

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

한승주¹ · 이정표² · 조성봉^{1,†} · 길태욱³ · 김민겸³

¹이노스페이스, 대한민국

²브라질리아 대학, 브라질

³LIGNEX원, 대한민국

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

Seongjoo Han¹, Jungpyo Lee², Sungbong Cho^{1,†}, Taeock Khil³ and Minkyum Kim³

¹INNOSPACE Co., Ltd., Republic of Korea

²University of Brasilia, Brazil

³LIGNEX Co., Ltd., Republic of Korea

Abstract

In this study, a numerical approach was utilized to observe the phenomena in the ground combustion test of a gas generator for a ducted rocket with a plunger-type flow control device. The design factors were also identified through the analysis. It was observed that the pressure increase without the adhesion of the combustion product at the discharge pipe was quite similar to the analysis assuming a cone-shaped erosive burning effect. The pressure increase in most cases was similar to the analysis results when assuming the change in discharge pipe area due to the adhesion of combustion products. Moreover, it was also established that for a given grain shape and discharge flow area, the effect of the adhesion of combustion products has a significant effect on the combustion chamber pressure for cases over $n=0.45$.

초 록

본 연구에서는 plunger 타입 유량조절장치를 적용한 가스발생기의 지상연소시험에서 발생한 현상에 대하여 해석적 접근을 수행하였고, 추후 가스발생기 설계에 요구되는 설계인자를 파악하였다. 토출관 내 연소 생성물이 부착되지 않은 경우의 압력상승은 콘 형태의 침식연소를 가정한 해석 결과와 경향이 유사하였으며, 다른 시험 결과에서의 압력상승은 침식연소와 함께 토출관 내 연소 생성물 부착에 따른 토출 특성 변화를 가정하여 해석한 결과와 유사한 경향을 보였다. 또한, 동일한 토출 특성 변화 상수에 대해 압력지수의 영향을 비교한 결과, 지상연소시험에서 수행한 그레이인 형상과 토출면적에 대해 압력지수 0.45 이상의 경우에 연소 생성물 부착이 연소실 압력에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 파악되었다.

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

Nomenclature

A_b : burning surface area

A_t : discharge flow area

a_{st} : burning rate constant

Received: Oct. 19, 2020 Revised: Jan. 15, 2021 Accepted: Jan. 19, 2021

† Corresponding Author

Tel: +82-44-998-2168, E-mail: sbcho@innospc.com

© The Society for Aerospace System Engineering

| | |
|-----------------|--|
| C_d | : discharge coefficient |
| k | : rate of discharge diameter change |
| \dot{m}_c | : combustion chamber mass flow rate |
| \dot{m}_{out} | : discharged mass flow rate |
| \dot{m}_{gen} | : generated mass flow rate |
| n | : burning rate constant (pressure index) |
| P_{atm} | : atmospheric pressure |
| P_c | : combustion chamber pressure |
| R | : gas constant |
| T_c | : combustion chamber temperature |
| V_c | : combustion chamber volume |
| γ | : specific heat ratio |
| $\eta_{r,b}$ | : correction coefficient of burning rate |

1. 서 론

덕티드 로켓용 가스발생기는 연료농후 고체추진제를 연소시켜 2차 연소실로 공급하며, 2차 연소실로 공급된 연료농후 연소가스는 대기로부터 흡입된 공기와 혼합되어 연소된다. 비행고도 변화와 유연한 임무수행 능력을 향상시키기 위하여 덕티드 로켓 중에 가변유동형 덕티드 로켓(VFDR; Variable Flow Ducted Rocket)에 대한 연구가 수행되어 왔다[1-6]. VFDR은 1차 연소실 압력 변화를 통해 추진제의 연소량을 조절하여 2차 연소실로 공급되는 연료농후 연소가스의 양이 조절되는 방식으로 작동된다. Fig. 1은 'Plunger 타입 유량조절장치를 적용한 덕티드 로켓용 가스발생기 개발 및 성능분석 : Part I'에 소개된 고정형과 가변형 유량조절장치를 적용한 가스발생기 지상연소시험 결과를 나타낸 것이며, 이에 대한 시험조건은 Table 1에 나타내었다[7]. 가스발생기의 연소시험 결과, 시간에 따라 연소면적이 일정한 End-burning 타입의 그래인 형상임에도 불구하고 모든 경우에서 연소압력이 증가하는 것을 확인하였다. 연소 후 토출관 단면을 분석해본 결과, GG-002를 제외한 모든 시제에서 연소 생성물이 오리피스에 부착되어 연소가스가 배출되는 토출구의 유효면적이 크게 감소한 것을 확인하였다. 지상연소시험에서 용융된 고체 금속 입자가 토출 유로에 부착되는 현상이 발견됨에 따라, 토출면적 및 토출계수 변화의 경향을 파악하는 것이 필요하였으며, 토출면적이 변화하지 않은 GG-002의 압력증가 원인에 대

