

아마추어 소형로켓 점화기 성능 향상을 위한 실험적 연구

심주현* · 임승빈* · 박상섭* · 박완주* · 이진성* · 최재원* · 홍주현* · 채재우**

A Experimental Study for Improving Performance of Igniter for Amateur Small Rockets

Juhyen Sim* · Seungvin Lim* · Sangsub Park* · Wanju Park* · Jinsung Lee*
Jaewon Choi* · Juhyun Hong* · Jaeou Chae**

ABSTRACT

Inha Rocket Research Institute has made the igniter that is combination of black powder and PVA polymer for ignition small rocket. But recent igniter is not satisfy because of the performance of igniter is not identified. So, we confirmed requirement of igniter by comparing of ratio of black powder and PVA through experimental method. Especially we studied with ignition temperature for propellant and stable combustion pressure that is requirements of propellant. We can know the tendency of combustion properties by ratio of oxidizer and combustion catalyst through changing of temperature and pressure of exhaust gas of igniter.

초 록

현재 인하 로켓 연구회에서는 소형 로켓 모터 점화를 위해 흑색화약 및 PVA수지를 혼합하여 점화기를 제작하고 있다. 하지만 제작 과정의 모호함으로 인해 그 성능이 일정하지 않아, 점화기로서 부족한 점으로 지적되고 있다. 따라서 흑색화약 및 PVA수지의 혼합비에 따른 연소 특성을 파악하여 추진제 점화기 요구 조건 충족 조건을 실험적으로 확인하였다. 특히 추진제 점화기의 요구 조건인 추진제 점화 온도 및 안정 연소 압력 조성에 대하여 중점적으로 다루었으며, 산화제와 연소 촉매의 비율에 따른 연소 가스의 온도 및 압력 변화를 통해 그 경향성을 알 수 있었다.

Key Words: Igniter(점화기), Black Powder(흑색화약), Small Rocket(소형 로켓),

1. 서 론

1.1 개요

* 인하대학교 로켓 연구회
(Inha Rocket Research Institute, IRRRI)
연락처, E-mail: Simkslv.nana@gmail.com

** 인하대학교 로켓 연구회 지도교수

현재까지 인하 로켓 연구회에서는 흑색화약
과 PVA-Methanol(Polyvinyl Acetate - Methano
l)을 혼합·성형한 뒤 건조시켜 니크롬선을 이용

해 점화시키는 방식을 적용한 점화기(igniter)를 소형 로켓 점화에 사용해 왔다. 하지만 제작 공정 및 흑색화약과 PVA-Methanol의 혼합 비율이 명확하지 않아 제작된 점화기의 성능이 제작자 및 제작 시기에 따라 변화하기 때문에 일정한 성능을 갖춘 점화기 제작이 어려웠다. 이와 같이 점화 실패로 인한 발사 지연 사례가 자주 발생하였으며, 엔진 점화 여부를 정확히 알 수 없어 발사장에 접근하지 못하는 위험한 상황도 종종 발생하였다. 따라서 본 로켓 연구회에서는 기존 점화기의 신뢰도 향상을 위한 성능 개선을 위해 점화기 조성물의 성분 조성에 따른 연소 특성에 대해 실험을 통해 확인하였다.

1.2 점화기의 설계 요구 조건

고체 추진제 로켓이 제대로 점화작동하기 위해서 점화기의 역할이 매우 중요하다. 점화기는 우선 짧은 시간동안 추진제 그레인 표면온도를 추진제의 점화온도이상으로 가열해 주어야 할 뿐만 아니라 연소실 내부압력을 안정연소에 필요한 수준이상으로 올려주어야 한다. 또한 사용자가 입력한 신호에 정확히 반응해야 하며, 쉽게 부서지지 않고 요구 기간 동안 점화 성능이 유지되어야 한다. 물론 외부의 충격이나 정전기에 도 안전 수치 이상 견뎌낼 수 있어야 한다[1].

따라서 점화 특성만 고려해 볼 때 점화기는 고온의 가스뿐만 아니라 압력상승에 충분한 양의 가스를 발생해야 한다. 본 논문에서는 이 두 조건에 대해서 중점적으로 살펴볼 것이다.

