

Plunger 타입 유량조절장치를 적용한 덕티드 로켓용 가스발생기 개발 및 성능분석 : Part I

이정표¹ · 한승주² · 조성봉^{2,+} · 김경무³ · 임재일³ · 이기연³

¹브라질리아 대학, 브라질

²이노스페이스, 대한민국

³LIGNex1, 대한민국

Development and Performance Analysis of Gas Generator with Plunger-type Flow Control Valve for Ducted Rocket : Part I

Jungpyo Lee¹, Seongjoo Han², Sungbong Cho^{2,+}, Kyungmoo Kim³, Jaeil Lim³ and Kiyeon Lee³

¹University of Brasilia, Brazil

²INNOSPACE Co., Ltd., Republic of Korea

³LIGNex1 Co., Ltd., Republic of Korea

Abstract

For a preliminary study on a thrust-throttleable Variable Flow Ducted Rocket, a gas generator and flow control valve were developed, and ground combustion tests were performed. The gas generator and flow control valve operated at the required performance level for parameters, such as heat-resistance, combustion-time, pressure, and temperature. The combustion characteristics of a fuel-rich solid propellant mixed with Boron/MgAl/AP, etc., were also analyzed. A Plunger-type flow control valve was designed to control the discharge flow area, and it was confirmed that the flow control valve was able to control the combustion gas flow rate and pressure. However, due to the reduction of the discharge flow area caused by adhesion of combustion products, the combustion pressure continuously increased. The analysis of the pressure increase is covered in Part 2 of this paper.

초 록

추력조절이 가능한 가변유동형 덕티드 로켓(VFDR; Variable Flow Ducted Rocket)의 기초연구 목적으로 가스발생기와 유량조절장치를 개발하여 지상연소시험을 수행하였다. 연소시험을 통하여 본 개발에 대한 내열성, 연소시간, 압력 및 온도와 같은 성능 요구조건의 충족 여부를 확인하였으며 Boron/MgAl/AP 등을 혼합한 연료농후 고체추진제의 연소특성을 분석하였다. 유량조절장치는 Plunger 타입으로 개발하여 토출면적 조절로 유량 및 압력을 제어할 수 있음을 확인하였다. 그러나 토출 유로 내 연소 생성물 부착으로 인한 토출면적 감소에 따라 압력 안정화 구간 없이 연소압력이 증가하는 경향을 나타내었다. 토출면적 감소로 인한 압력증가의 연소특성 분석은 본 논문의 Part 2에서 다루어진다.

Key Words : Ducted Rocket(덕티드 로켓), Gas Generator(가스발생기), Flow Control Valve(유량조절장치), Plunger-type(Plunger 타입), Fuel-rich(연료농후), Adhesion(부착)

1. 서 론

덕티드 로켓은 연료농후 고체 추진제를 가스발생기에서 1차로 불완전 연소시켜 생성된 연소가스와 흡입되는 공기를 혼합하여 2차로 완전 연소를 하는 추진기관이다. 고체 추진제에는 1차 연소에 필요한 낮은 비율의 산화제만 포함되어 있으며 2차 연소에 필요한 산화제는 대기 중에서 별도로 공급받기 때문에 높은 비

추력을 갖는다. 따라서 동일 체적의 일반 고체로켓에 비해 우수한 성능을 갖고, 기동성이 뛰어나 차세대 추진시스템으로 많은 관심과 함께 1960년대부터 실전에 배치, 적용되고 있다[1-3]. 또한 최근에는 가스발생기에서 배출되는 연료 농후 상태의 불완전 연소가스 양을 조절하여 추력을 조절할 수 있는 가변유동형 덕티드 로켓을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-6]. 가변유동형 덕티드 로켓에서는 가스발생기에서 발생한 불완전 연소가스가 2차 연소실로 배출되는 출구에 유량조절장치를 설치하여 유량을 조절하며, 장착의 용이성 때문에 Plunger 타입과 Pintle 방식이 일반적으로 적용되고, 이 외에도 Rotary 밸브, Gate 밸브 및 Disk 밸브 방식 등이 적용되고 있다.

