

가스발생기의 연료과잉가스 후연소용 O₂/CH₄ 가스 공급시스템 설계

왕승원^{a,*} · 이광진^a · 정용갑^a · 한영민^a

Modeling and Simulation of O₂/CH₄ Gas Supply System of Afterburner for Fuel-rich Gas of Gas Generator

Seungwon Wang^{a,*} · Kwangjin Lee^a · Yonggahp Chung^a · Yeoungmin Han^a

^aPropulsion Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: seungwon@kari.re.kr

ABSTRACT

Combustion Chamber Test Facility (CCTF) to be constructed in Naro Space Center for re-burning the fuel-rich gas of gas generator have afterburner system. The afterburner system is supplied the Oxygen (O₂) gas and Methane (CH₄) gas to reduced the harmful exhaust gas. The detailed design for the planned CCTF afterburner system is simulated and analysed by AMESim program through the all of gas supply system components. Afterburner system is performed to verify the pipe size, orifice diameter, and gas supply conditions according to the total gas consumption from analysis of gas supply system.

초 록

나로우주센터에 구축되는 연소기 연소시험설비(CCTF)에는 한국형발사체(KSLV-II)에 적용된 터보펌프식 엔진의 가스발생기 시험시 생성되는 연료과잉가스를 연소시키기 위한 후연소시스템이 포함되어 있다. 후연소시스템은 O₂와 CH₄ 가스를 공급받아 연료과잉가스를 소모시킨다. 본 연구는 연소기 연소시험설비의 상세설계 자료를 바탕으로 후연소시스템의 가스공급시스템에 대해 AMESim 상용프로그램을 이용하여 해석하였다. 그 결과 상세설계에 적용된 레귤레이터, 공급배관, 오리피스크기 등으로 가스사용량을 예측하고, 상세설계의 타당성을 검증하였다.

Key Words: Combustion Chamber Test Facility(연소기 연소시험설비), Afterburner System(후연소시스템), Gas Supply System(가스 공급시스템), O₂(산소), CH₄(메탄)

Received 29 November 2012 / Revised 27 February 2014 / Accepted 3 March 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

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

1. 서 론

우리나라의 액체로켓 개발은 2002년 액체추진

제를 이용한 KSR-III의 성공적인 발사와 함께 연구가 지속되고 있다. 그리고 나로호(KSLV-I)의 성공적인 발사와 그 준비과정을 통해 얻은 연구 기술, 축적된 자료, 경험을 토대로 현재 한국형 발사체(KSLV-II)의 연구개발이 진행되고 있다.

한국형발사체의 1/2/3단 엔진은 모두 터보펌프식 엔진으로 개발되고 있다. 추진제는 액체산소(LOX)인 산화제와 JET-A1의 연료가 한국형발사체의 추진제로 사용될 것이다. 한국형발사체의 엔진은 연소기, 터보펌프, 엔진공급시스템으로 나눌 수 있고 각 서브시스템은 독립적으로 개발되어 시험을 통한 성능 검증이 이루어진다[1,2].

설계/제작된 연소기에 추진제를 설계 조건으로 공급하여 연소시키는 연소시험은 연소기 개발 과정에서 성능 검증을 위한 필수적인 방법이다. 이와 같이 연소기 연소시험을 수행하여 연소기의 성능을 검증하는 설비를 연소기 연소시험설비(CCTF, Combustion Chamber Test Facility)라 한다[3,4].

가스발생기에서 생성된 연소가스는 터빈의 열적 손상을 방지하기 위해 연료과농 조건으로 혼합비를 설정하여 연소가스의 온도를 낮춘다. 하지만 연소에 참여하지 않은 다량의 가연성 미연가스를 대기 중이나 소음저감장치에 그대로 배출하게 되면 주위의 공기와 혼합하여 순간적으로 폭발할 수 있다. 또한, 대기 중으로 배출된 연료과잉의 연소가스는 환경을 오염시킬 수 있다[5]. 따라서 연소기를 시험하기 위해 구축되는 CCTF에는 O₂/CH₄를 통해 가스발생기 시험시 생성된 연료과잉가스를 재연소시켜 환경오염을 저감시키기 위한 후연소시스템이 있다.

