



# 알루미늄 분말 연소를 위한 고체 화학수소화물 기반 수소 점화 시스템

박길수<sup>a</sup> · 김태규<sup>a,\*</sup>

## Solid Chemical Hydride-Based Hydrogen Ignition System for Aluminum Powder Combustion

Kilsu Park<sup>a</sup> · Taegy Kim<sup>a,\*</sup><sup>a</sup>Department of Aerospace Engineering, Chosun University, Korea<sup>\*</sup>Corresponding author. E-mail: [taegy@chosun.ac.kr](mailto:taegy@chosun.ac.kr)

### ABSTRACT

The hydrogen torch ignition system has been widely used to ignite a pure aluminum for aluminum powder combustion system because of its simple ignition method. However, the conventional hydrogen torch ignition system has a disadvantage that requires a high-pressure tank to supply hydrogen, which leads to the increase of the weight. In order to solve this problem, a hydrogen ignition system using  $\text{NaBH}_4$ , a solid chemical hydride, was designed in this study. The thermal decomposition of  $\text{NaBH}_4$  was initiated approximately at  $500^\circ\text{C}$  and hydrogen was generated. The parameters affecting the thermal decomposition characteristics of  $\text{NaBH}_4$  were analyzed and the aluminum combustion test was carried out using  $\text{NaBH}_4$ -based hydrogen ignition system to study the applicability to a practical aluminum-combustion propulsion system.

### 초 록

수소 토치 점화 시스템은 순수한 알루미늄을 이용하여 점화가 가능하고 점화 방법이 간단해 알루미늄 연소 시스템으로 많이 사용되고 있다. 하지만 기존의 수소 토치 점화 시스템은 수소 공급을 위해 고압의 수소탱크가 필요해 무게가 무거워지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 고체 화학수소화물인  $\text{NaBH}_4$ 를 이용한 수소 점화 시스템을 설계하였다.  $\text{NaBH}_4$ 는 약  $500^\circ\text{C}$ 에서 열 분해가 시작되고 수소가 발생한다.  $\text{NaBH}_4$  열분해 특성에 영향을 미치는 변인들을 분석하고,  $\text{NaBH}_4$  기반 수소 점화 시스템을 이용해 알루미늄 연소 실험을 수행하여 실제 시스템 적용 가능성에 대해 검증 하였다.

**Key Words:** Hydrogen Ignition System(수소점화 시스템),  $\text{NaBH}_4$  Thermal Decomposition( $\text{NaBH}_4$  열 분해),  $\text{NaBH}_4$  Hydrogen Desorption( $\text{NaBH}_4$  수소 탈착), Aluminum Powder Combustion (알루미늄 분말 연소), Aluminum powder/Air Combustion(알루미늄 분말/공기 연소)

Received 28 December 2018 / Revised 25 April 2019 / Accepted 1 May 2019

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2018년도 추계학술대회(2018. 12. 19-21,

웨스턴 조선호텔 부산) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

## 1. 서 론

금속 연료로 많이 사용되고 있는 알루미늄, 마그네슘 등은 수중에서 해수를 산화제로 사용할 수 있어 초고속 수중 이동체의 연료로 사용하기 위한 다양한 연구가 진행 중이다[1-4]. 특히 알루미늄은 15.485 kJ/g의 높은 에너지 밀도를 가지고 있고, 무독성 연료 생성물로 인해 수중추진 연료로 활용하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다[5]. 하지만 알루미늄은 산화피막인 알루미늄 나노 돌러 싸여있고, 이 산화피막은 2200 °C 이상의 온도에서 용융되기 시작한다[4,6]. 알루미늄을 둘러싸고 있는 알루미늄의 용융점인 2200 °C 이상의 온도에서 산화피막이 제거되고 알루미늄은 산화제와 반응하여 연소가 일어난다. 알루미늄 산화피막의 높은 용융점으로 인해 초기 점화를 위한 많은 에너지를 필요로 하고, 이로 인해 전체 추진시스템의 효율이 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위해 토치점화 방식 또는 알루미늄 분말에 첨가제 혼합 및 코팅 등 별도의 공정을 통해 알루미늄 점화 온도를 낮추고 빠른 점화를 위한 많은 연구가 수행되고 있다.

