

## 研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.2.039>

## 레이저 점화에 의한 고체추진제 Strand Burner 실험

이상협\* · 고태호\* · 양희성\*\* · 윤웅섭\*\*\*†

## An Experimental Study of Laser-induced Ignition of Solid Propellant with Strand Burner

Sanghyup Lee\* · Taeho Ko\* · Heesung Yang\*\* · Woongsup Yoon\*\*\*†

## ABSTRACT

Basically, in order to apply solid propellant as ignition source to high energy metal particle combustion system, we analyzed combustion characteristics of the HTPB/AP/Al, HTPE/AP/Al propellants by using a strand burner. The propellants were tested in a high-pressure windowed strand burner, which was pressurized up to 300 psia with pure argon gas. Strand burner was visualized with two quartz windows and ignition was accomplished by a 10 W CO<sub>2</sub> laser. The burning rate of propellant was measured with high-speed camera method for frame analysis and photodiode method for combustion time analysis. Emission spectrum was measured with spectrometer at 300 nm ~ 800 nm and 1500 nm ~ 5000 nm and then we analyzed species during propellant combustion.

## 초 록

추진제를 고에너지 금속 분말 연소시스템에 점화원으로 적용을 위한 기초 연구로서 strand burner를 이용하여 HTPB/AP/Al, HTPE/AP/Al 추진제의 연소특성을 고찰하였다. 실험은 아르곤을 사용하여 ~300 psia 까지 가압하였으며, 2개의 석영창을 이용하여 가시화하였다. 추진제 점화를 위해서 10 W의 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였으며, 연소 속도 측정은 초고속 카메라를 활용한 프레임 분석 기법 및 광다이오드를 이용한 연소시간 분석 기법을 적용하였다. 스펙트로미터를 이용하여 300 nm ~ 800 nm, 1500 nm ~ 5000 nm 의 방출 스펙트럼을 분석하여 추진제 연소반응 시 발생하는 화학종을 확인하였다.

Key Words: Solid Propellant(고체추진제), Burning Rate(연소 속도), Photodiode(광다이오드), Spectrometer(스펙트로미터), Strand Burner(압력용기), CO<sub>2</sub> Laser(CO<sub>2</sub> 레이저)

접수일 2012. 11. 27, 수정완료일 2013. 2. 22, 게재확정일 2013. 2. 27

\* 정희원, 연세대학교 기계공학과 대학원

\*\* 정희원, LIG넥스원(주) PGM 연구센터 1팀

\*\*\* 종신회원, 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

## 1. 서 론

고체 추진제는 단시간에 안정적으로 고온의 열량을 낼 수 있는 에너지 물질이나 연소 현상이 압력에 의존적이며[1], 많은 물리·화학 과정을

포함하는 복잡한 현상이므로[2] 점화 및 연소가 불안정하고 연소 특성과 생성물 예측이 어려운 경우가 발생하게 된다. 따라서 추진제의 연소 특성 분석을 위해서는 압력에 따른 연소 속도와 연소 반응중에 발생하는 생성물의 방출 스펙트럼(emission spectrum) 측정이 필수적이다.

압력에 따른 연소 특성은 형상 함수를 적용하여 상태 방정식으로부터 연소 속도를 계산하는 closed bomb 방법과 정상 상태에서 추진제의 선형 연소 속도를 측정하는 strand burner 방법이 있는데, 그 중 전자는 추진제 장전 밀도에 따라 초고압까지 연소 속도를 측정할 수 있는 장점이 있지만 결과값 분석 신뢰성에는 한계가 있다[3]. 반면에 strand burner 방법은 5000 psi 이상의 초고압 측정에는 불리하나 정상 상태에서의 압력을 측정하기 때문에 정밀한 연소 속도 데이터를 획득할 수 있는 이점이 있으므로[1, 4], 본 연구의 가압 범위(~300 psi)를 고려했을 때, 연소 속도 측정 정확도가 높은 strand burner 방법을 적용하여 실험을 수행하였다.