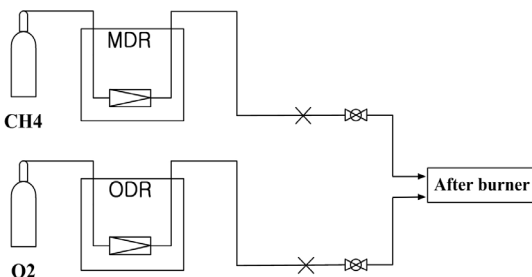


Fig. 1 Schematic diagram of gas supply system.

가스발생기에서 공급되는 연료과잉가스를 연소시키기 위해서는 가스공급시스템에서 O₂, CH₄ 가스를 가스토치의 요구규격에 맞게 공급해야 한다. 공급되는 O₂, CH₄ 가스는 레귤레이터의 유량계수에 따른 감압과, 오리피스 크기, 설계된 배관 및 부품에 따른 차압에 의해 결정된다. 또한 가스토치로 공급되는 가스는 가스공급시스템에서 자력으로 생산되는 것이 아니고, 외부에서 공급받아 저장탱크에서 공급하므로 현재 고힘나로우주센터에 구축 중인 연소기 연소시험설비의 지리적 위치를 고려하여 연간 시험횟수 및 시간을 고려한 O₂와 CH₄ 저장탱크의 설계가 필요하다.

본 연구에서는 CCTF의 후연소시스템에 공급되는 O₂/CH₄ 가스의 공급시스템에 대해 상용프로그램인 AMESim을 이용하여 모델링하고, 해석 결과를 통해 사용되는 가스의 저장탱크용량, 감압레귤레이터 선정, 공급배관에서의 가스의 유속과 유량 등에 대한 특성을 분석하였다.

2. 후연소시스템

2.1 후연소 가스공급시스템 구성

터보펌프의 터빈구동을 위한 가스발생기의 연료과잉가스는 O₂/CH₄ 가스와 함께 재연소를 한다. Fig. 1은 CCTF의 후연소시스템에 공급되는 O₂/CH₄ 가스공급시스템에 대한 개략도로 공급되는 가스의 저장탱크, 후연소시스템으로 이송하는 배관, 공급판넬, 오리피스 등으로 구성되어 있다. 공급판넬은 저장탱크에서 공급하는 압력을 시험규격에 맞게 유지시켜주는 감압레귤레이터와 배관, 밸브들로 구성되어 있다. O₂와 CH₄ 가스에 대한 공급시스템은 동일한 구성의 판넬에 공급가스, 레귤레이터, 오리피스의 변경을 통해 구성하였다.

O₂/CH₄ 가스의 공급판넬은 Fig. 1에서 각각 ODR (Oxygen Delivery Rack), MDR (Methane Delivery Rack)에 해당하는 것으로 내부에 있는 레귤레이터를 통해 감압되어 후연소시스템으로 공급된다.

Table 1. Conditions of O₂/CH₄ gas.

	O ₂	CH ₄
Temperature (K)	293.15	
Pressure (bar)	120	
Phase	Gas	
Volume (L)	40	47

2.2 공급시스템 설계 및 해석조건

후연소시스템의 운용시간은 CCTF의 시험시간에 의해 결정되는데 상세설계시 시험조건에 따라 20 s, 60 s, 135 s의 시험시간으로 운영하도록 되어있다. 따라서 가스발생기의 배기가스를 이용하는 후연소시스템은 특성을 고려하여 가스발생기 시험시작 전과 종료 후 시간에 여유를 두어 10s를 추가해서 운영하는 것으로 해석을 수행하였다. 후연소시스템에 사용되는 O₂/CH₄ 가스의 저장탱크는 가스발생기 시험시 사용량이 많지 않고, CCTF에 사용되는 주추진제처럼 보관 및 취급이 어렵지 않아 일반적으로 산업에서 사용되는 저장탱크를 이용하여 시험에 활용하는 방안으로 설계하였다. Table 1은 산업에서 쓰이는 O₂/CH₄ 가스 저장탱크의 용량과 가스압력, 온도에 대해 정리한 것으로 해석시 저장탱크의 초기조건에 반영하였다.