Fan Li 등은  $\text{NaBH}_4$ 를 첨가한 알루미늄 분말에 500 °C의 스팀을 분사해  $\text{NaBH}_4$  가수분해 반응에서 나오는  $\text{NaOH}$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 반응하는 메커니즘을 이용해 약 500 °C에서 알루미늄을 점화하는 연구를 수행하였다[7]. 하지만 500 °C의 스팀을 만들기 위해 많은 에너지가 필요하고,  $\text{NaBH}_4$ 는 500 °C에서 열분해 되어  $\text{NaOH}$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 반응하기 전에  $\text{NaBH}_4$  열분해 반응이 일어나  $\text{NaOH}$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 반응을 위한 조건을 맞추기 어려운 단점이 있다.

노관영 등은 산화 피막이 제거된 알루미늄 입자를 니켈 등으로 코팅하는 방법을 이용하여 알루미늄 산화막 성장을 억제하는 연구를 수행하였다[8]. 니켈 코팅은 니켈-알루미늄 간 소결 반응으로 인해 알루미늄의 점화 지연 시간을 40% 늦추고 점화 온도를 1450 °C로 낮출 수 있다. 하지만 여전히 1000 °C 이상의 높은 점화 온도를 필요로 하고 제조 공정이 복잡하고 어려운 단점이 있다.

Miller 등은 알루미늄 분말에 고온의 수소/산소 화염(3200 °C)에 알루미늄 분말을 분사하여 점화하는 연구를 수행하였다[9]. 수소 토치 점화 방식은 첨가제 없이 순수한 알루미늄 분말을 사용할 수 있고 스파크 점화를 이용하여 점화 방법이 간단하고 5초 이내에 점화가 가능하여 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 수소 공급을 위한 고압의 수소탱크를 장착해야하기 때문에 시스템의 무게가 무거워 지는 단점이 있다.

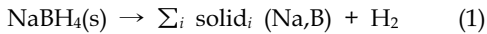
본 연구에서는 44  $\mu\text{m}$  알루미늄 분말을 사용하고 빠른 점화가 가능한 수소 점화 방식을 이용하여 알루미늄 분말을 점화하는 연구를 수행하였다. 기존의 수소토치 점화 방식은 수소를 위해 액화수소 또는 압축수소 등으로 수소를 저장하여 수소를 공급하는 방법을 사용한다. 하지만 액화 수소로 저장할 경우 수소 액화에 많은 에너지가 소요되고, 충전 및 보존 시에 증발(boil-off)의 문제점이 있다[10]. 압축 수소의 경우 체적수소밀도가 낮아 고압으로 저장해야하기 때문에 탱크의 무게가 무겁다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 수소탱크를 사용하지 않고 고체 화학수소화물인  $\text{NaBH}_4$ 를 이용한 수소 점화 시스템을 개발하였다. 고체상태의  $\text{NaBH}_4$ 의 열분해 과정을 통해 발생한 수소 가스를 이용해 수소 점화 시스템을 설계하였다. 본 시스템은 수소 가스 공급을 위한 수소탱크 및 가스라인 등의 부속품이 필요 없어 기존의 액화수소 및 압축수소 방식보다 간단하여 점화 시스템의 경량화 설계가 가능하다.

고체  $\text{NaBH}_4$ 는 500 °C에서 열분해가 시작되고 열분해 시 수소 가스가 발생한다.  $\text{NaBH}_4$  열분해 시 발생한 수소 가스는 자연발화 온도가 500 °C로  $\text{NaBH}_4$  열분해 온도에 의해 점화되어 수소 화염을 발생한다. 이때 발생한 수소 화염에 알루미늄 분말을 분사하여 알루미늄 분말을 점화하였다. 알루미늄 분말 점화를 위한 고체  $\text{NaBH}_4$  기반의 수소점화 시스템의 성능 분석을 위해 산화제 공급 조건에 따른  $\text{NaBH}_4$ 의 열분해 특성을 분석하였다.  $\text{NaBH}_4$  기반 수소 점화 시스템을 이용해 알루미늄 연소 실험을 수행하여 실제 시스템 적용 가능성에 대해 검증하였다.