본 연구에서는 기초연구로서 Plunger 타입의 유량조절장치를 적용하여 추력조절이 가능한 덕티드 로켓용 가스발생기를 개발하고 지상연소시험을 통해 연료농후 고체추진제의 연소특성을 파악하고자 한다. 또한 내열성, 연소시간, 압력 및 온도 등의 성능요건을 충족하도록 각 부품의 재료 선정을 통해 설계된 가스발생기의 지상연소시험을 수행하여 개발품의 성능을 검증하고자 한다. 본 논문은 두 편으로 구성되어 있으며, Part 1에서는 Plunger 타입 유량조절장치를 적용한 가스발생기를 설계, 제작 및 시험한 결과를 다루고, Part 2에서는 시험 결과에 대한 성능분석을 수행한다.

2. 본 론

2.1 가스발생기 설계

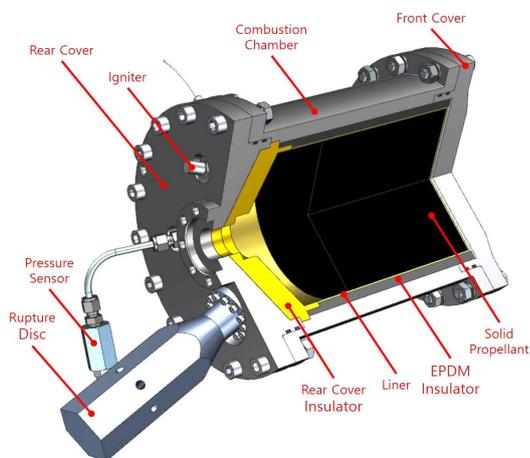


Fig. 1 Gas Generator Configuration

Table 1 Gas Generator Specifications

Component	Item	Value
Combustion Chamber Assembly (Front Cover, Combustion Chamber, Rear Cover)	Length	300 mm
	Combustion Chamber Inner Diameter	180 mm
	Combustion Chamber Outer Diameter	210 mm
	Material	SCM440
Combustion Chamber Liner	Thickness	1.5 mm
Combustion Chamber Insulator	Thickness	8.5 mm
	Material	EPDM
Rear Cover Insulator	Material	Glass/Phenolic
Rupture Disc Assembly	Heat-resistance Temperature	1,800 K
Rupture Disc Assembly	Body Material	SM45C
	Rupture Disc Material	Inconel600
	Insulator Material	Carbon/Phenolic
	Bursting Pressure	3,000 psia
Sealing Part	Seal Type	O-ring
	Material	FKM
Ignitor	Ignition Type	Pyrotechnic type
	Ignition Pressure	50~100 psia
	Ignition Delay	100 ms or less

가스발생기 조립체는 Fig. 1과 같이 연소관 조립체, 연소관 라이너, 연소관 내열재, 후방덮개 내열재, 파열판, 밀봉부품류, 점화기 등으로 구성된다. 본 연구에서 개발된 가스발생기는 고정형 또는 가변형 유량조절장치를 부착하여 조립이 가능하도록 고안되었고, Fig. 1에 도시된 가스발생기 조립체의 후방덮개 중앙에 있는 토출구에 유량조절장치가 조립된다. 가스발생기의 개발에서 기계적 요구조건인 2,000 psia의 최대운용압력(MEOP; Maximum Expected Operating Pressure)을 충족시키기 위해 고압-고하중을 고려한 ASME Sec.VIII Div.1 기준을 적용하여 설계, 제작하였으며, 수압보증시험을 통해 내압성능 및 기밀성을 검증하였다. 본 연구에서 개발한 가스발생기 규격은 Table 1과 같다.

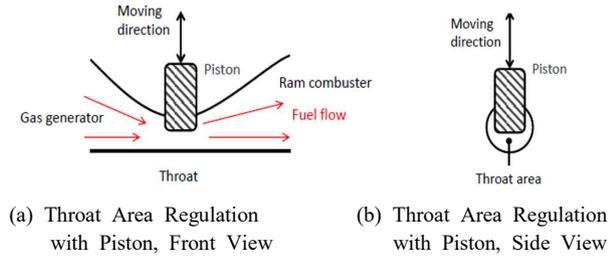


Fig. 2 Plunger Type Flow Control System[7]

2.2 유량조절장치

본 연구에서는 가스발생기 출구에 쉽게 장착하여 사용할 수 있고, 구동기 설계가 용이하며, 선형적으로 유로의 면적을 변화시킬 수 있는 Fig. 2의 Plunger 타입 유량조절장치를 선정하여 개발하였다.

