

## 고에너지 가스발생기용 보론 비드의 연소특성 연구

한두희<sup>a</sup> · 강정석<sup>a</sup> · 신준수<sup>a</sup> · 성홍계<sup>a,\*</sup> · 신경훈<sup>b</sup> · 최성한<sup>b</sup> · 황갑성<sup>c</sup>

## Study on Boron-bead Combustion Characteristics for High Energy Gas Generator

Doo-Hee Han<sup>a</sup> · Jeong-Seok Kang<sup>a</sup> · Jun-Su Shin<sup>a</sup> · Hong-Gye Sung<sup>a,\*</sup> ·  
Kyung-Hoon Shin<sup>b</sup> · Sung-han Choi<sup>b</sup> · Kab-Sung Hwang<sup>c</sup><sup>a</sup>Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea<sup>b</sup>R&D Team, Daejeon Plant, Hanwha Corporation, Korea<sup>c</sup>Advanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea<sup>\*</sup>Corresponding author. E-mail: [hgsung@kau.ac.kr](mailto:hgsung@kau.ac.kr)

## ABSTRACT

The combustion characteristics of Boron-beads to improve the energy density of gas generator has been investigated in accordance with diameter of beads and their composition. In this paper, electrically heated tungsten sheet and visualized furnace are applied to measure ignition temperature and burning time of bead respectively. The results proposes ignition temperature between 720~800 K and burning time proportional to bead diameter. Also a ignition delay of boron particle is detected through the temperature and radiation intensity measurements.

## 초 록

가스발생기의 고 효율화를 위해 고에너지 물질인 보론을 사용한 보론 비드의 비드 입도 및 성분  
따른 연소특성을 조사하였다. 본 연구는 전기적으로 가열 된 텅스텐 시트와 가시화된 전기로를 사용하  
여 각각 점화온도와 연소 시간을 측정하고, 고속 카메라로 연소 과정을 측정하였다. 실험 결과 점화 온  
도는 720~800 K 이며, 연소 시간은 보론 비드 직경에 비례하는 것으로 관찰 되었다. 온도와 복사강도  
측정값을 사용하여 보론 입자의 점화 지연시간이 존재한다는 것을 확인하였고, 이를 통해 보론 비드의  
전반적인 연소 메커니즘을 이해할 수 있었다.

Key Words: Gas Generator(가스발생기), Boron Bead(보론비드), Combustion Characteristics(연소특성),  
Electric Furnace(전기로)

Received 6 June 2014 / Revised 11 July 2014 / Accepted 17 July 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2014년도 춘계학술대회(2014. 5. 29-30,  
서울대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

## 1. 서 론

보편적으로 많이 사용되고 있는 고체추진기관

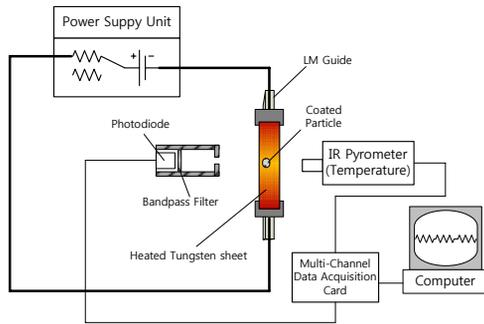


Fig. 1 Schematics of an ignition temperature measurement instrument.

은 높은 순간 추력과 저비용, 보관의 용이성 등의 장점이 있지만 비추력은 230~300 sec 사이로 액체추진기관에 비하면 낮은 편이다. 하지만 덕티드 로켓과 같이 연료 과농 고체 가스발생기로 생성된 고온, 고압의 불연소 가스와 램 압축된 외부흡입 공기를 2차 연소를 시키면, 추진제에서 가장 많은 부피와 질량을 차지하는 산화제를 탑재하지 않기 때문에 1200 sec 이상의 높은 비추력을 낼 수 있고 고체 연료만을 탑재하고 구조가 비교적 간단하기 때문에 효율적인 저장성, 저비용의 장점이 있다[1].