추진제의 연소 반응 시 발생하는 방출 스펙트럼을 측정하여 각 추진제의 다양한 연소 특성을 분석할 수 있는데, 대표적인 분석은 다음과 같다. 추진제 조성에 따른 화학종의 여기 방출선을 측정하여 첨가물이 연소 반응중에 발생하는지 혹은 촉매로 작용하는지 여부[5]와 연소 화염의 빛 강도 세기 측정을 통한 추진제 화염온도 분석[6], 연소 시간에 따른 스펙트럼 측정을 통한 연소 거동 분석[7] 등이 있다. 따라서 추진제 방출 스펙트럼을 활용한 많은 연구가 진행되어 왔는데, 대부분의 선행 연구는 가시광 파장 영역에 집중되어 있다. 그 예로 Arvantes[7]는 방출 스펙트럼을 이용하여 AP/HTPB의 알루미늄의 포함 여부에 따른 연소 특성 분석을 수행하였고, Mamen[8]은 Bunsen 방식의 화염을 이용하여 추진제 방출 스펙트럼을 분석하였다. Weiser와 Eisenreich[9]은 strand burner를 활용하여 추진제 연소 생성물의 시간에 따른 방출 스펙트럼을 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 고체 추진제를 고에너지 금속 알루미늄 분말 연소 시스템에 점화원으로

로 활용하기 위한 추진제 분석 기법 개발 연구로서 HTPB/AP/Al(추진제 A), HTPE/AP/Al(추진제 B)의 압력에 따른 연소 속도를 strand burner 방법과 기존의 wire를 이용한 점화 방법 [10]대신 점화 및 연소 특성 데이터를 정확하게 얻을 수 있는 복사 에너지 공급 방식의 비접촉식 CO<sub>2</sub> 레이저 점화 기법 및 이미지 분석 방법을 적용하였다. 또한 방출 스펙트럼(300 nm ~ 800 nm, 1500 nm ~ 5000 nm)을 측정하여 연소 반응시 발생하는 화학종 측정 기법을 확보하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 고체 추진제의 연소 속도

고체 추진제의 연소 속도는 바인더와 산화제의 종류, 산화제의 입도 분포, 고체 입자 함량, 촉매의 농도와 같은 열화학적 특성에 의해 결정된다[3]. 외적 요인으로는 압력과 온도 등에 영향을 받는데, 특히 압력은 고체 추진제의 연소 속도에 큰 영향을 주는 인자로 알려져 있다[1]. 아래 Eq. 1은 연소 속도의 압력의존성을 나타낸 대표적인 실험식이다.

$$r = aP^n \quad (1)$$

이 식은 Vieille의 경험식, 또는 St. Robert의 법칙으로 알려져 있으며, r은 연소 속도를 P는 압력을 나타낸다. a는 실험상수로서 추진제의 초기 온도의 영향을 나타내고, n은 압력지수로서 연소 속도의 압력 의존성을 나타내는데 효과적이다. 여기서 a와 n 값은 실험적인 접근을 통해서 도출할 수 있다.

### 2.2 고체 추진제의 방출 스펙트럼

방출 스펙트럼은 원자나 분자 또는 그 집합체가 높은 에너지 준위로부터 낮은 에너지 준위로 전이할 때 방출하는 전자기파 스펙트럼이다. 즉 각 원자마다 가질 수 있는 상태의 에너지가 일정한 값으로 양자화되어 있으며, 이들 에너지 차

이 또한 특정한 값들로 주어지므로 원자마다 고유한 값을 가지게 된다. 고체 추진제는 점화 및 연소 반응 시 높은 온도 및 발생 에너지에 의해 자발광을 방출하는데, 이러한 자발광을 측정하여 발생 화학종을 분석할 수 있다.

### 3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 고체 추진제 시편은 원통형이며 직경은 10 mm, 길이는 40 ~ 45 mm를 사용하였다. 연소 시 화염이 외각으로 발산되는 측면 연소를 방지하기 위해 에폭시를 이용하여 추진제를 라이닝 하였다. 각 추진제의 조성은 Table 1에 제시하였다.