3. 모델링 및 해석

3.1 가스 저장탱크, 공급관 및 레귤레이터

각 공급가스의 저장탱크는 CCTF가 구축되는 전남 고흥 나로우주센터의 지리적 위치에 따른 O₂와 CH₄ 가스의 공급과 운송비를 고려하여 연간 시험횟수와 시험시간에 따른 가스의 사용량을 예측해야한다. 따라서 2개 이상의 저장탱크를 동시에 사용하고, 추가적인 여유 저장탱크를 고려하는 방안으로 2개 이상의 저장탱크가 헤더에 연결되어 공급가스가 배관을 통해 공급관으로 이송되는 형태로 구성하였다. Table 2는 해석조건으로 공급가스 O₂/CH₄의 상태는 이상기체임으로 가정하였고, 온도와 압력은 Table 1을 적용

Table 2. Conditions of simulation.

Fluid	O ₂ , CH ₄
Start time (s)	0
Final time (s)	145
Print interval (s)	0.1
Integrator type	Standard
Tolerance	1e-05
Maximum time step (s)	1e+30
Simulation mode	Dynamic
Error type	Mixed
Solver type	Regular

Table 3. Specification of regulator.

Maximum inlet pressure (bar)	310
Outlet pressure range (bar)	0 ~ 207
Operating Temperature (°C)	-25 ~ 104
C _v	2.0
Port size (inch)	1/2
Weight (kg)	2.83

하였다. 헤더의 길이는 산업용으로 사용되는 저장탱크의 직경을 고려하여 저장탱크들 간에 간섭이 발생하지 않도록 길이를 결정하였고, 시험운용에 대한 공급 허용압력은 시험조건과 저장탱크의 유지·보수를 고려하여 후연소시스템에서 요구하는 가스 압력인 20 bar에 가스저장탱크 초기압력의 약 10% 안전율을 적용하여 30 bar까지 사용하는 것으로 가정하였다.

공급관선은 CCTF의 상세설계 조건을 참고하여 관선의 크기에 따라 배관의 길이, 크기, 밸브와 레귤레이터의 위치 등을 모델링하였다.

레귤레이터의 설계는 가스 저장탱크로부터 후연소시스템으로 공급되는 가스를 감압하기 위한 것으로 관선 내부에 설치가 가능한 스프링방식의 레귤레이터로 CCTF의 상세설계 단계에서 선정된 모델로 Table 3과 같다.

공급관선을 구성하는 배관의 압력 손실은 Darcy-Weisbach 관계식으로 계산되었고, 배관은 해석유체가 상온가스 상태임을 고려하여 일반적으로 사용되는 SUS316의 재질과 절대거칠기 1.5 μm를 적용되었다[6].

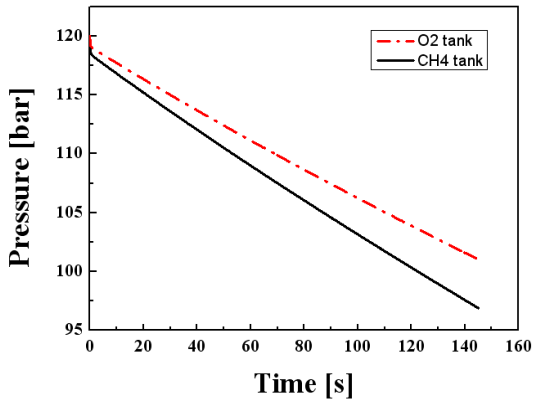


Fig. 2 O₂/CH₄ differential pressure of run time.

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{D_h} \cdot \frac{\rho Q^2}{2A_{\min}^2} \quad (1)$$

$$\zeta = \lambda \frac{l}{D_h} \quad \text{and} \quad \lambda \equiv \lambda(Re, rr) \quad (2)$$

여기서 λ 은 마찰계수, D_h 등가직경, l 은 유동길이, Q 는 용적유량, ρ 는 밀도, A_{\min} 은 유동단면적, Re 는 레이놀즈수, rr 은 상대거칠기($rr = \Delta/D_h$)이다[4].