1.3 흑색 화약

일반적으로 아마추어 소형 로켓에서 사용하는 점화기는 흑색화약을 주로 사용하고 있다. 흑색 화약은 화약류 중 가장 오래 전에 발명되어 800년 이상 사용되어 왔고, 19세기 말경까지는 유일한 화약으로 사용되기도 했다. 표준조성은 질산칼륨(KNO₃) 75 wt%, 황(S) 15 wt%, 목탄(C) 10 wt%이며 각각 질산칼륨 40~80%, 황 3~30%, 목탄 10~40%의 범위로 배합하면 정상적인 연소가

일어난다. 하지만 인하 로켓 연구회 점화기의 경우 흑색화약 분말과 이들을 하나의 덩어리로 결합하는데 PVA-Methanol을 Binder로 사용하기 때문에, PVA는 유기물질로서 목탄(C)과 더불어 연료 역할을 하게 되어 표준조성을 그대로 적용할 경우 전체적인 점화 성능 및 연소 특성이 저하 된다. 따라서 PVA의 혼합 비율을 최소로 하면서 점화기의 기계적 성질이 우수한 혼합 비율을 찾아야 한다.

2. 본 론

2.1 고체추진제 모터 사양 및 점화 온도

현재 본 로켓 연구회에서 사용하고 있는 모터의 제원은 Table 1과 같으며 Fig. 1은 추진제 점화 온도 측정 실험의 개략도 이다.

Table 1. Specification of IRRI SRM

| | |
|--|------------------------|
| Fuel | Aluminum |
| Oxidizer | Sodium Chlorate |
| Binder | Epoxy resin |
| Burning Time | 0.9 sec |
| Grain configuration | tapped tube |
| Inner Volume (up to exit of Nozzle) | 41,094 mm ³ |

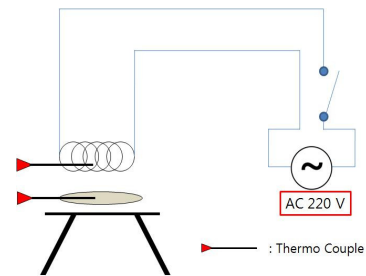


Fig. 1 Schematic diagram of measurement of ignition temperature of solid propellant of IRRI

Inner Volume은 고체 추진제 연소실의 공허 용적을 뜻하며 노즐 출구까지의 부피를 말한다. 인하 로켓 연구회의 고체 추진제는 내부 연소형 그레인으로서 그레인 형상의 특성상 점화기

는 연소실 안쪽 윗부분에 장착된다. 이는 점화기 연소 후 생성된 연소가스가 노즐을 통해 나가는 과정에서 추진제 연소실 내부에 끌고루 퍼져 추진제 표면이 전체적으로 점화가 시작되기 위함이다. Inner Volume은 점화기의 연소로 발생한 연소가스가 채워질 공간으로 추진제의 초기 연소 압력을 결정짓는 중요한 변수가 된다. 따라서 점화기의 연소가스 발생량(Volume)을 알면 보일의 법칙과 부분압의 원리를 이용해 점화기 연소를 통한 추진제 연소실의 초기 압력을 유추할 수 있다.

추진제 점화 온도는 온도를 약 800℃까지 올릴 수 있는 발열체를 사용하여 상온에서부터 추진제를 서서히 가열하면서 추진제의 표면온도를 측정하여 얻었으며, 온도 지시계와 추진제를 동시에 캠코더로 촬영하여 관찰하였다.

2.2 점화기 연소 특성 시험

2.2.1 점화 화약 조성

점화 화약의 조성은 흑색화약의 구성 성분인 질산칼륨(KNO₃), 목탄(C), 황(S)과 Binder 및 연료 역할을 하는 PVA로 구성하였다. 화약의 일정한 연소 특성을 구현하기 위해 Sieve Shaker를 이용해 특정 입자 크기의 시료만 사용하였으며, 그 입자 사이즈 및 조성은 각각 Table 2, 3과 같다.

Table 2 Particle size of components of igniter

| Component | size | amount |
|------------------|-------------------------|--------|
| C | 53 ~ 75 μm | 40 % |
| | 75 ~ 90 μm | 30 % |
| | 90 ~ 100 μm | 30 % |
| S | 45 ~ 53 μm | 27 % |
| | 53 ~ 75 μm | 45 % |
| | 75 ~ 90 μm | 28 % |
| KNO ₃ | 100 ~ 106 μm | 100 % |

Table 3 Components ratio of igniter

| No. | C (wt%) | S (wt%) | KNO ₃ (wt%) | PVA (wt%) | Methanol (g) |
|-----|---------|---------|------------------------|-----------|--------------|
| 1 | 8 | 11 | 61 | 15 | 0.9 |
| 2 | 8 | 11 | 68 | 13 | 0.9 |
| 3 | 8 | 12 | 64 | 13 | 0.9 |
| 4 | 8 | 12 | 66 | 13 | 0.9 |
| 5 | 8 | 12 | 67 | 13 | 0.9 |
| 6 | 8 | 16 | 63 | 13 | 0.9 |
| 7 | 9 | 9 | 70 | 13 | 0.9 |
| 8 | 9 | 13 | 65 | 13 | 0.9 |
| 9 | 9 | 14 | 64 | 13 | 0.9 |