Strand burner는 580 psi 압력까지 연소 속도를 측정할 수 있도록 장치를 설계 및 제작하였으며, 재질은 강합금(steel alloy)을 사용하였고 내경 및 높이는 약 300, 780 mm 이며 내부 용적은 약 23 liter 이다. 추진제의 점화 및 연소 과정을 가시화하기 위해 2개의 석영창(30 x 365

x 20 mm)을 사용하였으며, 가시창 방향으로 가스를 주입하는 아르곤 커튼 방식[11]을 적용하였다. 추가적으로 연소중의 압력 상승을 최소화하기 위하여 45 liter의 써지 탱크(Surge Tank) 2개를 연결하였으며, 내부의 과도한 압력을 방지하기 위해 50 bar 규격의 안전밸브를 사용하였다.

Figure 1은 전체 실험 장치를 나타낸 개략도이다. 제시한바와 같이 Universal의 10 W급 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 추진제를 점화하였으며, strand burner 내부로 레이저빔을 전달하기 위해 ZnSe 재질의 거울과 창을 설치하였다. 추진제의 연소 시간 측정을 위해 응답 속도가 1 ns 인 Thorlabs의 DET 10A/M Photodiode detector를 사용하여 빛의 세기 변화를 관찰하였고, 압력은 Sensys의 고정밀 PSH 센서를 strand burner 상단에 장착하여 측정하였다. 가시적으로 추진제 연소 특성 및 연소 속도를 확인하기 위해 Phantom의 V7.3 초고속 카메라와 50 W 급 LED 백라이트를 이용하였으며, 자외선 및 가시광선 영역에서의 고체 추진제 자발광 스펙트럼 측정을 위해 Princeton의 SP-2500 분광기와 Piacron의 PIXIS-256BR CCD, 중적외선(Mid-IR) 영역에서 측정을 위해 Spectral - products의 SM-301EX 분광기와 Chalcogenide 재질의 Optical fiber를 사용하였다.

실험은 strand burner를 이용하여 상온에서 압력을 1 ~ 300 psia로 변화시키면서 추진제가 일

Table 1. Formulation of Tested Propellants

Propellant	Ingredients
A	AP, HTPB, Al, etc.
B	AP, HTPE, Al, etc.

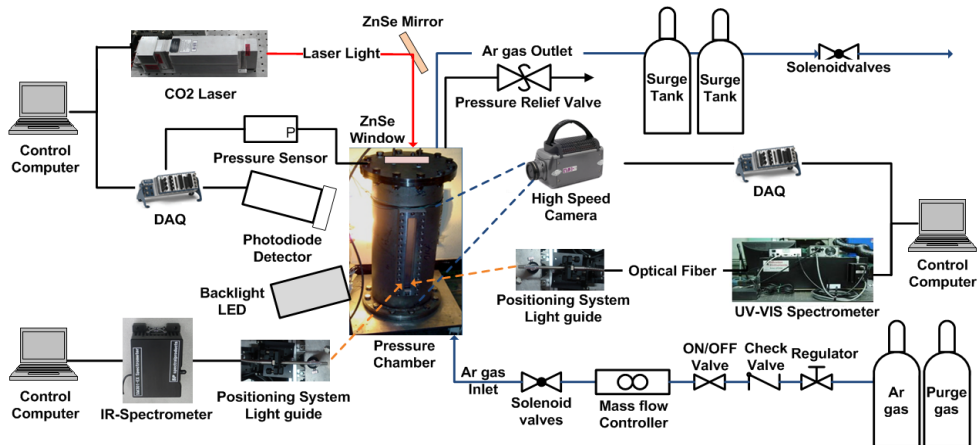


Fig. 1 Schematic Diagram of Strand Burner

Table 2. Experiment Condition

Pressure	~300 psia
Ignition	10W-CO <sub>2</sub> Laser
Burn-rate	Frame Analysis(1000 fps)
Measurement	Photodiode(0 ~ 10 V)
Spectroscopy	300 nm ~ 800 nm
Range	(300 ms, 1 μs)
(Integration, Exposure)	1500 nm ~ 5000 nm (1000 ms, 1 μs)
Propellant	10 mm(dia) X
Sample	40 ~ 45 mm(length)
Pressure Gas	Pure Argon

정 길이까지 선형 연소된 시간을 측정하고 초고속 카메라 프레임 분석을 통해 연소 속도를 계산하였다. 추진제의 방출 스펙트럼은 통합시간(integration time)과 노출시간(exposure time)을 조절하여 분광기의 CCD가 포화(saturation) 되지 않는 범위에서 고해상도로 측정하였다. 구체적인 실험 조건은 Table 2에 제시하였다.