## 2. NaBH<sub>4</sub>의 열분해

NaBH<sub>4</sub>는 10.6wt.%(weight percent)의 높은 수소 저장 밀도를 가지고 있어 연료전지의 수소공급 장치 등에서 많이 사용되고 있다. 연료전지 수소발생 시스템에서의 수소 발생은 주로 NaBH<sub>4</sub>의 가수분해 반응을 통해 수소를 발생시킨다. 1 mol의 NaBH<sub>4</sub>는 2 mol의 H<sub>2</sub>O와 반응하여 4 mol의 수소가 발생한다. 하지만 상온의 물을 분사하였을 때 가수분해 반응률이 낮아 촉매 또는 산성의 수용액을 첨가해 가수분해 반응을 촉진시킨다[11]. 이러한 가수분해 반응을 위해서는 수용액을 공급해줘야 하므로 별도의 펌프 및 유량 제어장치 등 다양한 부속품이 필요해 시스템이 복잡하다.

가수분해 방법 외에 NaBH<sub>4</sub>의 연소를 통한 열분해를 이용해 수소를 발생시킬 수 있다. 일반적으로 열분해는 Eq. 1과 같이 이루어지며, Pascal 등은 1bar, 534±10 °C의 조건에서 NaBH<sub>4</sub>의 열분해가 이루어지는 것을 확인하였다[12].



NaBH<sub>4</sub>의 열분해는 끓는점 이상의 온도로 가열해주면 된다. 일반적인 NaBH<sub>4</sub>의 녹는점은 400 °C이며, 끓는점은 500 °C이다. 고체 NaBH<sub>4</sub>는 400 °C에서 액화되고 500 °C에서 분해되어 수소가스가 발생한다. NaBH<sub>4</sub>는 열분해 시 고체상 부산물은 Na, B, NaH가 생성되며 가스는 수소만 발생한다[12]. 따라서 NaBH<sub>4</sub> 열분해를 이용한 수소 연소는 Eq. 2와 같이 일반적인 수소연소와 동일한 연소반응으로 볼 수 있다.

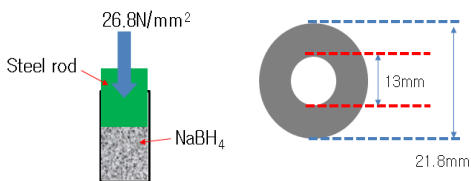
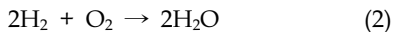


Fig. 1 NaBH<sub>4</sub> grain shape.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 NaBH<sub>4</sub> 그레인 제작

NaBH<sub>4</sub> 열분해 실험을 위해 고체상태의 NaBH<sub>4</sub>를 분말로 분쇄 후 프레스를 이용해 26.8 N/mm<sup>2</sup>으로 압착하였다. 이후 중앙에 홀을 뚫어 중공 형태의 그레인을 제작하였다. NaBH<sub>4</sub> 열분해 시 발생하는 수소가스의 연소를 위해 산화제로 공기를 사용하였다. NaBH<sub>4</sub> 열분해 시 발생하는 수소 가스가 수소 화염으로 확산되기 위해서는 수소 가스가 지나가는 그레인 중앙의 홀 크기를 수소 화염의 소염거리 이상으로 확보해야 한다. 일반적으로 수소 화염의 소염 거리는 0.64 mm이다[13]. 그레인의 직경을 2 mm 이하로 했을 경우 NaBH<sub>4</sub>는 열분해 되어 수소가스는 발생하지만 화염으로 전달되지는 않았다. NaBH<sub>4</sub> 열분해 시 발생하는 수소 가스를 수소 화염으로 확산시키기 위해 충분한 공기가 공급되도록 그레인의 산화제 공급 공간을 충분히 확보해야 한다. 알루미늄 분말 점화 실험에서 NaBH<sub>4</sub> 그레인 홀 중앙으로 Al 분말 이송관이 통과하게 된다. 분말 이송관의 직경은 6.3 mm으로 그레인 홀 직경을 Fig. 1과 같이 13 mm로 제작하여 Al 분말 분사 튜브를 설치했을 때 3.35 mm의 간격을 두어 충분한 양의 산화제가 공급 되도록 제작하였다.

