Table 3의 공급 특성과 Fig. 7과 같은 온도 특성을 얻을 수 있었다. Table 3은 시운전에 공급된 각 물질의 양의 평균을 정리한 것이다. Fig. 7은 시험에서 획득한 ①, ②, ③ 위치의 온도값을 도시한 것이다. 시운전에서는 메탄연소기의 작동과 이로 인한 알루미늄의 점화특성을 관찰하기 위해 물은 연소기 외부로 분사하였다. 그러므로 연소반응에 물은 참여하지 않았다.

Table 3. Supplying result of each matter

메탄 공급량	0.17 g/s
공기 공급량	4.04 g/s
질소 공급량	1.175 g/s
알루미늄 공급량	0.82 g/s
물 공급(연소기 외 공급)	3.13 g/s

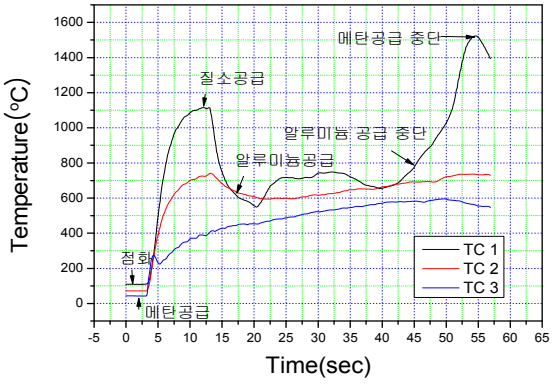

Fig. 7 History of temperature of test run

Figure 7에서 메탄 연소기가 점화된 후 연소실의 ① 위치의 온도는 최대 1100 ℃ 까지 상승하였다. 메탄의 공급량을 기반으로 계산된 당량비는 0.72이고 이때의 이론 단열 화염 온도를 CEA 프로그램으로 계산하면 1597℃이므로 초기온도 20℃를 가정할 경우, 온도를 기준으로 계산된 연소효율은 약 68%이다.

질소가 공급되는 시점에 온도가 감소하는 것을 관찰할 수 있으며, 이후 알루미늄이 공급되면 다시 온도가 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 공급된 알루미늄이 연소반응에 참여하여 연소열을 발생시킨 것을 알 수 있으나 이로 인한 온도 상승분이 작아 공급된 알루미늄이 모두 연소하지는 않은 것을 알 수 있다. 실제 CEA 프로그램을 사용하여 위의 공급 조건에서 예측된 연소온도는 2960K 이다. 이후 알루미늄을 공급 중단하였을 경우, 온도가 다시 상승하여 1500K까지 도달하는 것으로 나타났으나 이는 열전대에 용융되어 들러붙은 알루미늄 및 알루미나 덩어리에 의해 열전달되는 효과와 구분할 수 없기 때문에 신뢰할만한 값은 아닌 것으로 판단된다. 실제로 시험후에 관측된 ① 위치의 열전대에서 상당량의 알루미늄 또는 알루미나 덩어리가 붙어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상은 알루미늄 공급이후 상승하는 온도의 정확도에 대한 신뢰수준도 저하시키는 것으로 판단된다. 알루미늄 공급과 온도 상승 사이의 시간차는 알루미늄 공급 라인 길이와 알루미늄이 이송되는 속도에 의해 발생하는 것으로 보인다.

② 위치에서 계측된 온도는 질소공급이후 감소하였다가 알루미늄 공급이후 지속적으로 상승하였다. 이는 알루미늄의 연소와 더불어 용융된 알루미늄이 열전대에 들러붙는 효과가 모두 작용하여 나타난 결과로 파악된다. 그러나, ②,③ 열전대의 경우, ①과 달리 알루미늄이 붙어 있는 양이 상당히 적었으므로 연소에 의한 온도 상승으로 보는 것이 타당할 것으로 생각된다. 실제로 ③의 경우는 알루미늄 공급 중단된 50초 이후 온도가 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

알루미늄 분말의 연소특성을 관찰하기 위한 연소시험장치를 개발하여 시운전을 실시하였다. 시운전에서 모든 구성품들이 정상적으로 작동하였으며 알루미늄이 일부 반응하여 연소기의 온도가 상승하는 것을 관찰할 수 있었으나 다음과 같은 개선사항을 발견하였다.

- 온도 계측시, 알루미나 및 알루미늄의 융착문제로 인해 비접촉식 계측방법을 활용하는 것이 유리함.
- 연소 연구에 필요한 넓은 범위의 온도 조건을 만들어 주기 위해 메탄 버너의 연소효율을 증가시킬 필요가 있음.
- Fig. 8과 같이 연소시험 후 연소기에 침적된 알루미나를 관찰할 수 있었으며, 이를 처리할 수

있는 방안이 필요함.

Fig. 8 Accumulated slag of alumina

위와 같은 사항의 개선 후, 물의 공급에 의한 연소 특성의 변화 등에 대한 시험을 지속적으로 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Risha, G. A., Connell, T.L., Yetter, R.A., Yang, V. Wood, T.D., Pfeil, M.A., Pourpoint, T.L. and Son, S.F., " Aluminum-Ice(ALICE) Propellants for Hydrogen Generation and Propulsion," AIAA 2009-4877, 2009
2. Geiner, L., Underwater missile propulsion, Compass Publication Inc., 1967
3. Miller, T. F, Walter, J.L. and Kiely, D.H., "A Next-Generation AUV Energy System Based on Aluminum-Seawater Combustion," Autonomous underwater vehicles Proceedings of the 2002 workshops on, 2002.
4. Miller, T. F. and Herr, J. D., "Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water," AIAA 2004-4037, 2004
5. 고태호, 이상협, 윤웅섭, "와류 연소기에 의한 Mg-Steam 화염 안정화," 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, 2011, pp.139-143
6. 천홍기, 임지환, 윤웅섭, "혼합비와 입자 크기에 따른 마그네슘 입자군 연소 화염의 실험," 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, 2011, pp.157-163