가스발생기의 핵심은 높은 단위부피당 에너지 저장률인데 보론은 단위 질량당으로 따지면 수소와 베릴륨을 제외하고 지구상에서 세 번째로 높은 연소열을 가지고 있기 때문에 위 목적에 아주 적합한 물질이라 할 수 있다. 하지만 보론은 산화피막( $B_2O_3$ )에 쌓여있어[2] 높은 점화 온도를 가지고 있기 때문에 가스발생기에서 보론의 산화피막을 적절히 제거해주지 못하면 2차 연소실에서 효율적인 보론-공기의 연소가 이루어질 수 없다. 문제를 해결하기 위해 문제를 해결하기 위해 산화막을 제거하고 코팅을 하여 점화 온도 및 연소시간을 단축시키거나[3] 보론과 하이드로카본 계열 연료 및 불소를 적절히 혼합하여 펠렛 타입으로 성형을 한 보론비드를 고체 추진제에 적용하여 보론의 산화막을 벗겨내는 것이 가능하다[4]. 위와 같은 보론 비드의 효과를 응용하여 보론을 포함하는 고에너지 가스발생기를 사출장치등에도 응용할 수 있다.

본 논문은 고체 가스발생기용 보론비드의 연소특성을 파악하였다. 연소 특성은 대기압 하에서 점화 온도와 고온, 대기압 하에서 연소 시간 및 현상학적인 연소 현상을 포함한다. 점화 온도는 전기적으로 가열된 텅스텐 판을 사용하고 연소 시간은 가시화된 전기로를 사용하여 측정하였다. 보론 비드는 PMMA와 Viton를 바인더로 사용한 두 종류를 300~600, 600~710, 710~1000, 1000~1700  $\mu\text{m}$ 로 사분하여 바인더별, 입도별로 실험을 진행 하였다.

## 2. 실험 장치

### 2.1 점화 온도 측정 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 비드 점화 온도 측정 장치의 개략도이다. 점화는 전기적으로 가열된 텅스텐 판을 사용하였고 점화 시점의 정확한 온도를 측정하기 위해 캘리브레이션이 된 비접촉식 IR 온도센서를 적용하였다. 점화 시점판단을 위해 광다이오드가 사용되었고, 보론의 연소 시 발생하는 BO,  $BO_2$  방사선만을 선택적으로 측정하기 위해 435, 550 nm 에  $\pm 10$  nm의 대역 필터를 적용하였다. 또한 연소 현상을 관찰할 수 있도록 Obtronis CR-3000x2 고속카메라를 동기화 시켰다.

점화 열원으로서 보론의 연소열을 견딜 수 있고 IR 카메라를 위한 방사율 데이터가 잘 정립되어있는[5] 텅스텐을 가열체로 사용하였고 빠른 열 응답성을 위해 0.1 t 시트를 사용하였다. 가열체의 열팽창으로 인한 굽힘으로 센서의 측정 위치 변화를 방지하였고 전력 공급은 안정된 가열을 위해 저전압( $\sim 22$  V), 고전류( $\sim 400$  A) 가변 전원공급장치를 사용하였다. IR 온도센서, 포토다이오드, 고속카메라는 NI社의 NI-cDAQ 모듈을 이용하여 모두 동기화 하였다.

점화온도는 복사광으로 점화 시점을 판단하고, 그 때의 텅스텐 시트 온도를 점화 온도로 가정한다. 만약 온도 상승률이 너무 빠를 경우 접촉 저항 및 열손실에 의해 점화 온도가 실제보다 높게 측정 될 우려가 있기 때문에 다른 연구자

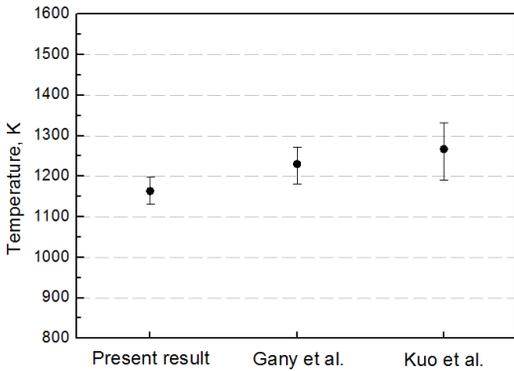


Fig. 2 Comparing of ignition temperature of nickel coated aluminum with other results.