### 3.2 NaBH<sub>4</sub>기반 수소 점화 시스템

제작된 그레인을 Fig. 2와 같이 점화기에 채워 넣고 그레인 전단에 히터를 설치하였다. NaBH<sub>4</sub>를 열분해 하기 위해 FKK사의 SIN 세라믹 점화 히터를 사용하였다. 히터는 65 W의 전력을 사용하여 5초 이내에 1300 °C까지 상승한다[14]. SIN 세라믹 히터를 사용하여 NaBH<sub>4</sub> 그레인을 국부적으로 가열하여 화염을 확산 시키는 방법을 사용하였다. 히터의 발열 면적은 4.9 mm<sup>2</sup>이다. 히터는 NaBH<sub>4</sub> 열분해 시 발생하는 수소가스가 점화되는 이후에 전원 공급을 중단하였다. 수소 연소를 위한 산화제로는 공기를 사용하였으며, 공기 유량은 MFC를 이용하여 제어하였다. NaBH<sub>4</sub> 점화 시 순간적으로 압력이 상승하여 가스가 역류하는 것을

방지하기 위해 MFC와 점화기 사이에 체크밸브를 설치하였으며, 수소화염의 역화를 방지하기 위해 메탈폼을 NaBH<sub>4</sub> 그레인 전단에 설치하였다.

산화제 공급 유량에 따른 NaBH<sub>4</sub>의 연소 특성을 분석하기 위해 Table 1과 같이 공기를 공급해 공기 유량에 따른 열분해 속도 및 수소 발생 속도를 측정하였다. NaBH<sub>4</sub> 그레인의 무게는 30 g이며, 100% 열분해 시 수소 발생량은 약 39 L이다.

### 3.3 알루미늄 분말 연소

NaBH<sub>4</sub> 기반 수소 점화 시스템을 이용하여 알루미늄 점화 가능성 분석을 위한 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 알루미늄 분말은 덕산약품의 알루미늄 분말을 사용하였다. 분말의 입자 크기는 44 μm이다. 알루미늄 분말 분사를 위해 Fig. 3과 같이 분말 분사 장치를 구성하였다. 분말 분사 장치는 가스 가압 방식으로 분사되며, 가압 가스로는 공기를 사용하였다. 공기 공급 유량은 MFC를 이용해 제어하였다.

일정량의 분말을 분사하기 위해 분말탱크 하단부에 스크류가 관통하고 스크류가 회전하면서 분말을 이송가스 라인으로 공급한다. 스크류의 직경은 9 mm이며, 피치는 10 mm이다. 분말 이송량은 스크류의 rpm 조절을 통해 제어하고, 스크류를 통해 이송된 알루미늄 분말은 공기와 혼합되어 점화기 내부로 분사된다.

알루미늄 분말 연소 실험을 위해 Fig. 4와 같이 NaBH<sub>4</sub> 기반 수소 점화 시스템에 알루미늄 분말 분사튜브를 추가로 설치하였다. 알루미늄 분말 분사튜브는 알루미늄 분말의 연소 효율을 높이기 위해 NaBH<sub>4</sub> 그레인 홀 중앙으로 통과하여 그레인 후단의 수소화염에 직접 분사하게 설치하였다. 이 때 알루미늄 분말 분사를 위한 공기와 NaBH<sub>4</sub> 및 수소, 알루미늄 연소를 위한 공기 공급 유량이 다르기 때문에 공기 공급 라인을 각각 설치하였다.

알루미늄 분말 점화 실험을 위해 점화기 내부에 30 g의 NaBH<sub>4</sub> 그레인을 충전하였다. NaBH<sub>4</sub> 열분해 시 발생하는 수소 화염이 일정하게 유지되었을 때 알루미늄 분말을 분사하였다. 알루미

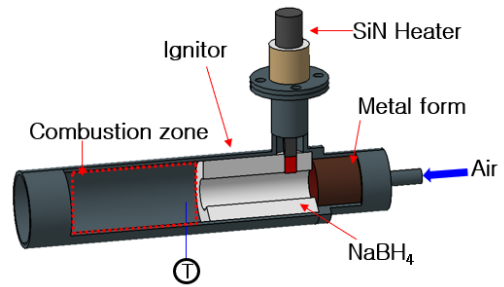


Fig. 2 Schematic diagram of the NaBH<sub>4</sub>-based hydrogen combustor.