3.2 해석 방법 및 조건

구성된 모델은 AMESim 상용프로그램을 이용하여 Table 2와 같은 조건과 후연소시스템의 운용시간을 고려하여 145 s 동안 가스를 공급하도록 운영하는 것으로 가정하여 O₂/CH₄ 가스에 대해 각각 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과

4.1 저장탱크의 압력변화

Fig. 2는 후연소시스템의 시험시간동안 가스공급탱크의 압력감소량을 나타낸 것이다. 초기압력 120 bar에서 시작된 O₂/CH₄의 가스 저장탱크 압력감소량은 145 s가 지난 뒤, O₂ = 101.1 bar, CH₄ = 96.9 bar로 감소하였다. Table 4는 CCTF의 연소시험시간에 따라 1회 시험 시 O₂/CH₄ 가스

Table 4. During CCTF run time of gas pressure.

Run Time (S)	Pressure Differential (bar)	
	CH ₄	O ₂
30	6.4	5.0
70	12.5	10.1
145	23.1	18.9

의 소모량을 정리한 것이다.

4.2 레귤레이터 특성

판넬 내부의 레귤레이터는 저장탱크로부터 이송되는 가스의 압력을 후연소시스템 요구조건에 적합하도록 감압시키는 역할을 한다. 현재 구축 중인 한국형발사체의 CCTF 후연소시스템은 O₂/CH₄ 가스가 각각 20 bar로 공급되도록 설계되어있다.

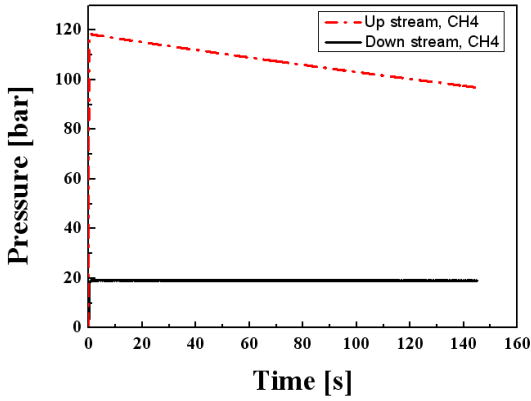
Fig. 3은 해석을 통해 O₂/CH₄ 가스가 후연소시스템에서 요구하는 압력을 정확히 조절하는지 확인하였다. 선정된 감압레귤레이터는 시간이 지남에 따라 저장탱크의 압력감소에도 후연소시스템의 요구압력인 20 bar를 유지하는 것으로 확인되었다.

4.3 오리피스 크기 결정

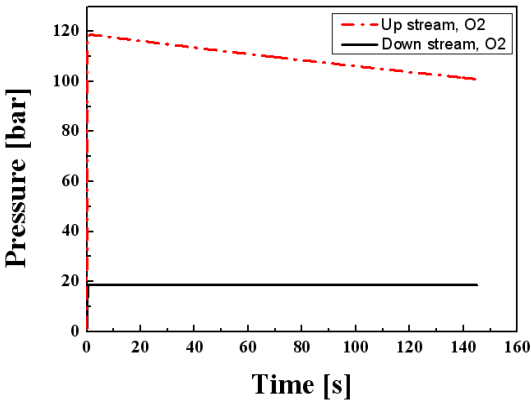
일반적으로 배관을 따라 이송되는 가압된 유체는 유속이 지나치게 높을 경우 난류로 인한 수두손실과 유체온도의 상승을 방지하기 위해 최대 6.1 m/s(20 ft/s)이하로 설계할 것을 추천하고 있다[7].

CCTF의 후연소시스템에서 요구하는 각 공급가스의 유량은 O₂ = 11.5 g/s, CH₄ = 4.0 g/s로 설계되어 있다. O₂/CH₄ 가스의 상세설계 조건을 만족시키기 위해 후연소시스템으로 공급되는 판넬 출구에 오리피스를 설치하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 해석을 통해 오리피스 크기에 따라 O₂/CH₄ 가스의 유량, 유속 결과를 나타내는 것이고, 이를 Table 5에 정리하였다.