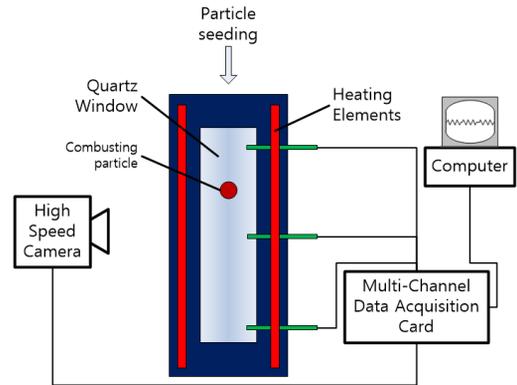


Fig. 3 Schematics of a visualized electric furnace.

의 결과가 존재하는 금속계열 연료의 점화온도 측정 실험을 통해 장치 검증을 수행 하였다. 검증을 위해 비교적 점화가 쉽고 다른 두 연구자의 데이터가 존재하는 니켈 코팅 알루미늄을 선택하였다. Fig. 2는 니켈코팅 알루미늄의 점화온도 비교 그래프로, 본 연구에서 측정한 점화온도, Shafirovich et al.[6] 의 결과와 Boyd et al.[7] 의 결과이다. 다른 두 실험은 각각 전기로와 버너의 후류 화염을 이용해 측정을 하였고, 입자의 크기는 본 연구의 결과를 포함해 순서대로 10  $\mu\text{m}$ , 31~40  $\mu\text{m}$ , 9  $\mu\text{m}$  이다. 입도가 가장 비슷한 Kuo의 결과와 약 100°의 차이가 있지만 이는 코팅 공정에 따른 연소 특성이 다르기 때문이다.

2.2 연소시간 측정 실험장치

Fig. 3은 개별 입자의 연소 시간을 측정하기 위하여 본 연구에서 사용된 가시화된 전기로의 개략도이다. 전기로 내의 온도를 확인하기 위해 상, 중, 하 위치의 온도를 측정한다. 연소되는 입자를 선명히 가시화하기 위해 앞, 뒷면으로 석영 유리를 설치하여 전기로 내부의 강한 복사광으로 인한 비드의 과다 노출을 방지하였다. 낙하하는 비드는 Optronis 사의 CR-3000x2 고속카메라를 사용하여 초당 2000 프레임의 속도로 촬영하였고, 연소 복사광을 상대적으로 비교할 수 있도록 조리개 값을 조정하였다. Fig. 4는 입자주입장치(Particle seeder)의 개략도로 보론 비드를 일

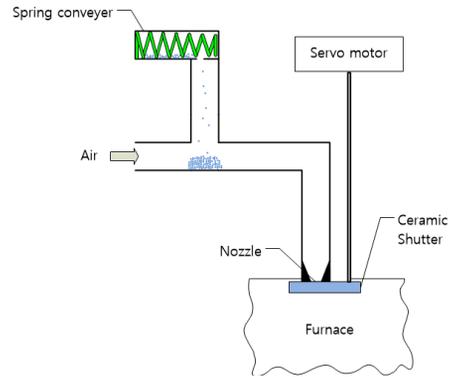


Fig. 4 Schematics of a particle seeder.

정하게 전기로로 공급할 수 있도록 설계되었다. 공기를 운반기체로 사용하여 비드의 초기 속도 및 운반기체의 온도에 의한 영향을 최소화 하기 위해 0.15 bar의 저압 공기가 사용되었다. 전기로 내부는 1300도 정도의 고온이기 때문에 열이상부에 장착되어있는 입자 주입장치의 파이프를 따라 역류하여 비드의 초기 온도에 영향을 줄 수 있기 때문에 주입장치 노즐에 가변 세라믹 셔터를 적용하여 열전달을 차단하였다.