한 분석이 추가적으로 요구되었다. 따라서 본 연구에서는 'Plunger 타입 유량조절장치를 적용한 덕티드 로켓용 가스발생기 개발 및 성능분석 : Part I'의 지상연소시험 결과를 분석하고 발생된 문제의 원인을 내년도 해석을 통해 파악하고자 한다.

Table 1 Experimental Conditions of Ground Test

| Grain Type | End-Burning | |
|----------------|---------------|---|
| Grain Geometry | Length (mm) | 75 |
| | Diameter (mm) | 160 |
| Flow Control | Plunger type | |
| | Time (sec) | Equivalent discharge pipe diameter (mm) |
| GG-002 | 10 to end | 12.0 |
| GG-003 | 10 to end | 11.0 |
| GG-004 | 10 to end | 11.5 |
| GG-009 | 10-13-16 | 12.0-11.0-12.0 |

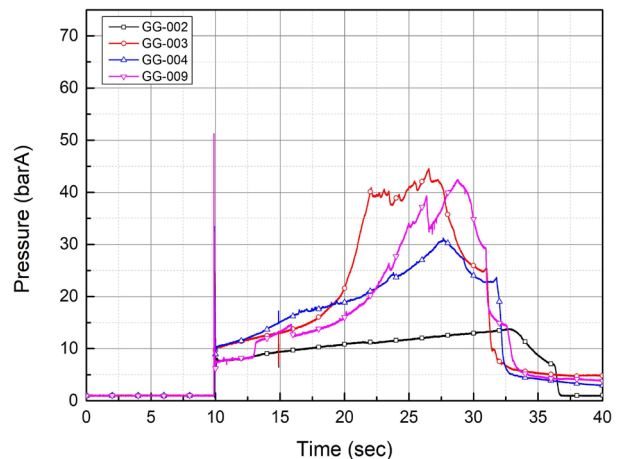


Fig. 1 Ground Test Results of Gas Generator

2. 본 론

내탄도 해석은 연소실 내 연소가스가 채워져 있는 공간을 Fig. 2와 같은 검사체적으로 고려해 Eq. 1로 표현되는 압력기울기 관계식을 이용하여 수행하였다. 압력기울기 관계식은 이상기체 방정식으로부터 유도하였으며, 질량유량의 변화는 Eq. 2와 같다. 연소실에서 생성되는 질량유량은 Eq. 3으로 표현되며, 토출관을 통해 배출되는 질량유량은 유동질식(choking)상태가 일어나지 않는 경우와 일어나는 경우로 나누어 각각 Eq. 4와 Eq. 5를 이용하여 해석하였다. 시간 진전은 Runge-Kutta 4th order를 이용하였고, 내탄도 해석의 흐름도는 Fig. 3과 같다.

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{\dot{m}_c RT_c - P_c V_c}{V_c} \quad (1)$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_{gen} - \dot{m}_{out} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{gen} = A_b (\eta_{rb} a_{st} P_c^n) \rho_{prop} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{out} = C_d A_t \frac{P_c}{RT_c} \sqrt{\frac{(P_c - P_{atm}) RT_c}{P_c}} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{out} = C_d A_t \frac{P_c}{RT_c} \sqrt{\frac{\gamma}{RT_c} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}} \quad (5)$$

연소실 압력은 발생 유량과 배출 유량이 균형을 이루지 못하는 경우에 증가하며, 발생 유량이 증가하는 경우와 배출 유량이 감소하는 경우로 나뉜다. GG-002의 경우에 토출관 막힘 현상이 발생하지 않았음을 고려해 보면, 발생되는 질량유량이 증가하는 경우에 해당되며, 시간에 따라 연소면적이 일정하게 설계된 End-burning 타입 추진체 그레인에서는 crack, side-burning, coning effect 등이 원인으로 작용할 가능성이 있다[2].