토출관을 통해 배출되는 연소가스는 고온, 고압의 상태로 노즐목에서 큰 열유속이 발생된다. 따라서 Plunger는 높은 내열온도를 갖는 재질을 사용해야 하며, 본 연구에서는 2,610 °C의 높은 용융온도를 갖는 Molybdenum(MO)에 Titanium(Ti)과 Zirconium(Zr), Carbon(C)이 혼합된 합금인 TZM Molybdenum alloy (TZM)를 사용하였다.

2.2.1 고정형 유량조절장치

Plunger 타입의 가변형 유량조절장치 개발에 앞서 토출면적 변화가 배출 유량에 미치는 영향을 확인하기 위하여 고정형 유량조절장치를 고안하였다. 가스발생기의 토출부에 고정 유로면적을 갖는 오리피스를 삽입, 교체하여 연소가스의 유량을 조절하는 장치로서 Fig. 3과 같이 고정형 유량조절장치는 토출관, 전방 토

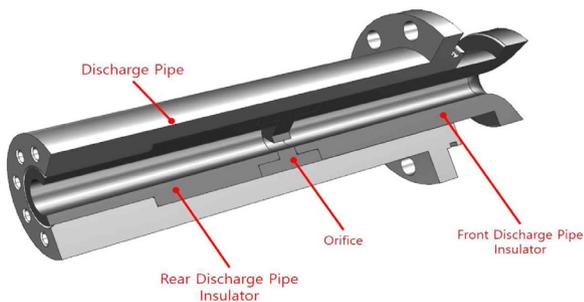


Fig. 3 Gas Generator Valve Pipe Configuration (Fixed Orifice Valve Pipe)

Table 2 Flow Control Valve Specifications

Component	Item	Gas Generator Valve Pipe	Gas Generator Control Valve
Discharge Pipe	Length	182 mm	
	Inner Diameter	30 mm	
	Outer Diameter	50 mm	
	Material	SCM440	
Rear Discharge Pipe Insulator	Rear Inner Diameter	14 mm	
	Outer Diameter	30 mm	
	Material	TZM	
Front Discharge Pipe Insulator	Front Inner Diameter	12 mm	
	Outer Diameter	30 mm	
	Material	TZM	
Orifice	Material	TZM	-
Plunger	Length	-	85 mm
	Outer Diameter	-	14.23 mm
	Material	-	TZM
Plunger Guide	Inner Diameter	-	14.3 mm
	Material	-	SCM440
O-ring	Material	FKM	
Plunger Pressure Seal Gasket	Thickness	-	3 mm
	Inner Diameter	-	14.25 mm
	Material	-	Graphite (HK-6)

출관 내열재, 후방 토출관 내열재, 오리피스로 구성되고, 규격은 Table 2와 같다. 고정형 유량조절장치의 토출관 오리피스 형상은 Plunger 타입 가변형 유량조절장치의 토출 형상과 유사하게 설계하였고, Fig. 4는 오리피스 개방비의 감소에 따른 개구 형상의 변화를 보여준다. 참고로 그림에서 선정한 개방비는 개방 형상을 확인하기 위한 목적으로 본 시험에서 적용한 시험조건과는 일치하지 않는다. Fig. 4(a)는 토출 오리피

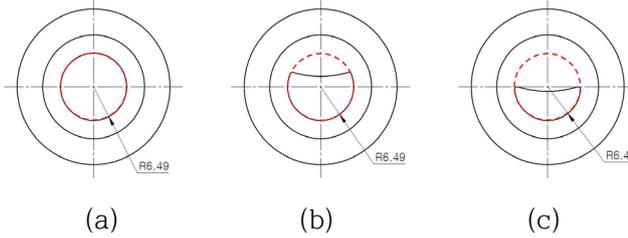


Fig. 4 Orifice Shape (a)Full, (b)70%, (c)45% Open

스가 완전 개방된 상태를 보여주고, Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 각각 오리피스 가 약 70%, 45% 개방된 상태를 보여준다.(그림에서 빨간 점선의 형상은 비교를 위한 것으로 완전 개방 상태를 보여준다) 완전 개방된 상태 외에는 오리피스 형상이 원형이 아니기 때문에 원형으로 가정하였을 때의 등가면적을 이용하여 직경을 정의 및 계산하였다.