Table 1에 입자연소를 위한 전기로의 자세한 사양 및 실험 조건을 정리하였다.

2.3 보론 비드 성분

보론 비드는 하이드로카본계열 연료와 산화제를 사용한 추진제에 보론 입자 및 기타 첨가제를 혼합하여 환형으로 성형하였다. 산화제는 고

Table 1. Summary of apparatus specifications and test conditions.

Location	Description	Range
Particle seeder	Carrying Gas	Air
	Feeding Pressure	0.15 bar
	Nozzle Diameter	3.8 mm
Chamber	Chamber Height	600 mm
	Chamber Cross Section	400 x 400
	Temperature	1573 K
	Quartz Window Size	35 x 270
	Energy Consumption	6.6 KVA

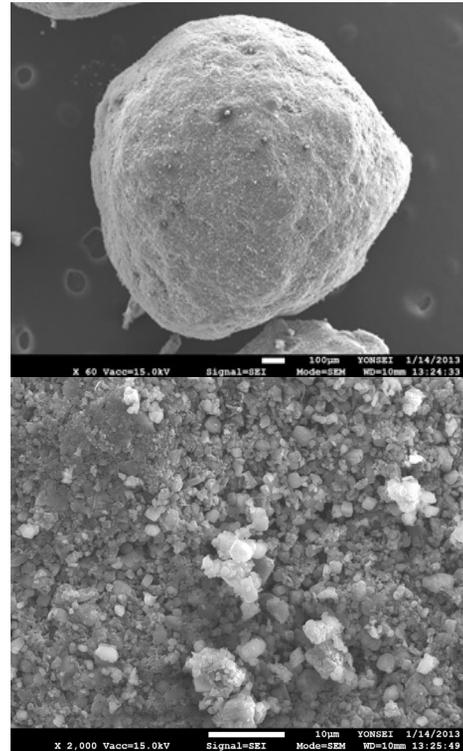


Fig. 5 Shape of Boron-bead (up) and surface particle distribution (down).

Table 2. Labeling Boron-bead samples.

Label	Diameter range (Mean Dia.), $\mu\text{m}$	Binder
P1	300~600 (450)	PMMA
P2	600~710 (655)	PMMA
P3	710~1000 (855)	PMMA
P4	1000~1700 (1350)	PMMA
V1	300~600 (450)	Viton
V2	600~710 (655)	Viton
V3	710~1000 (855)	Viton
V4	1000~1700 (1350)	Viton

체 로켓에서 일반적으로 사용되는 Ammonium perchlorate (AP) 이고 바인더는 PMMA, Viton 두 종류를 사용한다. Table 2는 시료의 라벨에 따른 직경 및 바인더를 나타낸다.

Fig. 5는 보론 비드의 SEM 이미지로 비드의 형태는 구형이 아닌 무작위적 형상을 가지기 때문에 연소시간을 통한 연소 속도의 계산 시 오차가 발생할 수 있다. 표면 확대 이미지를 보면 서브마이크로 크기의 AP, 바인더(PMMA, Viton), Boron 입자가 비균일 혼합물 형태로 존재한다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 보론 비드의 점화온도

보론 비드의 점화 온도는 가열 텀스텐 시트를 사용하여 측정이 되었으며, 점화 후 매우 강렬한 빛을 발산하며 연소가 빠르게 진행되기 때문에

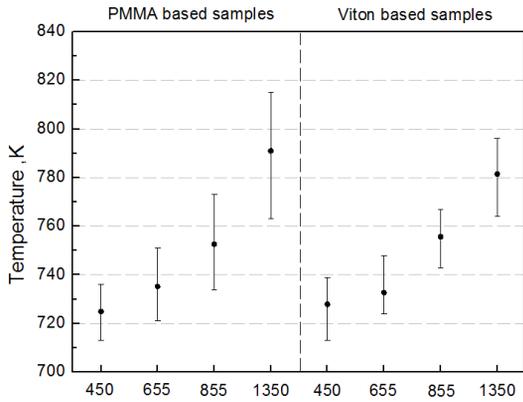


Fig. 6 Measured ignition temperature of Boron-beads by sizes and binders.

