

연소기 연소시험설비 산화제 공급시스템 해석

정용갑*[†] · 조남경* · 한영민*

Modeling and Simulation of Combustion Chamber Test Facility Oxidizer Supply System

Yonggahp Chung*[†] · Namkyung Cho* · Yeoungmin Han*

ABSTRACT

The propulsion system of space launch vehicle generates thrust by supplying oxidizer and fuel to combustion chamber. KSLV-II 2nd stage engine, currently under development by KARI, is to use liquid oxygen as a oxidizer and JET-A1 as a fuel. The 2nd stage pump-fed engine is mainly composed of combustion chamber, turbo-pump and engine supply system. To develop liquid propulsion engine, the development of combustion chamber must be preceded. For performance validation of the combustion chamber, the designed and manufactured combustion chamber should be tested in combustion chamber test facility (CCTF). The detailed design for the planned CCTF in Naro Space Center was conducted. The oxidizer supply system modeling using AMESim was performed based on the results of the detailed design, and the oxidizer supply characteristics was analyzed in this paper.

초 록

발사체의 추진기관은 일반적으로 산화제와 연료를 연소실로 공급하여 추진력을 얻게 된다. 개발 중에 있는 한국형 발사체(KSLV-II) 2단 엔진의 경우 산화제로는 액체산소(Liquid Oxygen)를 사용하고 연료로는 JET-A1이 사용될 예정이다. 터보펌프 공급방식인 2단 엔진의 주요 구성은 연소기와 터보펌프, 엔진공급시스템 등으로 구성되어 있다. 액체 추진 엔진 개발을 위해서는 서브시스템인 연소기 개발이 선행되어야 하고 설계 및 제작된 연소기의 성능 검증은 연소기 연소시험설비(CCTF)에서 수행된다. 우주센터에 구축 예정인 연소기 연소시험설비에 대한 상세설계가 수행되었으며, 본 설계 결과를 기준으로 AMESim을 사용하여 산화제공급시스템에 대한 모델링을 수행하여 산화제 공급특성을 해석하였다.

Key Words: Combustion Chamber Test Facility(CCTF, 연소기연소시험설비), Oxidizer(산화제), Supply System(공급시스템), Hydraulic and Pneumatic(유공압), AMESim(아메심)

1. 서 론

* 한국항공우주연구원 추진시험팀

† 교신저자, E-mail: ygchung@kari.re.kr

발사체 추진기관은 추진제 공급방식에 따라

가압식과 터보펌프식으로 구분된다. 한국형 발사체(KSLV-II)의 2단 엔진은 추력 75톤급 터보펌프식 액체엔진으로 개발되고 있으며 사용하는 추진제는 산화제로 액체산소(Liquid Oxygen) 그리고 연료로 JET-A1이다. 액체 엔진의 주요 구성은 연소기와 터보펌프, 엔진공급시스템으로 크게 나눌 수 있으며 각 서브시스템의 개발은 독립적으로 개발되어 시험을 통한 성능 검증이 이루어진다[1,4]. 설계 및 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[2,3].

우주센터에 구축 예정인 연소기 연소시험설비에 대한 상세설계를 기준으로 기계시스템 해석 프로그램인 AMESim을 이용하여 산화제공급시스템에 대한 모델링 및 해석을 수행하였다[1,5]. 모델링 및 해석을 위한 산화제공급시스템의 범위는 가압제인 가압제 저장용기에서부터 감압제어기구, 산화제작동탱크, 산화제공급배관 그리고 테스트스탠드의 연소기 매니폴드 연결부까지이다. 수행된 산화제공급시스템 모델링을 통한 해석 결과에서는 가압제 저장용기 및 산화제작동탱크에서의 압력 특성, 공급배관에서의 유체 유속 및 압력 손실, 산화제작동탱크간의 레벨 불균일 특성 등을 고찰하였다.

2. 산화제 공급시스템

2.1 산화제 공급시스템 구성

산화제 공급시스템은 가압제 저장부와 감압제어부, 작동탱크, 공급배관 등으로 구성되고 가압제와 산화제는 질소가스와 액체산소를 사용한다. Figure 1은 산화제공급시스템의 개략도이다.

가압제 저장부는 24개의 고압가스용기와 공급배관 등으로 구성되어 가압제를 저장하는 부분이고 감압제어부는 가압제 저장부로부터 고압으로 공급되는 가압제를 설정 가압압력(130barA)

으로 감압하는 부분이다. 감압된 가압제는 10개로 구성된 산화제작동탱크를 가압하여 탱크 하부 매니폴드에서 하나의 공급배관을 통하여 테스트스탠드로 공급된다.