2.2.2 가변형 유량조절장치

연소 중 Plunger 위치를 제어하여 유량을 조절할 수 있는 가변형 유량조절장치는 유량조절 밸브 조립체와 Plunger를 작동하기 위한 제어 구동장치로 크게 구분된다. 장치의 형상 및 구조는 Fig. 5와 같고, 규격은 Table 2와 같다. Plunger의 위치는 서보모터로 제어되며, 최대 연소압력인 1,500 psi에서 가변형 유량조절장치의 작동이 가능하도록 토크를 산출하여 모터를 선정하였다.

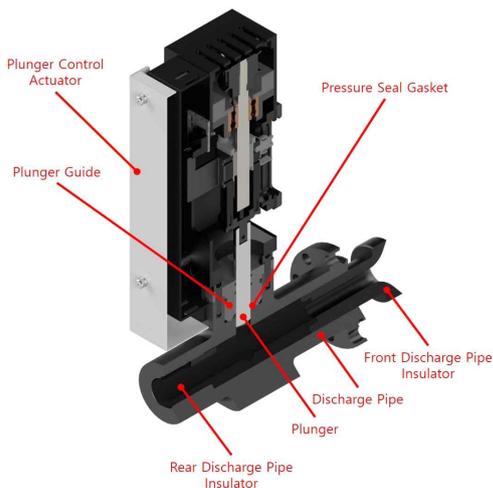


Fig. 5 Gas Generator Control Valve Configuration (Plunger-type Flow Control Valve)

2.3 추진제

가스발생기의 추진제는 보론(Boron), MgAl, 과염소산 암모늄(AP; Ammonium perchlorate) 등으로 혼합된 고체추진제이며 밀도는 1.566 g/cc이다. 추진제 그레인은 End-burning 타입의 직경 160 mm, 길이 75 mm 원통형으로 제작되었다. 추진제의 압력에 따른 연소율은 Strand-burner를 이용하여 추진제 생산 배치별로 측정하였고, Classical ST. Roberts burning rate law[8]에 따라 압력의 함수식으로 표현할 수 있다. 추진제의 연소율 식은 추진제 생산 배치에 따라 결정되고, 고정형 유량조절장치가 적용된 GG-002, GG-003 시체의 연소율 식은 Eq. 1, GG-004 시체의 연소율 식은 Eq. 2와 같다. 가변형 유량조절장치가 적용된 GG-009 시체의 연소율 식은 Eq. 3과 같다.

$$\dot{r} [in/s] = 0.00517P^{0.581} [psi] \quad (1)$$

$$\dot{r} [in/s] = 0.0106P^{0.452} [psi] \quad (2)$$

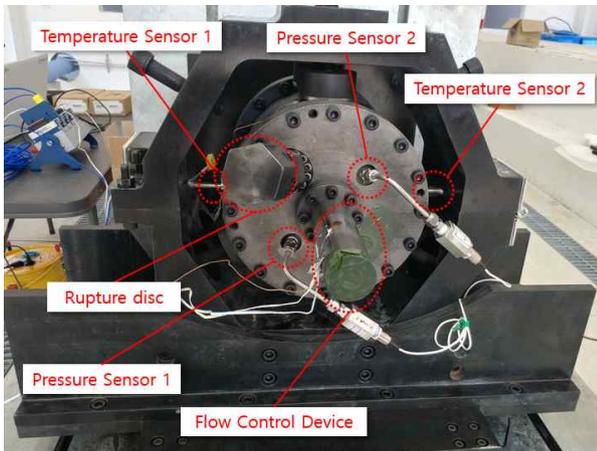
$$\dot{r} [in/s] = 0.0289P^{0.258} [psi] \quad (3)$$

2.4 고정형 유량조절장치가 적용된 가스발생기의 평형 내탄도 해석

11.0 mm, 11.5 mm, 12.0 mm(완전개방)의 세 가지 토출 등가직경을 갖는 고정형 유량조절장치가 적용된 가스발생기에 대해 Eq. 1, 2의 관계식을 이용하여 고체추진제의 평형 내탄도 해석을 수행하였고, 해석 결과는 Table 3과 같다. 특성속도(C*)는 CEA 프로그램 (Chemical Equilibrium with Applications)을 이용하여 계산한 1,307 m/s를 적용하였고, 연소효율은 99.9%로 가정하였다. 내탄도 해석을 통해 각 시체에 대해 연소실 압력, 연소율, 연소시간, 질량유량 등의 평형 상태 값을 예측할 수 있고, Table 3에서와 같이 오리피스 직경이 감소함에 따라 연소실 압력이 상승함을 확인할 수 있다. 직경 11.5 mm와 11.0 mm에서의 압력 상승이 12.0 mm와 11.5 mm의 압력 상승보다 작은 이유는 앞서 언급하였던 추진제 생산 배치에 따라 결정된 연소율 특성인 추진제 연소율 식(Eq. 1, 2)의 상수와 지수가 각각 다르기 때문이다.