Table 1. Thermal decomposition characteristics of NaBH<sub>4</sub> experiment case.

Case	Temperature	Pressure	Flow rate
1	25 °C	0.4 MPa	30 L/min
2			40 L/min
3			50 L/min

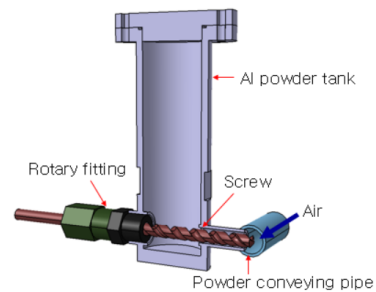


Fig. 3 Powder injection device.

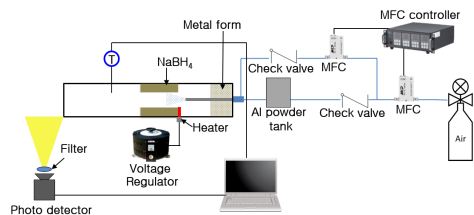


Fig. 4 Schematic diagram of aluminum powder combustion experiment setup.

늄 점화 시 발생하는 AIO 화학종 변화를 Photo detector를 이용해 측정하였다. AIO는 알루미늄

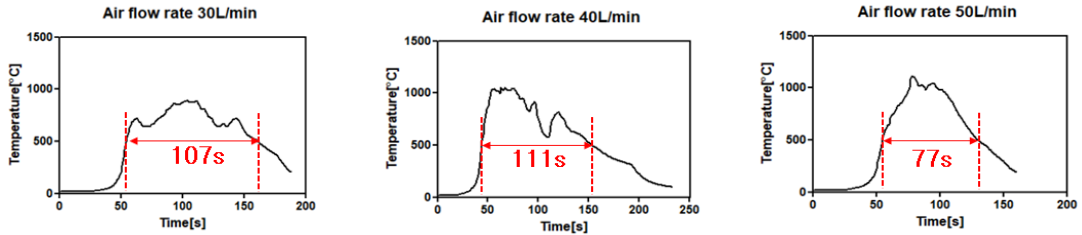


Fig. 5 Combustion time and flame temperature with air supply flow rate.

점화 및 연소 특성을 평가하는데 사용할 수 있는 중요한 중간 연소 생성물이다. AIO의 특성 스펙트럼은 486 nm에서 가장 높은 피크가 발생한다[15]. 본 연구에서는 THORLABS의 DET 10A2에 486 nm 필터를 장착해 AIO 스펙트럼만을 선별적으로 측정하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 NaBH<sub>4</sub> 열분해 특성 분석

NaBH<sub>4</sub>는 히터전원 인가 후 5초 이내에 국부적으로 열분해 되면서 수소가스가 발생한다. 수소가스의 자연발화 온도는 500 °C이다. NaBH<sub>4</sub>는 500 °C에서 열분해가 시작되고, 이때 발생하는 수소가스는 NaBH<sub>4</sub>가 분해되는 열에 의해 바로 발화된다. 수소가스가 발화하면서 NaBH<sub>4</sub> 그레인 내부로 열이 전달되고, NaBH<sub>4</sub>의 열분해 속도가 증가하면서 30초 이내에 수소화염이 발생된다.

NaBH<sub>4</sub>기반의 수소 점화 시스템의 성능 분석을 위해 점화기 내부의 온도변화를 측정하였다. NaBH<sub>4</sub>의 수소 탈착 온도는 500 °C 이내 이므로 점화기 내부 온도가 500 °C 이상에서 NaBH<sub>4</sub>의 열분해 및 수소연소가 이루어진다고 가정하였다. NaBH<sub>4</sub>의 열분해 특성 분석을 위해 산화제 공급 유량에 따른 점화기 내부의 온도변화를 분석하였다. 산화제 공급 유량에 따른 수소 연소시간 및 점화기 내부 온도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 측정 결과 Case 1, 2, 3에서 각각 107초, 111초, 77초로 Case 2 조건인 공기를 40 L/min으로 공급하였을 때 가장 길었다.