2.2.2 점화기 제작

점화기 제작은 총 6단계의 제작 공정을 거쳐 수행하였다. 우선 질산칼륨, 목탄, 황을 일정 입자 사이즈로 분류 한 후 혼합하여 흑색화약 분말을 제작한다. 다음 PVA-Methanol을 일정량 혼합용기에 부은 후 PVA의 점성이 없어질 정도로 Methanol을 혼합한다. Methanol은 PVA에 대하여 용제 역할을 하여 상온에서 고체 상태인 PVA를 액체 상태로 만들어 주며, Methanol의 양에 따라 그 점성이 달라진다. 또한 시간이 지남에 따라 Methanol이 증발하면서 PVA는 다시 고체 상태로 변하게 된다. 따라서 Methanol에 PVA가 용해된 상태에서 1단계에서 제작된 흑색화약을 첨가하면 쉽게 혼합이 가능하고 균일하게 혼합된 시료를 일정 형틀에 주조한 후 건조하면 모든 제작 공정이 완료된다.

2.2.3 실험 장치

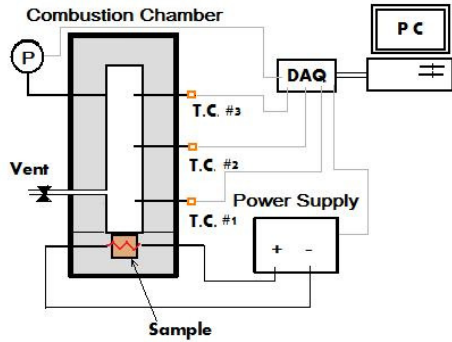


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for combustion

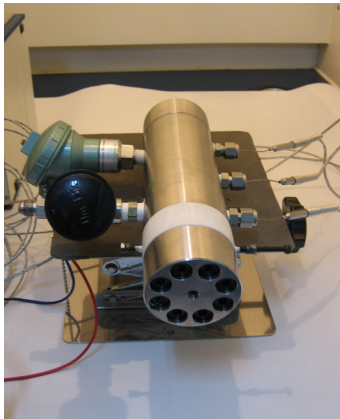


Fig. 3 Picture of Combustion Chamber

제작된 점화기의 연소 가스 온도 및 챔버내 압력을 측정하기 위해 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 연소 챔버내 용적은 인하 로켓 연구회 소형 로켓 모터의 Inner Volume과 동일하게 제작하였으며, 연소 가스의 온도를 이그나이터와의 거리 별로 측정하기 위해 K-type 써모커플을 3개 설치하였으며, 압력 센서는 초기 점화시기에 발생할 수 있는 동압의 영향을 최소화하기 위해 끝부분에 설치하였다. 압력 신호 및 온도 신호는 모두 NI사의 Daq보드를 통해 수집하였으며, 입력 전압은 DC 5V로 고정하여 수행하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 추진제 점화 온도

추진제의 점화 온도 실험 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Temperature of Ignition for Igniter

| No. | Sample Size | | T _{Heater} | T _{Sample} |
|-----|-------------|-------------|---------------------|---------------------|
| | Dia. (mm) | Height (mm) | | |
| 1 | 16.4 | 5.3 | 719 | 303 |
| 2 | 17.1 | 5 | 655 | 302 |
| 3 | 16.7 | 6 | 643 | 305 |
| 4 | 17.7 | 6 | 653 | 305 |

추진제의 점화 온도는 약 304℃ 이었으며, 추진제의 표면 온도는 발열체의 온도 상승보다 비교적 느린 속도로 증가하였으며, 점화 후 화염 온도는 약 1800℃까지 상승하였다. 304℃에서 점화 지연시간 없이 바로 연소가 되었으며, 발열체와의 온도차는 평균 364℃였다.

3.2 점화기 연소 가스 온도 및 압력

산화제인 KNO₃의 비율 별 연소 가스 온도 및 압력의 변화를 비교해볼 때 산화제가 증가함에 따라 연소가스 온도가 대체적으로 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 압력의 경우 모든 샘플들이 초기에 상승 후 감소하여 일정 값을 유지하는 형태를 가지고 있었다. 압력 최대치는 대부분 20kg/cm², 최종 안정 값은 10kg/cm² 내외 였다. 이는 탄소와 PVA의 비율이 일정함에 따라 연소 가스의 주성분인 CO₂와 CO의 생성이 한정된 것으로 판단된다.