Table 3 Internal Ballistics Analysis Results

Test No.	D_{ori} (mm)	P_c (bar)	\dot{r} (mm/s)	t_b (sec)	\dot{m}_p (g/s)
GG-002	12.0	7	1.92	39.1	60.4
GG-003	11.0	10.6	2.45	30.6	77.2
GG-004	11.5	10.2	2.57	29.2	80.9

**Fig. 6** Gas Generator Equipped with Measuring Sensors**Fig. 7** Ground Combustion Test of Gas Generator with Control Valve

3. 시험 결과 및 분석

오리피스를 변경하여 토출면적을 조정할 수 있는 고정형 유량조절장치와 Plunger의 위치를 조절하여 토출면적을 변경할 수 있는 가변형 유량조절장치를 가스발생기에 적용하여 지상연소시험을 수행하였다. Fig. 6과 같이 후방덮개 2개소에 압력센서를 장착하고, 연소관 측면 후방부 2개소에 온도센서를 장착하여 압력과 온도를 측정하였다. 가스발생기와 유량조절장치 개발 시

기계적 요구조건인 1,800 K의 내열온도, 1,500 psia의 연소압력, 25 sec 연소시간을 충족시키기 위해 특수 내열소재(몰리브덴 합금인 TZM 등)와 고온용 밀봉부품을 적용하였고, 지상연소시험을 통해 본 개발에서의 성능적 요구조건을 충족하여 운용됨을 확인하였다. Fig. 7은 가변형 유량조절장치를 장착한 가스발생기의 연소시험 장면이다. 시험에 사용된 모든 추진제는 조성비가 동일하기 때문에 추진제에 따른 연소특성 차이가 크지 않다고 가정하였고, 고정형 유량조절장치의 시험에서 토출 오리피스 형상 외 시험 변수는 동일하게 하였다. 가변형 유량조절장치를 적용한 GG-009 시체의 연소시험 시퀀스는 토출관 완전개방 상태(12 mm)에서 연소를 시작하여 연소 3초 후 토출 등가직경을 11 mm로 감소시키고, 6초 후 다시 완전개방 하도록 설정하였다.

3.1 고정형 유량조절장치 적용 연소시험 결과

세 가지의 다른 토출면적을 갖는 오리피스를 이용하여 연소시험을 수행하였고, Fig. 8에서 Fig. 10까지는 각 시체의 시간에 대한 압력선도를 나타낸다. 연소시간은 연소 시작부터 최대 압력 지점까지로 고려하였고, 정의된 연소시간을 이용하여 평균 연소실 압력을 계산하였다.

3.1.1 시체 GG-002

토출 등가직경 12 mm의 완전 개방형인 GG-002는 연소실 압력이 7 bar로 예측되었으나, 시험 결과 평균 압력이 9.9 bar로 측정되었다. 연소시간 동안 완만하게 압력 증가가 나타났고, 시험데이터와 내탄도 해석의 압력 차이는 약 2.9 bar로 다른 시체에 비해 작게 나타났다.

3.1.2 시체 GG-003

토출 등가직경 11 mm의 GG-003은 연소실 압력이 10.6 bar로 예측되었으나, 시험 결과는 평균 압력이 22.9 bar로 측정되었다. 연소 초반에는 압력이 완만하게 증가하다가 약 연소 후 8초부터 압력이 급격히 상승하였고, 연소 후 약 18초에서부터는 압력이 급격히 하강하였다. 또한 연소 후 약 12초부터 18초까지 압력 증가와 감소를 반복하는 압력 진동 구간이 관찰된다.