Case 1에서의 연소 시간은 Case 2의 결과와 4초 차이로 거의 유사하지만 점화기 내부 온도가

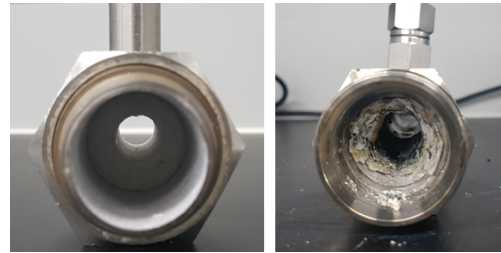


Fig. 6 Photographs of the NaBH<sub>4</sub> thermal decomposition before(left) and after(right).

889.52 °C로 Case 2의 최대 온도에 비해 164 °C 낮은 온도를 보였다. Case 3 조건에서는 최대 온도가 1111.49 °C로 가장 높은 온도를 나타냈지만 연소 시간이 77초로 가장 짧았다. 공기 공급 유량에 따라 연소 시간이 차이를 보이는 것은 공기가 공급되는 조건에 따라 수소연소 특성이 바뀌면서 NaBH<sub>4</sub> 열분해 속도가 달라지기 때문이다.

Fig 6은 NaBH<sub>4</sub> 열분해 후의 잔여물 상태를 보여주고 있다. NaBH<sub>4</sub>는 대부분 열분해 되었으며, 점화기 후단에 미량의 NaBH<sub>4</sub>가 남아있음을 확인하였다. 연소 잔여물을 확인하고 NaBH<sub>4</sub> 그레인의 연소율을 90%라고 가정하였을 때 30 g에서 발생하는 수소 양은 35.14 L이다. 이를 각 연소 시간으로 나누어 계산하면 Case 1일 때 19.70 L/min의 수소가 발생하며, Case 2일 때 18.99 L/min, Case 3에서 27.38 L/min의 수소가 발생했다. 이 때 공연비는 Case 1, 2, 3에서 각각 1.52, 2.11, 1.83이다. 공기와 수소의 이론 공연비는 2.4이므로 이론 공연비에 가장 가까운 결과는 Case 2이다.

산화제 공급 유량에 따른 NaBH<sub>4</sub>의 열분해 특성을 분석한 결과 Case 2에서 연소시간이 가장 길었고, 점화기 내부 온도가 1000 °C 이상으로

유지됨을 확인하였다. 또한 이론에 가장 가까운 공연비를 보여 Case 2 조건이 알루미늄을 점화하기 위한 가장 좋은 조건이라고 판단하였다. 이후 알루미늄 분말 연소에서 Case 2 조건인 40 L/min으로 산화제를 공급하였다.

4.2 알루미늄 분말 연소

산화제 공급 유량에 따른  $\text{NaBH}_4$ 의 열분해 특성 분석 후 알루미늄 분말 연소를 위한 최적의 조건으로 공기 유량 및 알루미늄 분말 공급 조건을 설정하였다. 알루미늄 분말의 안정적인 연소를 위해서는 점화기 내부 온도를 안정적으로 고온으로 유지해야 한다. Case 2 조건에서 100  $^{\circ}\text{C}$  이상의 온도를 40초 이상 유지하는 것을 확인하였으며, 알루미늄 점화를 위해 Case 2 조건인 40 L/min으로 공기를 공급하였다. 알루미늄 분말은 분말 분사장치를 통해 1.5 g/min으로 공급하였다. 이때 알루미늄 분말 분사를 위한 공기는 4.5 L/min으로 점화기 내부로 공급되는 공기는 총 44.5 L/min이다. 먼저  $\text{NaBH}_4$  열분해를 위해 10초간 히터 전원을 공급하였다. 히터 전원인

가 이후 수소 화염이 일정하게 유지되었을 때 알루미늄 분말을 분사하였다.