본 연구에서는 연소면적 증가의 여러 원인 중 연소실 내부 형상을 고려하여 콘 형태로 침식연소의 효과가 일어난다고 가정하였으며 GG-002의 결과를 이용

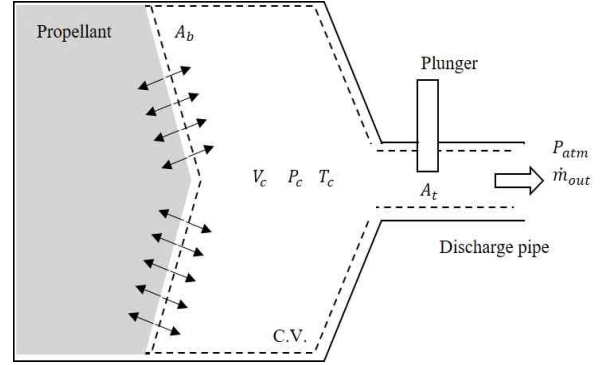


Fig. 2 Schematic of Control Volume and Variables

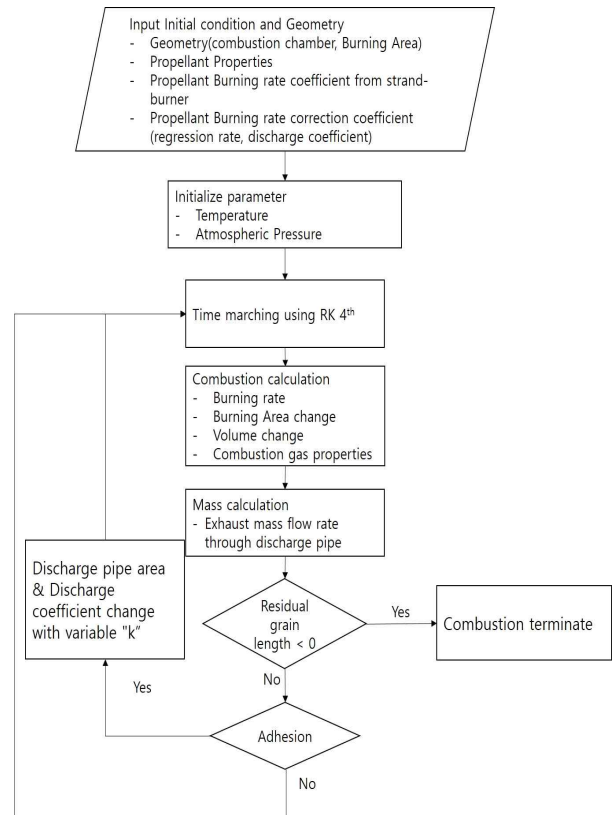


Fig. 3 Flow Chart of Gas Generator Internal Ballistics

하여 검증하였다.

Equation 3의 연소율 보정계수(η_{rb})는 추진체의 연소율을 측정하는 strand-burner 연소율과 실제 연소실 환경에서 일어나는 현상을 보정하는 계수이다. 본 연구에서는 연소율 보정계수를 추진체가 제작된 생산 배치별로 동일하게 적용하였으며, 제공받은 추진체의 strand-burner 연소율과 보정계수는 Table 2에 도시

하였다.

Figure 4와 같이 plunger 타입의 유량조절 방식은 토출면적이 변화함에 따라 토출관 형상이 급격하게 변화한다. 이에 따라 유로의 형상과 관련된 토출계수 또한 함께 변화하게 된다. 그러나 본 연구에서는 해석의 단순화를 위해 토출관 형상을 원형으로 가정하였으며, Table 1에 도시된 바와 같이 등가직경으로 환산할 경우 토출면적 변화에 따른 형상 변화가 크지 않기에 토출계수가 일정하다고 가정하였다. 또한 Eq. 6과 같이 토출 직경 변화 상수(k)를 정의하여 내탄도 해석에 적용하였으며, 토출 직경 변화는 선형적으로 일어난다고 가정하였다.

$$k = \frac{dD_t}{dt} \quad (6)$$

Table 2 Burning Rate Coefficient of Solid Propellant

| | a_{st} | n |
|--------|----------|-------|
| GG-002 | 0.0052 | 0.581 |
| GG-003 | 0.0052 | 0.581 |
| GG-004 | 0.0106 | 0.451 |
| GG-009 | 0.0289 | 0.258 |