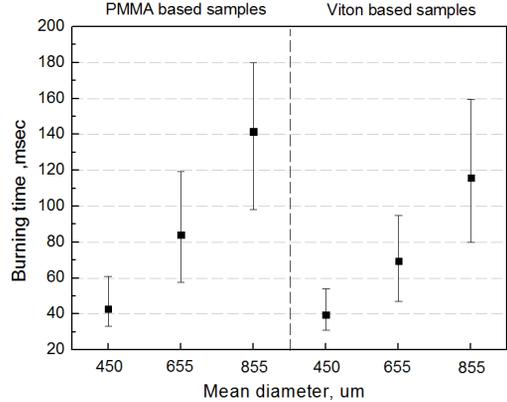


Fig. 7 Measured burning time of Boron-beads.

특별한 후처리 과정을 거치지 않아도 연소 시 발산하는 복사광의 강도를 측정하여 점화 시점 및 점화 온도를 비교적 정확히 판단할 수 있다. Fig. 6은 측정된 보론 비드의 입도별, 바인더 별 점화 온도를 나타낸다. 바인더에 따른 점화 온도 차이는 크지 않지만 입도에 따른 점화온도는 최고 약 66 K 이며, 그 원인은 입자가 대기 상에 노출이 되어 있고, 입자의 직경이 커질수록 비드의 열손실 및 접촉면에서 입자 내부로의 열전달에 의한 지연으로 판단된다. 하지만 평균 점화 온도가 가장 큰 P4도 800 K 이하이므로 일반적인 연소기 온도에서 점화에는 문제가 없지만 점화온도까지 예열 시간이 필요하기 때문에 입도에 따른 점화 지연 시간에 차이가 있다.

3.2 보론 비드의 연소시간

비드의 연소 시간은 가시화된 전기로를 사용하여 측정하였다. 한 개 또는 두 개 정도의 보론 비드를 가열로 위쪽에서 주입시키고, 가시화 창을 통해 고속 카메라로 촬영하여 연소 시간을 측정하였다. 영상은 초당 2000프레임의 속도로 촬영되었으므로, 보론의 연소 시 사용된 프레임의 수를 통해 연소 시간을 측정하였다. 1000~1700 um 의 직경을 가지는 P4, V4의 연소 시간이 너무 길어 본 연구에서 사용된 전기로의 연소실 높이로 측정이 불가하여 1, 2, 3번 시료에 대해서만 실험을 진행하였다. Fig. 7 은 1573 K

에서 비드의 시료별 연소 시간을 나타낸다. 평균 직경이 450 um로 가장 작은 P1, V1의 연소 시간은 각각 32, 39 msec로 큰 차이는 없지만 직경이 커질수록 PMMA 바인더를 사용한 비드의 연소시간이 길어지는 것을 확인할 수 있고 855 um 에서는 PMMA, 바이톤 순서로 각각 141, 118 msec이다. 전체적으로 Viton 기반의 비드 연소속도가 빠르고 직경이 커질수록 편차가 크기 때문에 측정 오차 범위도 넓어진다. 또한 Fig. 7에서 바이톤 계열 비드의 연소속도가 PMMA 계열에 비해 빠르는데, 이는 바이톤 연소율이 PMMA보다 더 빠르다는 것을 의미한다.