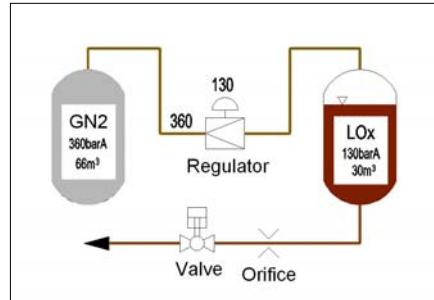


Fig. 1 Oxidizer Supply System of CCTF

2.2 설계 및 해석 조건

연소기 연소시험설비는 추력 75톤급 연소기 성능 검증 및 평가를 위하여 탈설계점 연소시험이 가능하도록 설계되었다. Table 1은 연소기 연소시험설비 설계와 해석 조건을 나타낸다.

Table 1. Design and Analysis Conditions for CCTF

Parameter		Design/Analysis
Pressurant	Fluid	Gaseous Nitrogen
	Ini. Press.	360 barA
	Volume	66 m ³ (1m ³ x22x3)
Oxidizer	Fluid	Liquid Oxygen
	Set. Press.	130 barA
	Volume	30 m ³ (3m ³ x10)
	Ini. Level	90 %
Regulator type		Dome-loaded
Main Oxi. Flowrate		173.1 kg/s

3. 공급시스템 모델링 및 해석방법

3.1 가압제 저장부와 산화제 작동탱크부

가압제는 이상기체를 적용하였고 산화제작동탱크에서 가스와 액체사이의 열전달률은 압력

130 barA와 온도 293K의 질소가스를 고려하여 0.3 W/mK으로 가정하였다. 산화제작동탱크의 벽면은 경질폴리우레탄 단열을 적용하였고 작동탱크의 초기 산화제 수위는 90%로 설정하였다.

Figure 2는 연소기 연소시험설비 산화제공급시스템 모델링이다. 여기서 (a)는 가압제 저장부이고 (b)는 감압제어부, (c)는 산화제작동탱크부, (d)는 테스트스탠드로의 산화제공급배관이다.

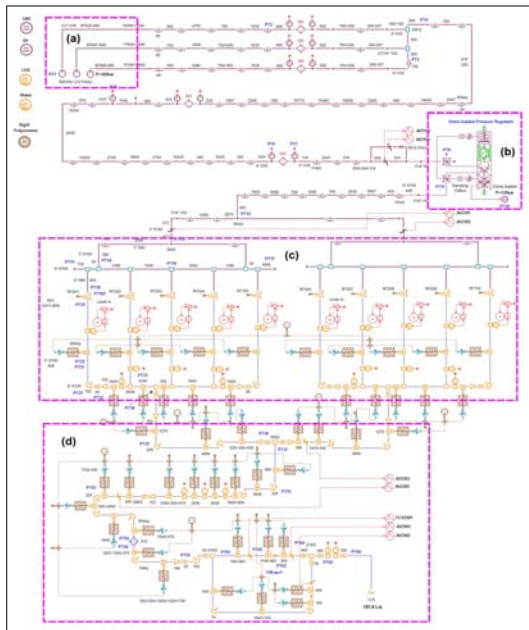


Fig. 2 Oxidizer Supply System Modeling

3.2 감압제어부

고압의 가압제를 설정 가압압력으로 감압제어하는 장치로 설계된 돔부하형 레귤레이터 모델링은 Fig. 2의 (b)와 같다. 레귤레이터의 돔부하에는 설정한 압력으로 공기가 일정하게 공급되도록 모델링 하였다.

3.3 해석방법

범용 해석프로그램인 AMESim R9를 이용하여 Fig. 2와 같이 모델링을 수행하였고 모델링 시에는 상세설계에서 기 설계된 부품에 대한 규격을 입력하였다. 해석 시 실행 모드로는 Dynamic 모드를 사용하였고 Error와 Solver 타입은 Relative

/Absolute Mixed Error Type과 Regular Solver Type을 적용하였다[5].

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 가압제 저장용기 및 산화제작동탱크에서의 특성

Figure 3은 가압제 저장용기와 산화제작동탱크에서의 압력과 온도 특성, 산화제 공급 유량 등을 나타낸 것이다. 추진제인 산화제 공급은 130 초 동안 질소가스로 산화제작동탱크를 약 130 barA로 가압하여 공급배관으로 액체산소를 공급하였다. 가압제 용기에서의 압력(PT1)과 온도(TT1)는 360 barA와 293K에서 공급이 시작되어 종료 시에는 가스 압력이 42 bar 강하하여 318 barA가 되었고 온도는 5도가 강하하여 288K이 되었다.