Fig. 7은 점화기 내부 온도 변화와 알루미늄 연소 시 발생하는 AIO 화학종의 변화를 나타낸 그래프이다. 히터 전원인가 후 20초 이내에 점화기 내부는 500 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였으며, 65초 이후에 950  $^{\circ}\text{C}$ 까지 급격히 상승하고 알루미늄 분사 이후 1000  $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다. 486 nm 필터를 장착한 Photo detector를 이용해 알루미늄 연소 시 발생하는 AIO 화학종의 변화를 측정하였다. 알루미늄 분사 이후 AIO 화학종이 발생하는 것을 확인 할 수 있으며 이를 통해 본 점화 시스템을 이용해 알루미늄이 연소하였음을 확인할 수 있다. Fig. 8은 수소 연소와 알루미늄 연소 화염의 차이를 보여주는 사진으로 알루미늄 연소 시 발생하는 흰색 빛의 화염을 확인하였다.

5. 결 론

수소 토치 점화 시스템을 이용한 알루미늄 점화는 고온의 수소 화염을 이용해 점화하는 시스템으로 구조가 간단하고 알루미늄 분말을 첨가제 합성 및 코팅 등의 별도의 공정 없이 사용 가능하여 알루미늄 점화 방법으로 많이 사용되고 있다. 하지만 기존의 수소 토치 점화 시스템은 수소 공급을 위한 고압의 수소 탱크가 필요하여 시스템의 무게가 무거워지는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 고체상태의  $\text{NaBH}_4$  열분해 시 발생하는 수소가스를 이용하여 알루미늄을 점화하는  $\text{NaBH}_4$  기반 수소 점화 시스템을 개발하였다.

$\text{NaBH}_4$ 는 히터를 이용하여 5초 이내에 열분해가 시작되면서 수소 가스가 발생한다. 발생된 수소 가스는  $\text{NaBH}_4$  분해열에 의해 자연발화 되어 연소된다. 본 연구에서는 히터를 사용하여  $\text{NaBH}_4$ 를 국부적으로 직접 가열하여 수소화염 발생까지 약 30초의 시간이 소요되었다.

$\text{NaBH}_4$  열분해 특성 분석을 위해 산화제 공급 조건에 따른 수소발생 속도 및 수소 화염온도를 분석하였다. Case 2 조건인 40 L/min의 공기를

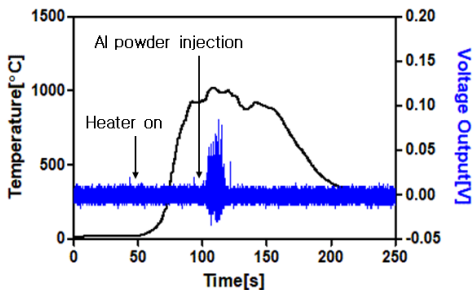


Fig. 7 Internal of ignitor temperature change and variation of the AIO spectrum intensity.

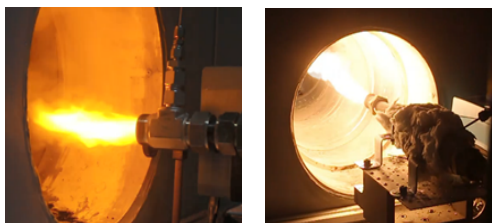


Fig. 8 Photograph of hydrogen combustion(left) and aluminum powder(right) combustion.

공급하였을 때 점화기 내부 온도가 1000 °C 이상으로 40초 이상 지속되었고, 이론공연비에 가장 가까워 알루미늄 점화를 위한 최적의 조건으로 판단하였다. NaBH<sub>4</sub> 열분해 특성 분석 후 NaBH<sub>4</sub> 기반의 수소 점화 시스템을 이용하여 알루미늄 분말 연소 실험을 수행하였다.

알루미늄 분말은 가스 가압방식으로 점화기 내부에 분사하였으며, 알루미늄 분말의 연소 효율을 높이기 위해 수소 화염과 동일 축으로 분사하였다. 40 L/min의 공기를 공급하였을 때 NaBH<sub>4</sub>의 열분해는 약 110초간 지속되었지만 알루미늄 분말을 분사한 경우 160초 이상 점화기 내부 온도가 500°C 이상을 유지 하였다. 이는 NaBH<sub>4</sub> 열분해가 종료된 이후에도 알루미늄 연소가 유지되었음을 확인 할 수 있다. 또한 알루미늄 점화 시 발생하는 AIO 화학종 변화를 Photo detector를 이용해 측정해 알루미늄이 성공적으로 점화되었음을 확인하였다.