3.3 보론 비드의 연소현상

텅스텐 시트 점화실험 및 전기로 연소시간 측정 실험 중 비드의 연소 과정을 고속 카메라로 측정한 결과 보론 비드의 연소 현상을 관측할 수 있었다. Fig. 8은 전기적으로 가열된 텅스텐 시트로 보론 비드를 연소시킬 때의 전체 연소 과정 중 5, 35, 70, 95% 에서 스톱샷을 각각 나타낸 것이다. 보론 입자의 연소는 1차, 2차 연소 모드로 나뉘는데[8] 보론 피막(B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 존재하는 동안 연소를 하는 1차 연소모드와 피막이 완전 제거된 후 액화 보론과 외부 산화제의 직접적 연소가 폭발적으로 일어나며 BO, BO<sub>2</sub> 반응으로 인해 초록색 복사광을 내는 2차 연소 모드이다. 일반적으로 PMMA 보론 비드는 연소 초반에 균

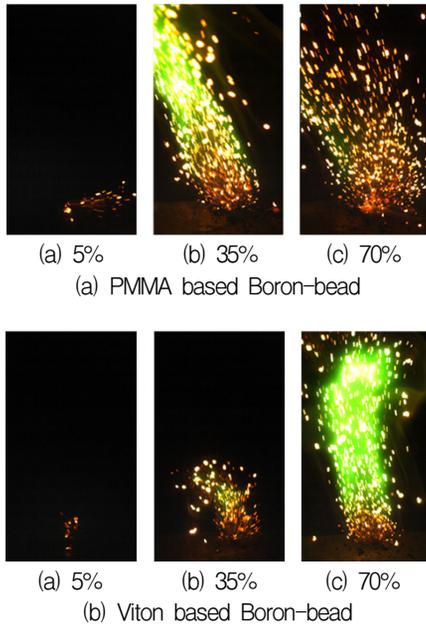


Fig. 8 Snap-shot during combustion of Boron-Bead.

집 보론 입자들의 2차 연소로 인해 강한 초록빛 화염을 보이고 이후 보론 입자의 1차 연소모드로 보이는 붉은 발광점들만 관측된다. 반면에 Viton 기반 보론 비드는 후반부까지 균집 보론의 2차 연소가 이루어진다. 이는 비드 내의 하이드로카본 계열 추진제의 반응 속도가 보론 입자 연소속도보다 빠르기 때문에 표면에서 폭발적인 연소로 인해 예열된 보론 입자가 표면 근처로 확산되고 뜨거운 주변 연소 가스로 인해 보론의 1차 연소가 이루어지는 것이다. 1차 연소로 인해 보론의 산화 피막이 제거되면 2차 연소가 일어나는데 일반적으로 보론의 2차 연소가 일어나기 위해선 매우 높은 온도를 필요로 하기 때문에 연소열이 부족하면 소멸될 가능성이 있다. 실험 결과는 Fig. 8 (a), (b)에서 볼 수 있듯이 전반적으로 PMMA 바인더 보다 Viton 바인더를 사용한 비드가 연소 후반까지 보론의 2차 연소를 유지 시킨다. 이는 연소 엔탈피가 PMMA (-26.64 KJ/mol) 보다 바이톤 (-79.52 KJ/mol)이 약 3배 더 높기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 텅스텐 시트를 이용한 점화온도 실험 중 측정된 온도와  $BO_2$  복사강도이다. 본 결과는

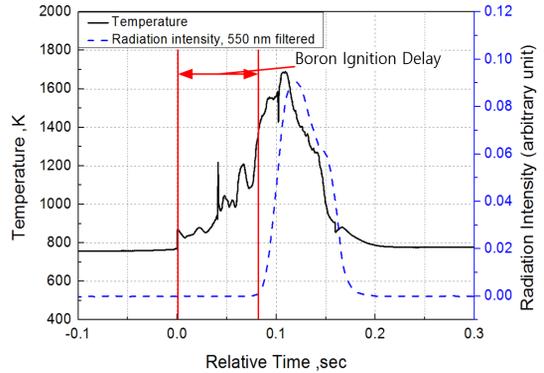


Fig. 9 Temperature and radiation intensity during combustion.