4. 결과 및 고찰

Strand burner 내부에서 고체 추진제 A와 B를 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 점화하였다. Fig. 2와 3은 시간에 따른 추진제의 압력과 Photodiode를 이용한 빛 강도를 측정한 결과이다.

제시한 바와 같이 점화 후 빛 강도가 급격히 증가하였으며, 정상 연소 구간에서는 빛 강도가 Photodiode의 최대 출력 신호를 초과하여 포화(Saturation) 되었으나 점화 시작점과 연소 시간을 명확히 판단할 수 있었다. 많은 이전의 연구 [4-7]와 유사하게 strand burner 내부의 압력이 점화 후 고온의 연소가스에 의해 초기 상태보다 순간적으로 약 5 ~ 15% 상승함을 확인할 수 있었으며, 점화 시작점과 압력 상승 시점이 동일하다는 것을 알 수 있었다.

Figure 4와 5는 초고속 카메라를 이용하여 고체 추진제 A와 B의 연소를 약 150 psia에서 가시화한 결과이다. 고속 촬영은 초당 1000 프레

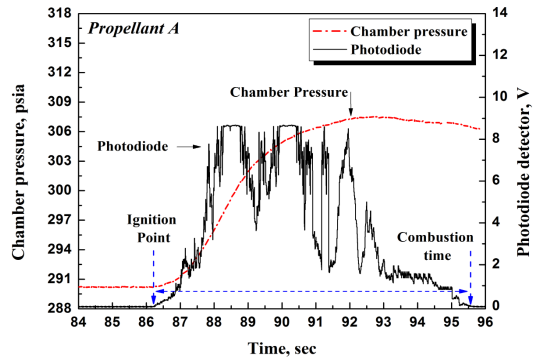


Fig. 2 Propellant A : Pressure Diagram and Photodiode Voltage Output According to the Time Variation(After ignition)

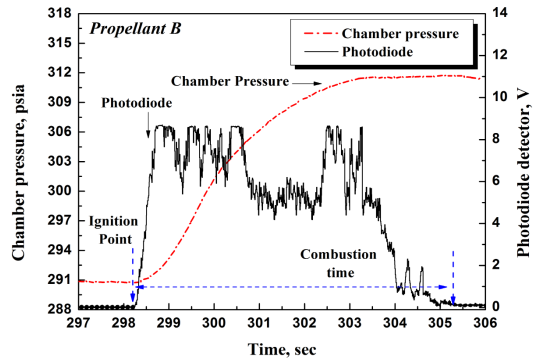


Fig. 3 Propellant B : Pressure Diagram and Photodiode Voltage Output According to the Time Variation(After ignition)

임, 노출 시간은 1 μs 조건으로 수행되었으며, 초기에 길이를 알고 있는 보정판(Calibration plate)을 시편위치에 장착하여 측정하고자 하는 영역에서 1 Pixel당 실제 길이를 확인 후 진행하였다. 제시한 바와 같이 고체 추진제 점화 및 연소 과정 전체를 가시화할 수 있었다.