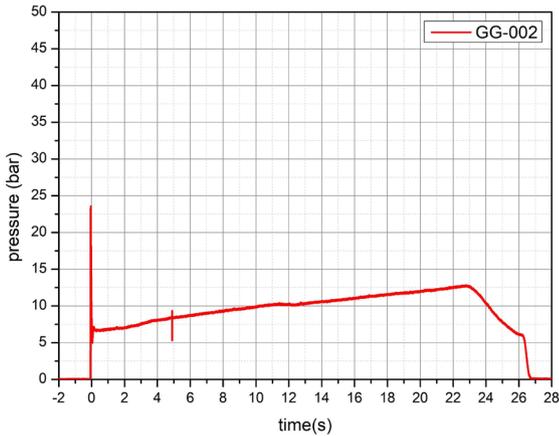


Fig. 8 GG-002: Chamber Pressure Time Traces

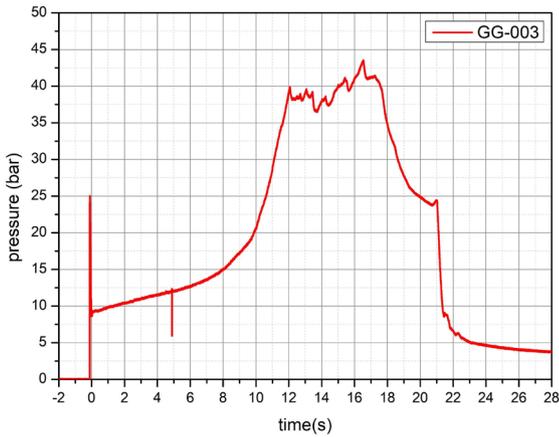


Fig. 9 GG-003: Chamber Pressure Time Traces

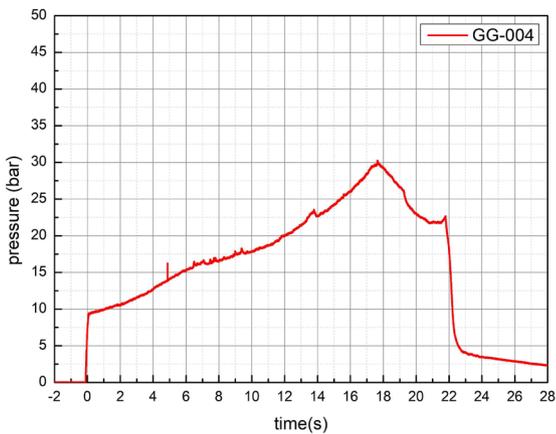


Fig. 10 GG-004: Chamber Pressure Time Traces

3.1.3 시제 GG-004

토출 증가직경 11.5 mm의 GG-004는 내탄도 해석에서 연소실 압력이 10.2 bar로 예측되었으나, 시험

평균 압력은 17.8 bar로 측정되었다. 토출면적이 상대적으로 작은 시제 GG-003과 비교할 때 급격한 압력 상승은 보이지 않았으나, 연소 후 약 7초에서 작은 압력 진동이 발생하였다.

고정형 유량조절장치를 적용한 가스발생기의 연소시험을 통하여 토출면적이 작을수록 연소실 압력이 높고, 연소 초기에 형성된 연소실 압력이 Table 3의 내탄도 해석을 통해 예측된 압력과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 모든 시제에서 압력 안정화 구간이 없고 연소실 압력이 시간에 따라 증가하여 총 연소시간에 대한 평균 연소실 압력은 내탄도 해석 결과보다 높게 나타났다. 그리고 토출면적이 클수록 연소실 압력이 낮아 토출 유량이 감소하고, 연소시간이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 토출면적을 조절함으로써 연소가스의 토출 유량을 제어할 수 있다는 가변형 유량조절장치의 구현 가능성을 확인할 수 있었다.

3.2 가변형 유량조절장치 적용 연소시험 결과

Figure 11은 Plunger 타입 가변형 유량조절장치를 적용한 GG-009의 시험 압력선도와 가변형 유량조절장치의 제어 구동기로부터 획득한 Stroke 데이터를 같이 나타낸 것이다. Stroke는 밸브 조립체에서 Plunger의 위치를 나타내며, Stroke가 13.5 mm에 위치할 경우 완전개방된 상태(등가직경 : 12 mm)이고 8.57 mm에 위치할 경우 약 84% 개방된 상태(등가직경 : 11 mm)이다. 연소 후 3초에서 Stroke가 8.57 mm로 감소할 때 압력이 증가하고, 연소 후 6초에 stroke가