V3 샘플 테스트 중 하나를 나타내고 있고 바인더와 입도에 관계없이 비슷한 온도와 복사광의 거동을 보였다.  $BO_2$  복사강도는 보론 입자의 연소 시 나타나게 되는데 이 그래프를 보면 비드의 연소시점으로부터 약 0.8초의 보론 점화 지연 시간이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 위에서 언급하였듯이 보론 입자가 비드의 점화와 동시에 연소되는 것이 아니고 비드 내 하이드로카본 계열 연료의 연소가 일차적으로 일어나고 이 연소열로 인해 확산된 보론 입자가 1차 연소, 2차 연소 순으로 일어나기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 보론 비드의 입도별, 바인더별 연소 특성을 연구하였다. 전기적으로 가열된 텅스텐 시트를 이용하여 점화온도를 측정하였고 가시화된 전기로를 사용하여 보론 비드의 연소시간을 측정하였다. 바인더에 따른 점화 온도 차이는 크지 않지만 입도에 따른 점화온도는 최고 약 66 K이며, 그 원인은 입자가 대기 상에 노출이 되어 있고, 입자의 직경이 커질수록 비드의 열손실 및 접촉면에서 입자 내부로의 열전달에 의한 지연으로 판단된다. 점화 온도는 비드 입도에 따라 720~800 K이다. 평균 직경이 450  $\mu m$ 로 가장 작은 비드의 연소 시간은 큰 차이는 없지만 직경이 커질수록 PMMA 바인더를 사용한 비드의 연

소시간이 길어지고 전체적으로는 Viton 기반의 비드 연소속도가 좀더 더 빠르다. 연소시간은 30~140 msec이다. 가시화를 통하여 보론 입자의 연소가 1차, 2차 연소 모드로 나타남을 확인하였다. 비드 직경에 따른 연소시간은 비드 직경의 평균 직경이 450  $\mu\text{m}$ 에서 855  $\mu\text{m}$ 으로 증가할수록 40 msec에서 140 msec로 증가하고, 이 데이터를 토대로 연소실내 비드의 체류시간에 따른 비드의 적절한 직경 선택이 가능하다. 본 연구에서 측정한 점화온도, 연소시간 및 비드에서 떨어져 나온 보론 입자의 점화 지연시간 존재의 이해를 통해 가스발생기의 연소실 내부 체류시간에 따른 적절한 비드 입도를 선택하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

1. Sung, H.G. and Yoon, H.G., "Technical Review and Analysis of Ramjet/Scramjet Technology I, Ramjet Engine (Liquid Ramjet, Ducted Rocket)," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 10, No. 1, pp. 72-86, 2006.
2. Zhou, W., Yetter R.A. and Dryer, F.L., "A Comprehensive Physical and Numerical Model of Boron Particle Ignition," *26th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, pp. 1909-1917, 1996.
3. Han, D.H., Shin, J.S., Kang, J.S., Sung, H.G., Jung, H.J. and Shin, W.G., "Experimental Study on Ignition and Burning Rate of Nickel and TTIP Coated Aluminum Particles at Atmospheric Pressure," *Asian Joint Conference on Propulsion and Power*, pp. 5-8, 2014.
4. Ulas, A. and Kuo, K.K., "Ignition and Combustion of Boron Particles in Fluorine-Containing Environments," *Combustion and Flame*, Vol. 127, pp. 1935-1957, 2001.
5. Dmitriev, V.D. and Kholopov, G.K., "Radiant Emissivity of Tungsten in the Infrared Region of the Spectrum," *Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii*, Vol. 2, No. 6, pp. 481-488, 1965.
6. Shafirovich, E., Bocanegra, P.E., Chauveau, C., Gokalp, I., Goldshleger, U., Rosenband, V. and Gany, A., "Ignition of Single Nickel-coated Aluminum Particles," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2055-2062, 2005.
7. Boyd, E., Houim, R. and Kuo, K.K., "Ignition and Combustion of Nickel Coated and Uncoated Aluminum Particles in Hot Post-Flame Environment," *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2-5, Denver, Colorado, U.S.A., Aug. 2009.
8. Yeh, C.L. and Kuo, K.K., "Ignition and Combustion of Boron Particles," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 22, pp. 511-541, 1996.