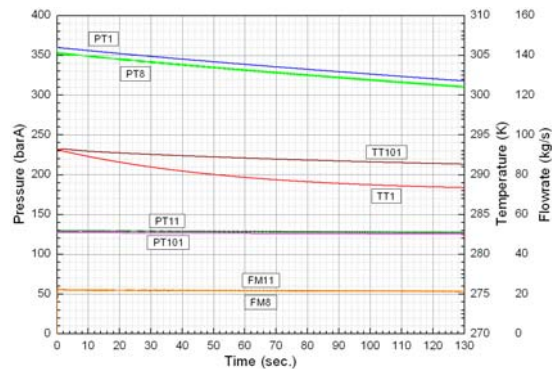


Fig. 3 Pressure, Temperature and Flowrate Distribution

가압제 저장용기에서 감압제어장치인 레귤레이터 전단(PT8)까지 공급배관에서의 압력손실은 약 7.5 bar로 나타났다. 레귤레이터에서는 고압으로 공급되는 가압제를 130 barA로 감압하여 산화제작동탱크로 공급되었고 레귤레이터 후단(PT11)에서 산화제작동탱크(PT101)까지 공급배관에서의 압력손실은 약 1.8 bar로 나타났다.

TT101은 산화제작동탱크 내부로 유입되는 가스 온도를 나타낸다. FM8과 FM11은 가압제 저장용기 매니폴드에서와 레귤레이터 후단에서의 가압제 공급 유량으로 약 21.9±0.3 kg/s로 나타

났다. FM8과 FM11에서의 유량섭동은 공급되는 가압제 압력이 레귤레이터에서 제어되기 때문에 나타나는 유량섭동이다.

4.2 산화제작동탱크에서의 레벨 특성

산화제작동탱크는 3m³ 용기 10개가 5개씩 매니폴드(RT201~RT205, RT206~RT210)로 연결되고 다시 하나의 공급배관으로 합쳐져 산화제를 공급하게 된다. 그리고 연소시간이 짧은 경우에는 한쪽 매니폴드의 탱크(5개)를 사용하여 산화제를 공급할 수 있도록 설계되었다. Figure 4는 설계 조건으로 산화제가 공급될 때 10개 각각의 탱크에서 토출되는 산화제 유량과 탱크내에서의 액체 레벨 강하를 나타낸 것이다.

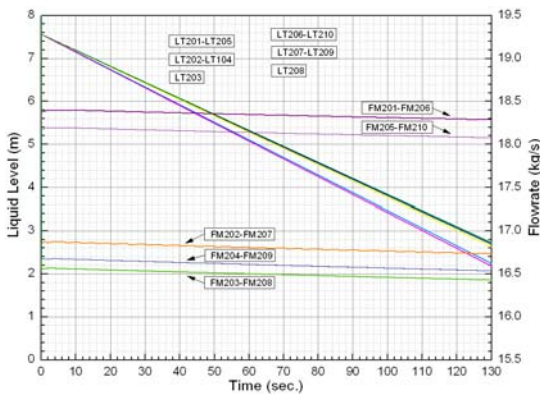


Fig. 4 Level & Flowrate at Oxidizer Runtanks

여러 개의 추진제 탱크가 가스 공급 매니폴드와 액체 토출 매니폴드에 연결되어 하나의 배관으로 토출될 경우에는 가스 공급배관과 액체 토출배관의 위치와 형상에 따라 추진제 탱크들 사이에 레벨 차이가 발생하게 된다.

10개의 탱크가 Fig. 2의 (c)에서와 같이 구성된 경우 레벨 불균일이 상대적으로 적은 것으로 판단되어 상세설계와 해석이 수행되었다. RT201과 RT206 및 RT205와 RT201 작동탱크에서 토출량이 가장 많았고 중간부 탱크(RT203과 RT208)에서 토출량이 가장 작게 나타났다. 산화제 공급이 종료되는 130초에 각 탱크간 최대 레벨 불균일은 약 7.2%로 계산되었다.