시간에 따른 프레임 분석과 Photodiode를 이용한 점화 시점 및 연소시간 분석을 통해 연소 속도를 정밀하게 측정하였다. Fig. 6은 추진제 A와 B의 압력에 따른 연소 속도 측정 결과이다. 연소 속도는 300 psia 범위까지 증가하였으며 급격한 압력 지수의 변화는 나타나지 않았다. 또한 AP/HTPE/Al 추진제가 AP/HTPB/Al 추진제보다 연소 속도 값이 크게 측정 되었다. Table 3은

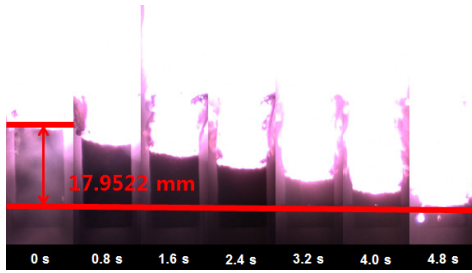


Fig. 4 Propellant A : High Speed Recording Result

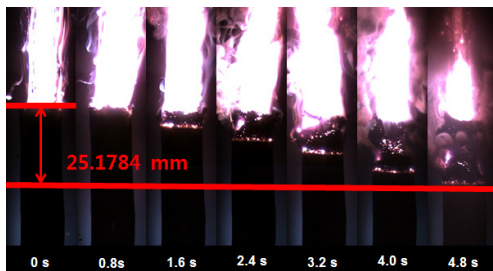


Fig. 5 Propellant B : High Speed Recording Result

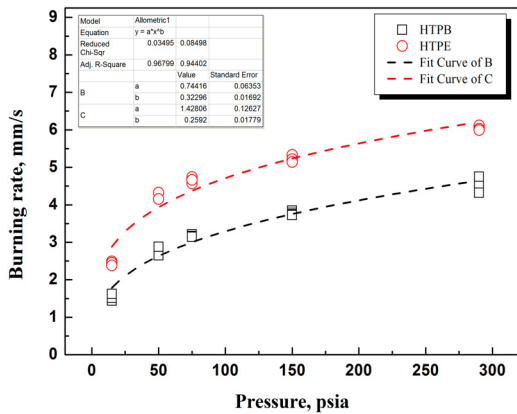


Fig. 6 Burning Rate Comparison of Solid Propellants (AP/HTPB/Al. vs AP/HTPE/Al.) according to the Pressure Variation

각각의 압력지수와 상수를 나타내었다.

Figure 7과 8은 가시광선(Visible) 영역에서 추진제 연소 반응 시 발생하는 방출 스펙트럼을 150 groove/ 500 nm blazed grating을 사용하여 측정된 결과이다. 제시한 바와 같이 추진제 A와 B 모두 연소 반응 시 발생하는 화학종은 AIO, Na, Ca, K 등이며 이는 알려진 방출 스펙트럼

Table 3. Burning Characteristics

Propellant	a	n
A	0.74416	0.32296
B	1.42806	0.2592

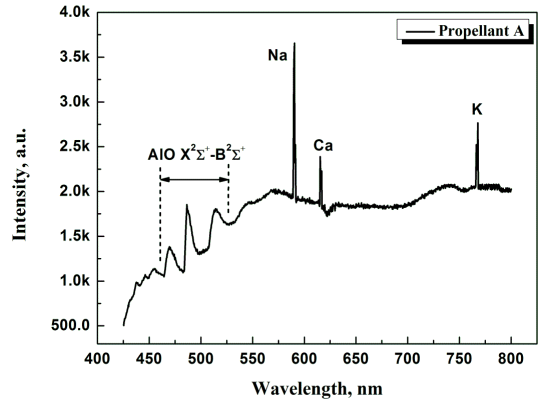


Fig. 7 Visible : Emission Spectrum of Propellant A

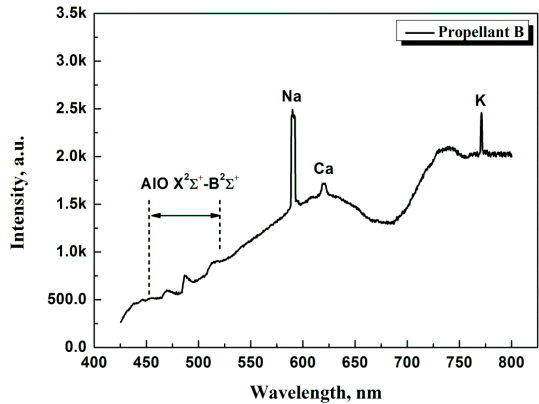


Fig. 8 Visible : Emission Spectrum of Propellant B

[6, 7, 14]과 일치하는 결과이다. 또한 가시광 파장대에서 광대역의 방출 스펙트럼이 검출되었는데, 그러한 이유는 추진제 연소 화염 영역에서 응축한(condensed) 고체 입자 및 발생 화학종의 열방출(thermal emission)에 의한 영향 때문이다 [6, 7, 14].