각 공급가스의 오리피스 사이즈 1.9 mm, 1.37 mm를 사용한 공급시스템에서 각각의 공급유속이 가압된 유체의 최대유속인 6.1 m/s를 넘지



(a) CH₄ gas



(b) O₂ gas

Fig. 3 Up & down stream pressure using regulator.

않고, 공급유량은 O₂ = 10.8 g/s, CH₄ = 4.1 g/s 로 후연소시스템의 설계유량을 만족하는 해석결과를 확인하였다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (3)$$

4.4 가스 용량선정

O₂/CH₄ 가스의 용량은 시험설비의 운용횟수와 시험시간에 따라 결정된다. 현재 구축예정인 CCTF의 시험운용 횟수는 연간 50회, 최대 70회를 계획하고 있다. 시험횟수와 Table 4의 연소시험시간에 따른 O₂/CH₄ 가스의 사용량을 분석하였다. Fig. 6은 후연소시스템 구축에 필요한 O₂/CH₄ 가스용량을 선정하기 위한 해석결과로

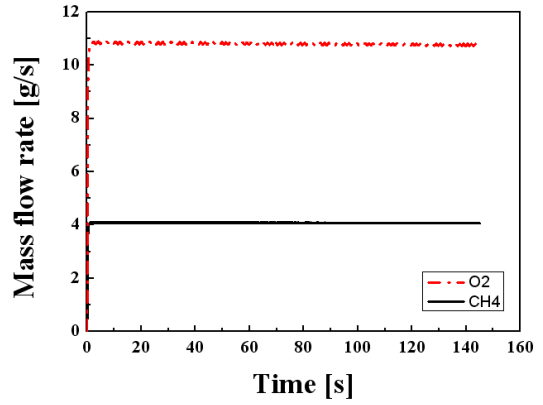


Fig. 4 Gas mass flow rate at supply panel exit.

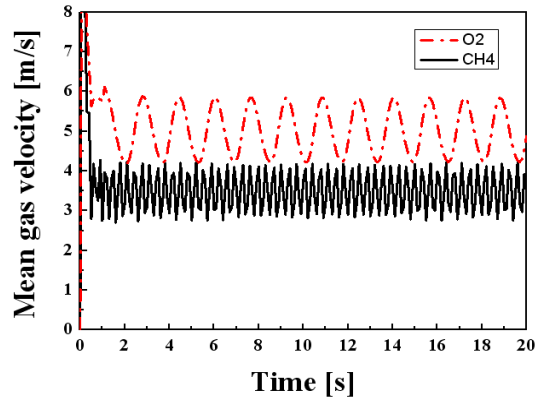


Fig. 5 Gas velocity at panel exit.

1개의 가스탱크로 후연소시스템에 가스를 공급할 때 운용가능한 총 시간을 알아보았다. 시험운용이 가능한 가스허용압력은 후연소시스템의 시험조건과 저장탱크의 유지·보수를 고려하여 공급압력 기준에 10 bar의 안전율을 적용하였다. 그 결과 O₂ = 894.7 s, CH₄ = 685.7 s 사용이 가능한 것으로 분석되었다. Table 6의 결과를 바탕으로 CCTF의 시험시간을 기준으로 1개 가스탱크로 시험 가능한 횟수를 정리한 것이다.

O₂/CH₄ 가스의 탱크용량 선정은 연간 시험횟수와 Table 6의 결과를 통해 시험시 사용할 가스공급 탱크의 수와 나로우주센터의 지리적요건을 고려하여 기상상태 및 운송에 의해 예측하지 못한 상황에서 대체할 수 있는 보유량을 확보하

Table 5. Design conditions of orifice.

Gas	O ₂	CH ₄
Orifice Dia. (mm)	1.9	1.37
Mass Flow Rate (g/s)	10.8	4.1
Velocity (m/s)	5.07	3.55

Table 6. Available test number for run time.