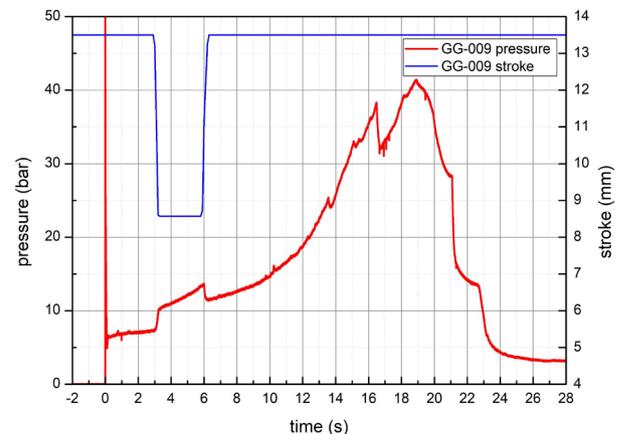


Fig. 11 GG-009: Chamber Pressure Time Traces

13.5 mm로 증가할 때 압력이 감소함을 확인할 수 있다. Plunger 타입 가변형 유량조절장치를 적용한 가스발생기의 연소시험에서 토출면적을 조절함에 따라 유량이 제어됨을 확인할 수 있었지만, 고정형 유량조절장치를 적용한 가스발생기 연소시험 결과와 마찬가지로 연소시간에 따라 압력이 증가하고, 연소 후반 압력진동도 발생하였다.

3.3 연소시험 결과 분석

가스발생기의 연소시험 결과, 모든 시제에서 압력안정화 구간 없이 시간에 따라 연소압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 고체추진제를 사용하는 추진기관에서 연소 중 연소실 압력 상승은 주로 노즐목 감소 또는 추진제 연소 표면적 증가에 기인한다. 보론이나 알루미늄 등의 연료농후 고체추진제를 사용하는 가스발생기에서는 미연소된 고체추진제의 연소 생성물이 토출 유로에 부착되어 노즐목 면적이 감소될 수 있다. 특히 원형의 토출 형상이 아닌 Plunger 형상에서는 연소 생성물의 부착이 쉽게 발생할 것으로 사료된다. 연소 후 토출관의 내부를 확인한 결과, GG-002를 제외한 모든 시제에서 오리피스에 연소 생성물이 부착되어 오리피스의 연소가스 배출 유효면적이 크게 감소된 것을 확인하였다. Fig. 12는 가스발생기 시험 전·후 토출 오리피스 형상을 보여주며, 연소 후 생성물의 부착으로 토출면적이 좁아졌음을 확인할 수 있다. 다른 시제들과 달리 GG-002는 연소 후 생성물의 부착이 없음을 확인하였고, 이는 완전 개방형의 토출 오리피스가 원형의 형상으로 인해 연소 생성물의 배출이 용이하기 때문으로 판단된다.

완전개방형의 시제 GG-002에서 연소 전·후 토출면적 변화가 없었음에도 불구하고 완만한 압력 상승이 나타난 주요 요인은 추진제의 연소 표면적 증가로 사료되며, 연소 시 일정한 연소 표면적을 유지하도록 설계된 고체추진제 그레이너에서의 크랙 발생, Coning effect, Side-burning 등과 같은 비평형 요인들로 인해 예상치 못한 연소 표면적의 증가가 발생할 수 있다. 본 연구에서의 고체추진제 그레이너는 End-burning 타입으로 연소면적이 연소시간에 따라 일정하도록 설계되었지만, 상기의 비평형 요인들로 인해 Fig. 8에서 보는 것과 같이 압력이 증가한 것으로 추정된다.

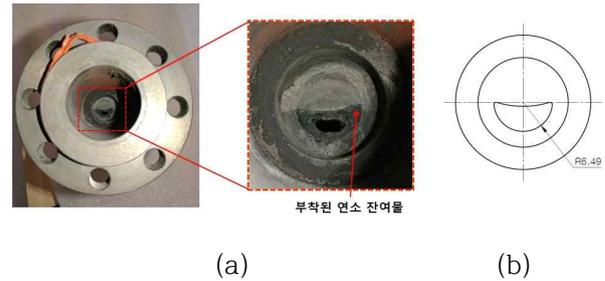


Fig. 12 Orifice Shape after Combustion(a), before Combustion(b)

연소 시 발생하는 압력진동도 연소 생성물이 토출 오리피스에 반복적으로 탈착되어 상승과 하강이 반복적으로 나타난 것으로 판단된다. 이러한 압력진동은 2차 연소를 하는 덕티드 로켓의 메카니즘 상 심각한 연소불안정을 유발할 수 있기 때문에 안정된 연소를 위해 압력진동을 감쇄하는 노력이 필요하다.