고체 추진제 A와 B의 1.5  $\mu\text{m}$  ~ 5.0  $\mu\text{m}$  의 적외선 영역에서 방출 스펙트럼을 측정하였다. 적외선 영역은 장파장이므로 고체 로켓 모터 연구

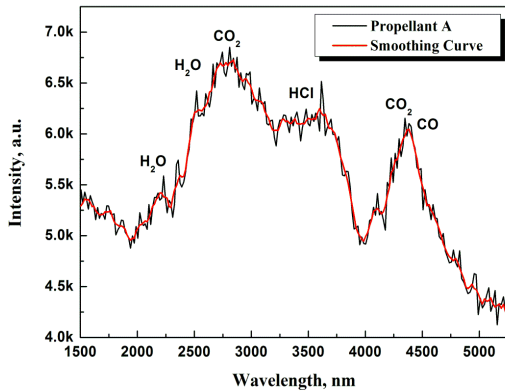


Fig. 9 IR : Emission Spectrum of Propellant A

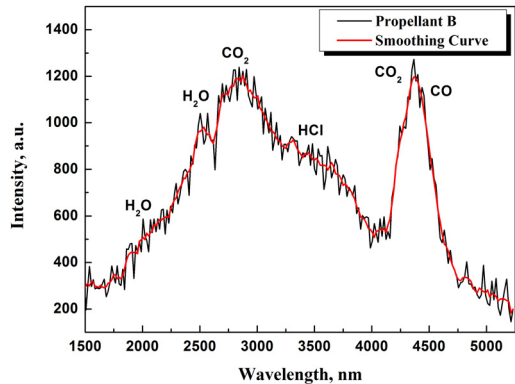


Fig. 10 IR : Emission Spectrum of Propellant B

및 추진제 플룸(Plume) 연구에서 피탐지를 위한 많은 연구가 진행되고 있다[12]. 본 연구에서는 추진제 연소 반응 시 발생하는 적외선 영역의 화학종을 확인하기 위해 측정을 수행하였다. Fig. 9와 10은 측정 결과 그래프이다. 제시한 바와 같이 추진제 A와 B 모두 H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, HCl 화학종이 검출되었다. 이는 선행 연구 결과 [13, 14]와 일치함을 확인하였다.

추진제의 스펙트럼 분석 결과 추진제 A와 B 모두 AlO, Na, K, Ca, H<sub>2</sub>O, HCl, CO<sub>2</sub>, CO 화학종 발생을 확인하였으며, 고체 알루미늄 입자의 첨가로 인해 중간 라디칼 AlO 파장 대역의 검출을 확인하였다.

## 5. 결 론

추진제를 고에너지 금속 알루미늄 분말 연소 시스템에 점화에너지 공급원으로 적용을 위한 기초 연구로서, 가시화가 가능한 strand burner를 제작하여 HTPB/AP/Al, HTPB/AP/Al 추진제의 연소 특성을 분석하였다. 연소 속도 측정 실험은 아르곤 가스를 사용하여 ~300 psia 까지 가압하였으며, 10 W의 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용한 비접촉식 복사에너지를 이용한 점화 방식을 사용하였다. 연소 속도 측정은 초고속 카메라를 활용한 프레임 분석 기법 및 광다이오드를 이용한 점화 및 연소시간 분석 기법을 적용하여 수행하

였으며, 연소 속도 측정 결과 AP/HTPE/Al 추진제가 AP/HTPB/Al 보다 연소 속도가 빠르게 측정되었다. 두 추진제 모두 0 ~ 300 psia 압력 범위에서 연소 속도는 증가하였으며 급격한 압력 지수 변화는 관찰되지 않았다.