본 연구에서는 알루미늄 분말 연소를 위한 NaBH<sub>4</sub> 기반 수소 점화 시스템을 설계하였고 알루미늄 연소 실험을 통해 간단하며 빠른 점화가 가능한 새로운 연소 시스템의 성능을 검증하였다. 본 연소 시스템은 수소 탱크가 필요 없고, 65 W의 낮은 에너지로 1분 이내에 알루미늄 분말 점화가 가능한 연소 시스템으로 실제 시스템에 적용이 가능함을 확인하였다.

#### References

1. Timothy F. Miller, Jeremy L. Walter, Daniel H. Kiely, "A Next-Generation AUV Energy System Based on Aluminum-seawater Combustion", *Proceeding of the 2002 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, San Antonio, Texas, USA, pp. 111-119, June 2002
2. LiYa Huang, ZhiXun Xia, JianXin Hu, QianWen Zhe, "Performance study of a water ramjet engine", *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, No. 4, pp. 877-882, 2011.
3. Gabriel D. Roy, *Advances in Chemical Propulsion : Science to Technology*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S.A., 2001
4. G.A. Risha, S.F. Son, R.A. Yetter, V. Yang, B.C. Tappan, "Combustion of nano-aluminum and liquid water", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 2, pp. 2029-2036, 2007.
5. Baozhong Zhu, Fan Li, Yunlan Sun, Qichang Wang, Yuxin Wu, Zicheng Zhu, "The effects of additives on the combustion characteristics of aluminum powder in steam", *RCS Advances*, Vol. 7, No. 10, pp. 5725- 5732, 2017.
6. Amy Corcoran, Stefano Mercati, Hongqi Nie, Massimo Milani, Luca Montorsi, Edward L. Dreizin, "Combustion of fine aluminum and magnesium powders in water", *Combustion and flame*, Vol. 160, No. 10, pp. 2242-2250, 2013
7. Fan Li, Baozhong Zhu, Yunlan Sun, Wei Tao, "Hydrogen generation by means of the combustion of aluminum powder/sodium borohydride in steam", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 6, pp. 3804-3812, 2017.
8. Lee S.H., Noh K.Y., Yoon W.S., "Experimental studies on the ignition characteristics of nickel-coated aluminum powder with size distribution and oxidizer conditions", *44th KSPE Spring Conference*, pp. 250-255, 2015.
9. Timothy F. Miller, John D. Herr, "Green rocket propulsion by reaction of Al and Mg powders and water", *40th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Fort Lauderdale, Florida, U.S.A., AIAA2004-4037, July 2004
10. Akihiro Nakano, Tetsuhiko Maeda, Hiroshi

- Ito, Masao Masuda, Yoshiaki Kawakami, Manabu Tange, Toru Takahashi, Keiichi Nishida, "Study on absorption/desorption characteristics of a metal hydride tank for boil-off gas from liquid hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 6, pp. 5056-5062, 2012.
11. Sim J.H., Kim T.G., "Accelerated hydrolysis of solid-state  $\text{NaBH}_4$  by injecting  $\text{NaHCO}_3$  solution for hydrogen generation", *Applied Energy*, Vol. 160, No. 1, pp. 999-1006, 2015.
12. Pascal Martelli, Riccarda Caputo, Arndt Remhof, Philippe Mauron, Andreas Borgschulte, Andreas Zuttel, "Stability and Decomposition of  $\text{NaBH}_4$ ", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 114, No. 15, pp. 7173- 7177, 2010.
13. D.R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S.A., 2000
14. "SNx igniters", retrieved 18 Aug. 2017 from <https://www.plug.fkk-corporation.com>
15. Yu'nán ZHOU, Jianzhong LIU, Daolun LIANG, Wei SHI, Weijuan YANG, Junhu ZHOU, "Effect of particle size and oxygen content on ignition and combustion of aluminum particles", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 30, No. 6, pp. 1835-1843, 2017.