4.3 가압제 공급배관에서의 가스 유속

Figure 5는 가압제 공급배관에서의 가스 유속을 나타낸 것이다. FM5는 레귤레이터에서 감압되기 전의 가압제 공급부에서 유량이고 FM12는 약 130 barA로 감압된 후의 유량을 나타낸다. 가압제가 감압되기 전인 4인치 배관(V5)에서는 11 m/s 내외의 유속을 나타냈고 130 barA로 감압된 후의 두 섹션으로 분기되기 전 3인치(V12)와 분기 후 3인치(V13), 탱크별 가스 유입배관 2인치(V18)에서는 각각 24.5 m/s, 21 m/s, 8.3 m/s 내외의 유속을 나타내었다.

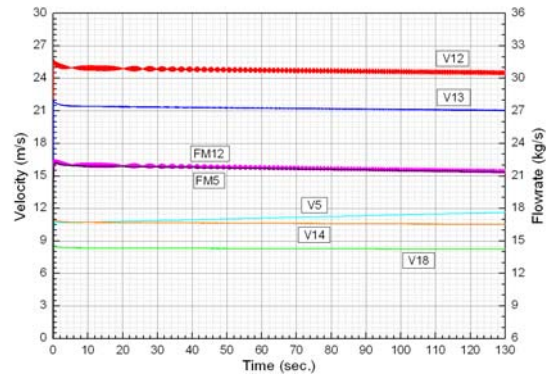


Fig. 5 Velocity at Gas Supply Lines

일반적으로 가스 공급배관에서의 유속 설계는 30 m/s 미만으로 적용되므로 본 설비의 설계 유속은 적절한 것으로 사료된다.

4.4 산화제 공급배관에서의 유속

Table 1은 산화제작동탱크 토출 공급배관에서 연소기 연결 배관까지의 산화제 유속을 정리한 것이다. 공급되는 산화제는 종단에 고정형 오리피스를 설치하여 약 173.1 kg/s로 토출되도록 모델링 되었다. V21은 각 탱크의 하부 4인치 연결 배관에서의 유속으로 2.4 m/s 이었다. 6개 탱크가 연결된 섹션 1의 매니폴드에서 토출되는 6인치 배관에서의 유속(V31)은 4.9 m/s, 섹션 1과 섹션 2가 합쳐진 8인치 주배관에서의 유속(V51)은 5.8 m/s로 계산되었다. 8인치 주배관 이후에 감소되는 6인치 배관에서의 유속(V54)은 9.8

m/s 이고 유량제어 오리피스가 설치된 4인치 배관에서의 유속(V56)은 22.6 m/s로 계산되었다.

Table 4 Velocity at Oxidizer Supply Lines

Supply Line		Velocity (m/s)
1st Manifold Section	V21 (4inch)	2.4
	V31 (6inch)	4.9
Main Line	V51 (8inch)	5.8
	V54 (6inch)	9.8
	V56 (4inch)	22.6

4.5 액체 유량제어 오리피스에서의 압력과 온도

산화제공급시스템에서 공급 유량은 배관의 종단에 설치된 고정형 오리피스에 의하여 제한되었다. 고정형 오리피스로 제한되어 공급되는 유량은 173.1±0.5 kg/s로 유지되었고 오리피스 전단에서의 압력은 124.5±1.0 barA로 나타났다. 오리피스 전단과 후단에서의 산화제 온도는 각각 90.1K와 92.1K로 오리피스를 통과하며 온도가 2K 상승하였다.

5. 결 론

나로우주센터에 구축 예정인 연소기 연소시험설비 상세설계 결과를 기준으로 AMESim을 이용하여 산화제공급시스템에 대한 해석을 수행하

여 가압제 저장용기 및 산화제작동탱크에서의 압력 특성, 공급배관에서의 유속과 압력손실, 산화제작동탱크간의 레벨 불균일 특성 등을 고찰하였다.

연소기연소시험설비 산화제공급시스템 상세설계에 대한 해석을 수행한 결과 연소기 개발시험설비에서 요구되는 산화제공급시스템 성능을 만족시킬 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 이광진, 임병직, 서성현, 한영민, 최환석, "액체로켓엔진 연소기의 성능평가를 위한 가압식 연소시험설비의 구성 요구조건," 한국추진공학회지, 제15권, 제4호, 2011, pp.94-102
2. 조남경, 정용갑, 김승한, 문일윤, 박성진, 이광진, 고영성, 김영한, 이강엽, 김형모, 이수용, 이대성, "액체로켓엔진 지상 연소성능 시험설비(KARI_ReTF)," 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2002
3. Michael J. A., Jeffery L. E., Daweel J. G., and Manfred Peinemann, "Liquid Engine Test Facilities Assessment," The Aerospace Corporation, 2002
4. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
5. LMS Imagine.Lab, AMESim Reference Manual rev 9, Roanne, 2009