스펙트로메터를 이용하여 300 nm ~ 800 nm, 1500 nm ~ 5000 nm의 방출 스펙트럼을 분석하여 추진제 연소반응 시 발생하는 화학종을 확인하였다. AP/HTPE/Al, AP/HTPB/Al 추진제의 방출 스펙트럼 측정 결과 두 추진제의 방출 스펙트럼이 유사함을 확인하였으며, 분석을 통해 연소 반응 시 발생하는 AlO, Na, K, Ca, H<sub>2</sub>O, HCl, CO<sub>2</sub>, CO 화학종을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 고에너지 금속 알루미늄 분말 연소 시스템의 점화원으로 적용 가능한 다양한 추진제 중에서 가장 적합한 조성 및 연소 속도를 선택할 수 있는 분석 기법으로 활용할 수 있을 것이며, 스펙트럼 측정 기법은 향후 추진제를 이용한 배기 플룸 분석 및 추진제 합성 연구 등에서 다양하게 사용될 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 LIG넥스원(주)의 “금속연료 연소장치 시스템 연구” 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다(계약번호Y12-005호).

## 참 고 문 헌

1. Kuo, K. K. and Summerfield, M., "Fundamentals of Solid Propellant Combustion," Vol. 90, 1984
2. Summerfield, M., Sutherland, G. S., Webb, M. J., Tabak, H. J., and Hall, K. P., "Burn Mechanism of Ammonium Perchlorate Propellants," Solid Propellants Rocket Research, Academic press, NewYork, 1960
3. 유지창, 정정용, 임유진, 고승원, "고체추진제의 고압 연소속도 측정 기법," 한국추진공학회지, 제10권, 제3호, 2006, pp.60-66
4. Carro, R., Arvanetes, J., Powell, A., Stephens, M., Petersen, E., and Smith, C., "High-Pressure Testing of Composite Solid Propellant Mixtures: Burner Facility Characterization," AIAA Paper 2005-3617
5. Stephens, M. A., Sammet, T., Carro, R., LePage, A., Reid, D., Seal, S., and Petersen, E., "New Additives for Modifying the Burn Rate of Composite Solid Rocket Propellants," AIAA Paper 2006-4948
6. Petersen, E. and Arvanetes J., "Monitoring strand burner combustion products using emission spectroscopy," AIAA paper 2007-5767
7. Arvanetes, J. C., "Design and Implementation of an Emission Spectroscopy Diagnostic in a High-Pressure Strand Burner for the Study of Solid Propellant Combustion," M.S. Thesis, University of Central Florida, 2004
8. Mamen, J., Goroshin, S., and Higgins, A., "Spectral Structure of the Aluminum Dust Flame," 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2005
9. Weiser, V. and Eisenreich, N., "Fast Emission Spectroscopy for a Better Understanding of Pyrotechnic Combustion Behavior," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 30, No. 1, 2005
10. 박영규, 유지창, 김인철, 이태호, "Vacuum Strand burner를 이용한 혼합형 고체 추진제의 저압 연소특성 연구," 한국추진공학회지, 제3권, 제1호, 1999, pp.95-103
11. 이상협, 임지환, 윤웅섭, "물을 산화제로 하는 나노 알루미늄 분말 연소의 압력 민감도 실험," 한국추진공학회 춘계학술대회, 2010
12. Avital, G., Cohen, Y., and Gamss, L., "Experimental and computational study of infrared emission from underexpanded rocket exhaust plumes," Journal of thermophysics and heat transfer, Vol. 15, No. 4, 2001
13. Fitzgerald, R. P. and Brewster, M. Q., "AP/HTPB laminate propellant flame structure: Fuel-lean intrinsic instability," Proceedings of the combustion institute, 2007, pp.2071-2078
14. Edwards, T. and Weaver, D. P., "Investigation of high pressure solid propellant combustion chemistry using emission spectroscopy," Journal of Propulsion, Vol. 2, No. 3, 1986