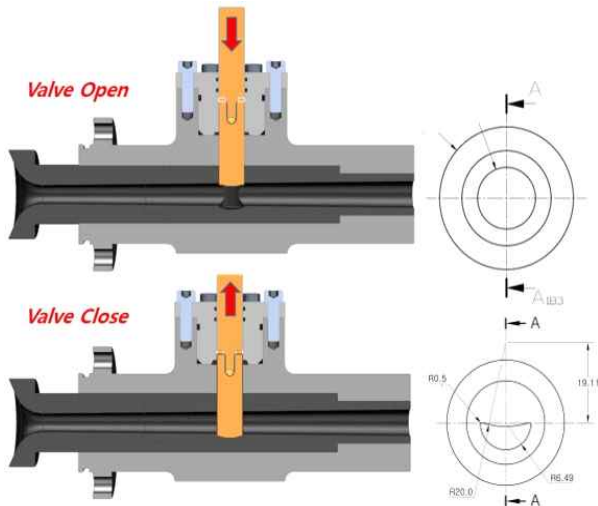


Fig. 4 Flow Control Valve and Discharge Pipe Configuration

3. 해석 결과

Figure 5에서 Fig. 8까지의 실선은 시험 결과를, 그리고 1점 채선과 2점 채선은 각각 토출 특성의 변화가 없는 경우와 토출관 벽면에 용융된 고체연료 입자가 부착되어 토출 특성의 변화가 고려된 경우의 해석 결과를 나타낸다.

Figure 5에 나타난 GG-002의 시험 결과에서 연소 생성물의 부착이 확인되지 않음에 따라 토출 직경 변화 상수를 1로 가정하였으며, 콘 형태의 침식연소 효과에 대한 검증을 수행하여 Table 3에 도시하였다.

Figure 6과 Fig. 7인 GG-003과 GG-004는 토출 직경 변화가 고려된 경우와 고려되지 않은 경우에 대해 해석을 진행하였다. GG-003의 경우 토출 직경의 변화가 선형적이지 않았으나, GG-004의 경우 토출 직경이 선형적으로 변화한다는 가정에 상당히 부합하는 결과가 도출되었다. GG-003의 지상연소시험에서 특정 토

Table 3 Correction Coefficient for Internal Ballistics

| | Ang_c (deg) | η_{r_b} | C_d | k |
|--------|------------------|--------------|-------|-----------------------|
| GG-002 | 24 | 0.88 | 0.88 | 1 |
| GG-003 | 24 | 0.88 | 0.88 | 0.99005 |
| GG-004 | 24 | 0.85 | 0.88 | 0.99183 |
| GG-009 | 24 | 0.75 | 0.88 | 1-0.99005 -0.99005 |

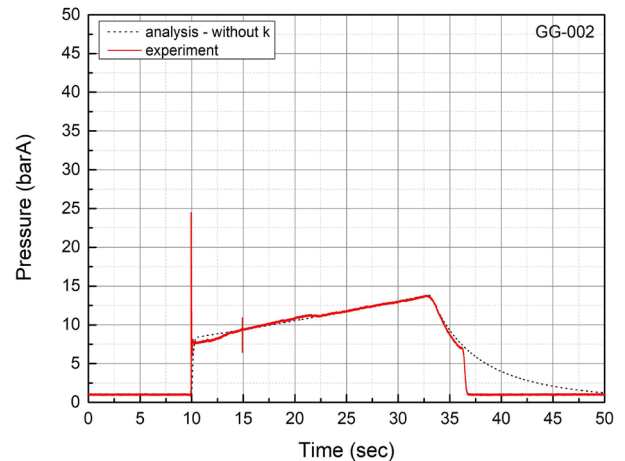


Fig. 5 Comparison of Ground Test Results and Internal Ballistics Analysis (GG-002)

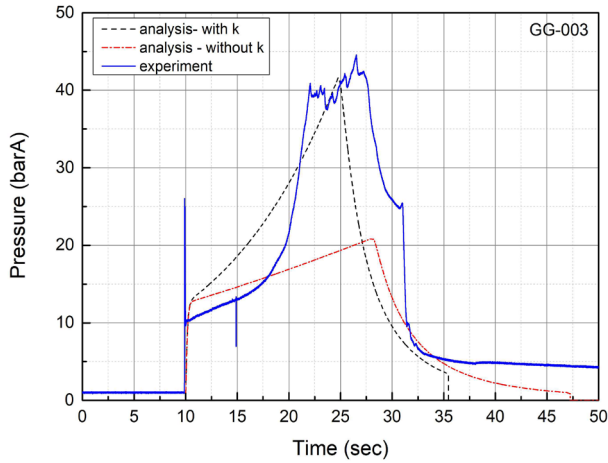


Fig. 6 Comparison of Ground Test Results and Internal Ballistics Analysis (GG-003)