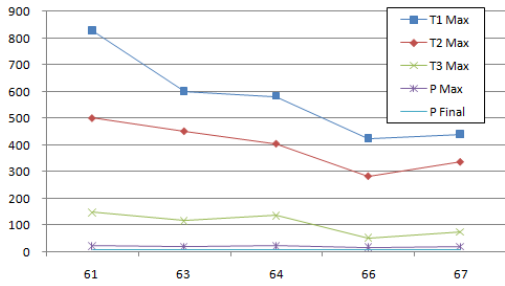


Fig. 4 Gas Temperature and Pressure vs. Weight Ratio of KNO₃

황(S)의 비율을 달리한 점화기의 경우 뚜렷한 경향성을 볼 수 없었지만, 11~13 wt% 구간에서 비교적 높은 온도의 연소가스를 얻을 수 있었다.

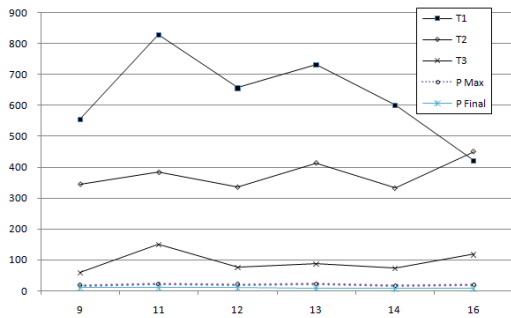


Fig. 5 Gas Temperature and Pressure vs. Weight Ratio of S

대부분의 시료들이 점화기 주변에서 높은 연소가스 온도를 보이고 있지만, 그중 가장 높은 온도를 보이는 조성은 1번 시료(C : S : KNO₃ : PVA = 8 : 11 : 61 : 15) 이었다. T1 온도는 820°C, T2 온도는 384°C, T3 온도는 150°C 였으며, T1의 경우 300°C 이상의 온도 유지 시간이 약 8 초로 가장 길었다. Fig. 6는 시간에 따른 1번 시료의 연소가스 온도 변화를 보여주고 있다.

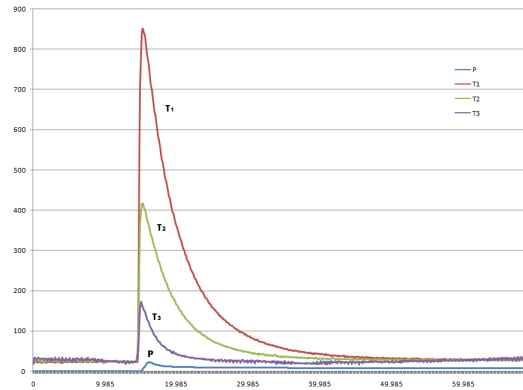


Fig. 6 Gas Temperature and Pressure vs. Time (Sample #1)

4. 토의 및 결론

본 연구를 통해 흑색화약과 PVA와의 혼합 비율에 따른 점화기 연소 특성을 살펴보았다. 우선 산화제의 비율이 높아짐에 따라 연소가스의 온도가 낮아지는 것은 산화제인 KNO₃와 PVA의 분해에너지로 인한 것으로 판단된다. 이에 반해 황의 경우 비율에 따른 뚜렷한 경향성을 보이지 않지만 이는 황의 비율 변화가 비교적 작았기 때문에 속단할 수는 없다.

또한 시간에 따른 연소가스의 온도 변화 그래프를 살펴보면 최대치 이후로 급격한 온도 감소가 나타나는데, 이는 연소기의 단열이 적절하게 이루어지지 않은 점에서 기인된다고 판단되며, 이를 보완하기 위해서는 연소기 내벽을 내열재로 교체해야 할 것이다. 그리고 추진제 점화 온도의 경우 외부 온도를 승온 상태가 아닌 정온 상태에서 점화가 이루어지는데 걸리는 시간을 측정하여 추진제가 열흡수 하는 속도를 통해 점화기가 일정 온도 이상을 유지 하는데 필요한 요구시간을 정확히 알 수 있을 것이다.

그리고 현재 인하 로켓 연구회의 추진제의 안정 연소에 필요한 압력을 정확히 알고 있지 못해 점화기에 요구되는 초기 설정 압력을 확정할 수 없으나, 일반적으로 대부분의 로켓 모터들이 70기압을 연소실 적정 압력으로 설정하는 점

을 미루어 보았을 때, 약 21 ~ 28 kg/cm²의 초기 압력이 요구된다. 이는 현재 실험 결과 값에 의하면 좀 더 높은 가스 발생량이 필요함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 홍용식, "우주추진공학", 청문각, 2003, pp.246-249
2. 노만균, "고체추진체", 민음사, 1998
3. R. Turcotte, R.C. Fouchard, A.-M. Turcotte and D. E. G. Jones, "Thermal Analysis of Black Powder", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 73, 105-118, 2003
4. M. E. Brown, R. A. Rugunanan, "A Temperature-Profiles Study of the Combustion of Black Powder and its Constituent Binary Mixtures", Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 14, 69-75, 1989