덕티드 로켓용 가스발생기에서 정확한 추력조절 및 안정된 연소를 위해 연소 생성물의 부착이 어떻게 성능에 영향을 끼치는지 확인이 필요하고, 본 논문의 Part. 2에서 이에 대한 성능분석이 수행된다.

4. 결 론

가변유동형 덕티드 로켓의 기초연구 목적으로 덕티드 로켓추진기관에 적용할 가스발생기를 개발, 제작하여 연소시험을 수행하였다. 가스발생기로부터 배출되는 연소가스 유량을 제어하기 위하여 고정형과 가변형 유량조절장치를 고안하였고, 고압-고하중 기준을 고려하여 가스발생기를 설계, 제작하였다. 또한 지상연소시험을 통해 가스발생기가 내열, 연소시간, 압력 및 온도 등의 성능적 요구조건을 충족하며 정상적으로 운용됨을 확인하였다.

연소 초기 형성된 연소실 압력은 평형 내탄도 해석을 통해 예측된 결과와 잘 일치하였지만, 연소가 진행됨에 따라 연소실 압력이 증가하여 해석 결과와 큰 차이를 보였으며, 연소 중 토출면적 감소와 연료 표면적의 변화가 이러한 연소실 압력증가의 주요 요인으로 판단된다. Plunger 타입과 같이 토출관에 형상적으로 큰 변화가 있는 가스발생기의 유량조절장치에서 주로

발생 가능한 연소 생성물의 부착 현상은 성능 예측을 어렵게 만들 뿐만 아니라 심각한 경우 내부의 압력 증가로 폭발을 일으킬 수 있다. 특히 용융점이 높은 Boron이 포함된 고체추진제의 불완전 연소 생성물은 Plunger와 같은 흐름 저항부에 쉽게 응착되는 것으로 판단된다. 따라서 연소 생성물의 응착을 야기하는 추진제 연소특성에 대한 추가적인 연구와 응착되는 연소 생성물의 누적을 방지할 수 있는 Plunger 및 내부 유로 형상 설계 방안에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료된다. 또한 추진제의 조성이 동일하더라도 추진제의 연소율이 다르게 나타날 수 있고, 이는 배출 유량 및 연소실 압력에 영향을 끼칠 수 있기 때문에 추진제 연소율 특성에 대한 연구가 추가적으로 수반되어야 할 것이다.

안전하고 성능 예측이 가능한 가스발생기의 개발을 위해 토출면적 변화가 압력에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구가 추가로 필요하고, 이에 대한 분석은 ‘Plunger 타입 유량조절장치를 적용한 덕티드 로켓용 가스발생기 개발 및 성능분석 : Part 2’에서 수행된다.

propulsion system for meteor and its background in german airbreathing motor technology,” ISABE-2005-1149, *17th International Symposium on Air Breathing Engines*, Munich, Germany, Sept. 2005.

- [7] A. Alan, “Pressure control of gas generator in throttleable ducted rockets: A Time delay resistant adaptive control approach,” Master Thesis, Bilkent University, 2017.
- [8] F.E.C. Culick, “Combustion instability in solid rocket motors, Volume II: A Guide for motor designers,” CPIA Publication 290, Janu. 1981.

References

- [1] W. H. Miller, W. M. Burkes, and S. E. McClendon, “Design approach for variable flow ducted rockets,” AIAA-81-1489, *AIAA/SAE/ASME 17th Joint Propulsion Conference*, Colorado, July 1981.
- [2] R. A. Stowe, “Performance prediction of a ducted rocket combustor,” Laval University, 2001.
- [3] G. P. Sutton, *Rocket Propulsion Elements*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992.
- [4] H. J. Choi, H. S. Hyun, K. H. Lee, I. S. Park, J. Y. Lee, H. U. Youn, and J. S. Lim, “Characteristics of flow rate control for solid fuel gas generator,” *The Korean Society of Propulsion Engineer, KSPE Fall Conference*, 2011.
- [5] P. W. Hewitt., “Status of ramjet programs in the United States,” AIAA-2008-5265, *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Hartford, CT., July 2008.
- [6] H. Besser and H. Weinreich, “The Ducted rocket