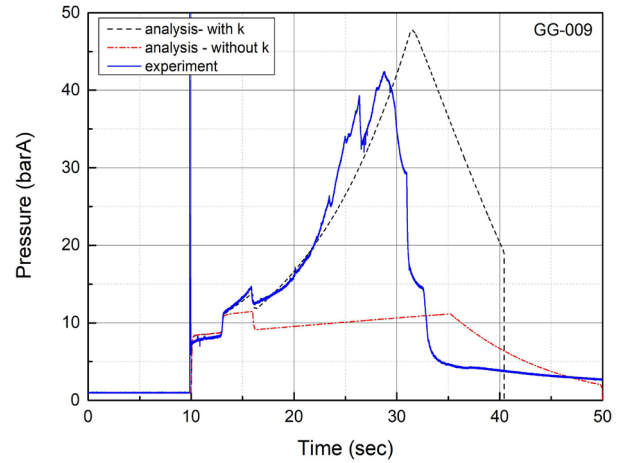


Fig. 8 Comparison of Ground Test Results and Internal Ballistics Analysis (GG-009)

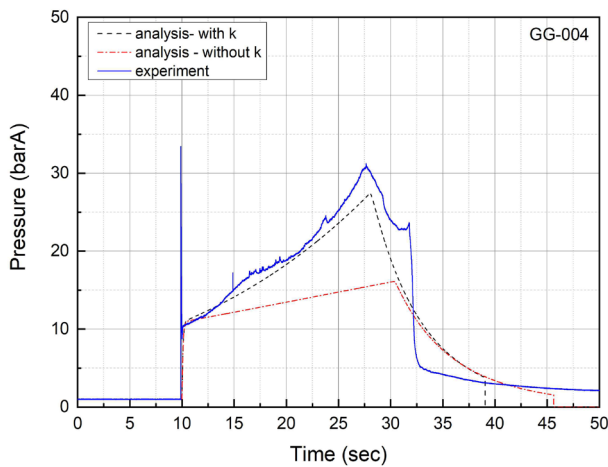


Fig. 7 Comparison of Ground Test Results and Internal Ballistics Analysis (GG-004)

출관 형상 또는 면적을 기점으로 연소 생성물의 부착 현상이 가속되어 선형적 직경 변화를 가정한 해석 결과와의 편차가 발생한 것으로 추정되나, 정확한 원인 규명을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

고정형에서 도출된 보정 상수들은 Table 3에 나타내었으며 이를 바탕으로 가변형 유량조절장치가 적용된 시험에 대하여 성능해석을 수행하였다.

연소율 보정계수는 점화 직후 형성되는 연소실 압력과 strand-burner 연소율로 계산된 연소실 압력의 비율로 선정하였으며, 제작된 추진제 생산 배치 별로 다른 값을 적용하였다.

Figure 8은 GG-009의 해석 및 시험 결과를 나타내며, GG-009의 토출면적 제어 시퀀스는 Table 1에 나타난 것과 같이 GG-002 - GG-003 - GG-002에 해당하는 면적 순으로 수행되었다. 10 sec에서 13 sec 동안의 압력은 GG-002의 결과와 유사하게 나타났으며, GG-003과 동일한 토출면적을 가지는 13 sec에서 16 sec 구간은 시험 결과와 해석 결과가 상당히 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 그러나 16 sec 이후에는 토출관이 완전 개방 상태(GG-002)로 변화함에 따라 약간의 압력이 감소하였으나, 이후 부착이 일어나는 가정과 유사한 기율기로 압력이 증가하는 것을 고려해 보았을 때, 연소 생성물의 부착은 단순히 토출면적과 관련된 현상이 아니며, 부착이 시작된 이후에 지속적으로 발생하는 것으로 추측할 수 있다.