Run Time (s)	Number of Available Test	
	O ₂	CH ₄
30	29.8	22.8
70	12.8	9.8
145	6.2	4.7

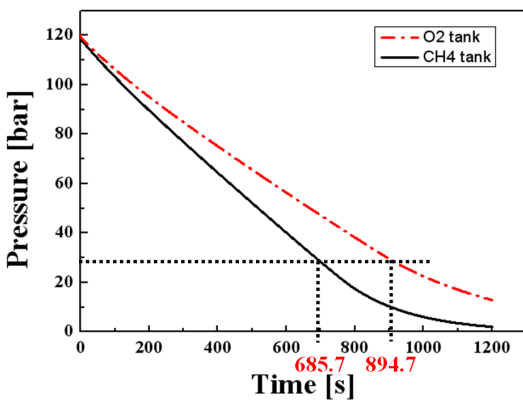


Fig. 6 Gas storage tank consumption.

여 CCTF에 설치될 저장탱크의 수량을 결정해야 한다. 따라서 CCTF가 구축될 나로우주센터의 지리적 위치와 공급가스의 원가, 운임비용 등을 고려해야 할 것이다.

5. 결 론

CCTF의 가스발생기에서 생성되는 연료과잉가스 후연소시스템에 공급되는 O₂/CH₄ 가스 공급시스템에 대해 상세설계 자료를 참고하여 상용 프로그램인 AMESim 코드를 통해 가스저장탱크, 공급판넬, 감압레귤레이터를 모델링하고 해석을 수행하였다. 그 결과 상세설계를 통해 O₂/CH₄ 공급가스시스템에 선정된 C_v = 2.0의 레귤레이터는 요구공급압력인 20 bar를 만족하였고, 공급판넬에 설계된 배관크기에 대한 검증을 확인하였다. 또한, 오리피스 크기를 결정하여 공급가스의

요구유량에 만족하는 O₂ = 10.8 g/s, CH₄ = 4.1 g/s와 가압가스의 최대유속인 6.01 m/s를 넘지 않는 O₂ = 5.07 m/s, CH₄ = 3.05 m/s를 설계하여 요구규격을 만족하였다.

후연소시스템의 공급가스판넬 설계를 통해 연간 시험횟수 및 시험시간에 따른 O₂/CH₄ 가스의 사용량을 예측하여 CCTF 구축시 가스저장탱크의 용량선정 방향에 대해 제안하였다.

CCTF에서 시험시 발생하는 가스발생기의 연료과잉가스를 재연소시키기 위한 O₂/CH₄ 가스 공급시스템에 대해 해석을 수행한 결과 구축예정인 후연소시스템의 가스공급 상세설계 자료는 연소기 개발시험 설비에서 요구되는 후연소시스템의 성능을 만족시킬 것으로 사료된다.

References

1. Lee, K.J., Lim, B.J., Seo, S.H., Han, Y.M. and Choi, H.S., "Sub-System Requirements of a Pressure-fed Hot-firing TRest Facility for Performance Assessment of a LRE Thrust Chamber," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 94-102. 2011.
2. Sutton, G.P., *Rocket Propulsion Elements*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992.
3. Cho, N.K., Chung, Y.G., Kim, S.H., Moon, I.Y., Park, S.J., Lee, G.J., Ko, Y.S., Kim, Y.H., Lee, K.Y., Kim, H.M., Lee, S.Y. and Lee, D.S., "KARI Liquid Rocket Engine Performance Test Facility," *Proceedings of The*

- KSASS Spring Conference*, 2002.
4. Chung, Y.G., Lee, G.J., Cho, N.K. and Han, Y.M., "Modeling and Simulation of Combustion Chamber Test Facility Fuel Supply System," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 4, pp. 87-92. 2012.
 5. Kim, M.K., Kim, B.G., Kang, D.H., Ahn, K.B., Kim, J.G. and Choi, H.S., "Hot-firing Tests of Afterburning Device for a Gas Generator," *Proceedings of The KSPE Spring Conference*, 2011.
 6. LMS Imagine.Lab, *AMESim Reference Manual Rev 9*, Roanne, 2009.
 7. Anthony Esposito, *Fluid Power with Applications*, 5th ed., Prentice Hall, 2000.