일반적으로 VFDR의 고체추진제는 유량조절특성을 향상시키기 위해 압력 변화에 민감하게 반응하도록 압력지수(n)를 0.5 이상의 값으로 설계한다[3]. 콘 형태의 침식연소를 고려하지 않고 본 연구에서 사용된 연료 형상과 완전 개방 상태의 토출면적, 그리고 해석에 사용된 토출 직경 변화 상수(k)를 이용하여 압력지수가 연소실 압력 변화에 미치는 영향을 파악하였으며, 그 결과는 Fig. 9와 같다. 해석한 결과, $n=0.45$ 이하의 경우에는 토출관 내 연소 생성물 부착이 연소실 압력에 미치는 영향이 크지 않았으나, $n=0.45$ 이상의 경우에는 연소 생성물 부착이 연소실 압력에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

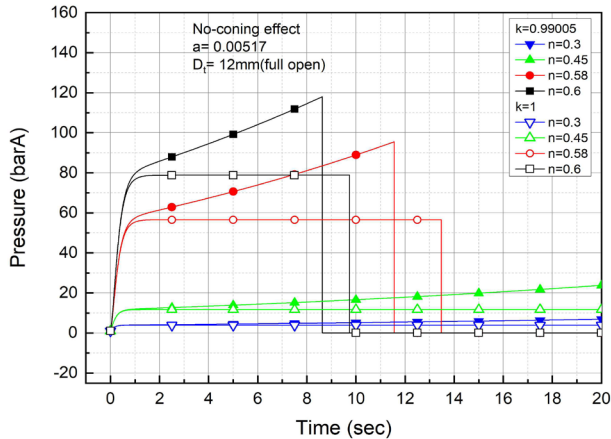


Fig. 9 Combustion Pressure Variation on Pressure Index

그러나 GG-009에서는 $n=0.3$ 이하임에도 plunger 작동 이후 압력이 급격히 상승하는 것을 고려해 보았을 때, 단순히 압력지수만이 토출 특성 변화에 영향을 주는 것은 아니며, 그레인 형상, 토출관 초기 면적, 토출관 형상 변화 등과 같은 많은 변수가 고려되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 plunger 타입 유량조절장치를 적용한 덕티드 로켓용 가스발생기의 지상연소시험에서 발생한 현상에 대해 해석적 접근을 수행하였다.

해석 결과, 토출관 내 연소 생성물이 부착되지 않은 GG-002의 압력상승은 큰 형태의 침식연소와 경향이 가장 유사하였으며, GG-003, GG-004, GG-009의 시험 결과에서 보이는 압력의 상승효과는 침식연소를 고려하고, 토출관 내 연소 생성물 부착에 따른 면적 변화를 가정한 해석 결과와 유사함을 확인하였다. 이를 통해 수행된 지상연소시험의 경우, 연소 생성물 부착에 따른 토출면적 변화가 압력 변화의 가장 주된 원인을 파악하였다. 또한, 지상연소시험 결과와의 비교를 통해 도출한 토출 특성 변화 상수(k)에 대해 압력지수(n)의 영향을 비교한 결과, $n=0.45$ 이상의 경우에 연소 생성물 부착이 연소실 압력에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 파악되었다. 덕티드 로켓용 가스발생기 추진제는 민감한 면적 변화에도 유량조절 특성을 극대화

시키기 위해 $n=0.5$ 이상의 압력지수를 갖도록 설계되며, 불완전 연소로 인해 연소되지 않은 용융된 금속 입자가 토출관에 부착될 가능성이 매우 높다. 따라서 토출관에서의 연소반응, 토출관 내 연소 생성물 부착에 따른 압력 변동을 완벽하게 제어할 수 없음을 따라 설계과정에서 적절한 토출 직경 선정, 적절한 압력지수를 선정하는 방법에 대해 심도있는 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

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] K. K. Kuo and R. Pein, *Combustion of boron-based solid propellants and solid fuels*. Begell House, 1993.
- [3] R. A. Stowe, "Performance prediction of a ducted rocket combustor," Laval University, 2001.
- [4] G. P. Sutton, *Rocket Propulsion Elements*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992.
- [5] H. J. Choi, H. S. Hyun, K. H. Lee, I. S. Park, J. Y. Lee, H. G. 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*
- [6] A. Alan, "Pressure Control of Gas Generator in Throttleable Ducted Rockets: A Time Delay Resistant Adaptive Control Approach," Master Thesis, Bilkent University, 2017.
- [7] J. P. Lee, S. J. Han, S. B. Cho, K. M. Kim, J. I. Lim and K. Y. Lee, "Development and performance analysis of gas generator with plunger-type flow control valve for ducted rocket : Part I," *Journal of Aerospace System Engineering*, 2021.(Manuscript in progress)