

# 한국형발사체 발사대시스템 산화제공급계 충전 운용 설계의 검증을 위한 나로호 비행시험 실증 자료 분석

서만수\*<sup>†</sup> · 이재준\*\* · 홍일구\*\*\* · 강선일\*

## Comparison of Results for Filling Operation of Liquid Oxygen Filling System in KSLV-I Flight Test and Critical Design Results in KSLV-II Launch Complex for Validation

Mansu Seo\*<sup>†</sup> · Jae Jun Lee\*\* · Il-gu Hong\*\*\* · Sunil Kang\*

### ABSTRACT

In this paper, KSLV-I flight test data and critical design results of filling operation for liquid oxygen filling system are compared to validate the reliability of the critical design modeling. Applying the filling and operation conditions on the critical design modeling, comparison of major flow rates and pressure values between test data and calculation results are conducted.

### 초 록

본 논문은 한국형발사체(KSLV-II) 발사대시스템 상세설계 단계 중 수행된 산화제 충전 운용 설계를 검증하고자, 나로호 1차 비행 시험 실증 자료와 해당 설계 모델링 유동 해석 결과를 비교하였다. 나로호 비행 시험에 적용되었던 공급 조건과 충전모드에 따른 유량조절밸브 개도와 구동 절차 조건을 한국형발사체 발사대시스템 상세설계 모델링에 적용하여, 실증 자료와 모델링의 산화제 공급 유량값과 주요 압력값을 비교하였다.

Key Words: Liquid Oxygen Filling System (LOXFS, 산화제 공급계), Launch Complex System (발사대 시스템), Korea Space Launch Vehicle-II (KSLV-II, 한국형발사체)

### 1. 서 론

한국형발사체 발사대시스템의 산화제공급계는

기능적으로 구성된 추진제공급계의 한 부분으로써 발사 직전까지 발사체로 산화제를 공급하는 중요한 역할을 수행한다. 산화제 공급 조건은 목적에 따라 세분화 되며, 크게 냉각, 주충전, 보충충전으로 나뉘어 해당 조건에 맞게 공급 유량 및 공급 온도가 결정된다. 한국형발사체 및 시험 발사체 발사대시스템 설계를 위해서 1-D 열유동

\* 한국항공우주연구원 한국형발사체사업본부 발사대팀

\*\* 현대중공업 중앙기술원 기반기술연구소 외장연구실

\*\*\* 현대중공업 중앙기술원 기반기술연구소 동역학연구실

† 교신저자, E-mail: msseo@kari.re.kr

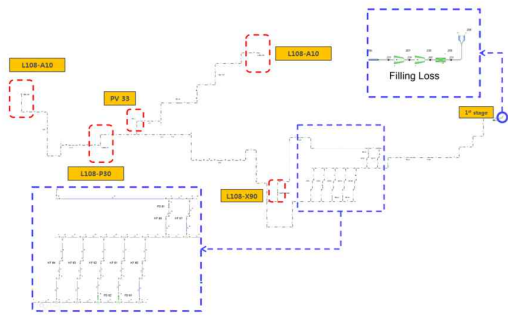


Fig. 1 1-D modeling of liquid oxygen filling system for TLV and KSLV-I

해석 프로그램인 Flowmaster 소프트웨어를 이용하여, 산화제 공급계의 공급 상황을 해석하여 유량조절밸브 개도 조절 및 운용 시간 예측값 설계에 사용하였다. 따라서 해당 모델링의 타당성 검증이 필요하며, 이를 위해 2009년 수행된 나로호 1차 비행시험 시 사용된 발사대 산화제공급계의 각 충전 운용 모드에 대한 유량조절밸브 개도 및 구동 절차 조건을 시험발사체 유동해석 모델링에 반영하였다. 발사연기 상황을 포함하는 비행시험 자료는 다수 있지만, 산화제공급계 운용 조건은 거의 유사하므로 하나의 실증 조건으로 검증을 수행하였다.

본 논문에서는 기존 시험발사체 발사대시스템 산화제공급계 상세설계 유동해석 모델링의 구성 및 비교 분석을 위한 수정을 통해 나로호 산화제공급계 모델링을 생성하였다. 또한 나로호 1차 비행 시험의 산화제 충전 모드 운영 체계를 해석에 적용하였으며, 해석 결과와 실증 시험 자료를 유량값과 주요 압력값을 기준으로 비교 분석하였다.

## 2. 산화제공급계 유동해석 모델링

나로호 발사대시스템은 시험발사체 발사대시스템과 거의 동일하며, 차이점은 발사대-발사체 간 연결을 위한 지상기계시스템인 엄빌리칼접속장치와 그와 연결되는 설비 구성이 발사체의 변경으로 인해 달라지는 점이 있다. 따라서 본 논문에서는 시험발사체 발사대시스템의 상세설계

모델링을 대부분 활용하였으며, 해당 모델링에 나로호 지상설비와의 차이점을 수정 및 반영하여 비교 검증을 위한 모델링을 생성하였다. 기존 시험발사체 발사대시스템 모델링은 한국형발사체 발사대시스템의 상세설계를 위한 모델링과 주요 요소 모델링 기준이 동일하며, 중앙공용설비 부분(산화제 저장탱크, 산화제 공급펌프)은 나로호, 시험발사체, 한국형발사체가 모두 공유하는 부분이므로 모델링은 그대로 사용된다 [1,2]. Fig. 1는 한국형발사체 발사대시스템 산화제공급계 1-D 유동해석에 사용된 전체 모델 형상을 나타낸다. 산화제 저장 탱크 (LOX storage tank), 산화제 공급 펌프 (LOX supply pump), 산화제 냉각용 액체질소 열교환기 (LN2 Heat exchanger), 산화제 충전유량조절 밸브설비 (End valve block), 배출 탱크 (Drainage tank), 발사체 내부 압력강하 요소, 배관 및 굽힘 요소 (bending)가 포함되어 있다. 주요 요소 모델링 기준 또한 기존 문헌을 참고하면 되지만, 본 논문에서는 Table 1과 같이 명료한 형태로 제공하고자 한다.

Table 1은 산화제공급계의 모델링을 위한 유체 특성 및 물성치 정의, 배관 및 벤딩 요소 설정, 유량계, 필터, 열교환기와 같은 압력강하 요소 설정, 펌프 성능 인자의 값을 보여준다. 공통적으로 파이프의 두께 규격이 10S로 선정되었으며, 배관 조도 (roughness)는 0.1mm 로 상대적으로 큰 조도 특성을 적용하였다. 유연 배관은 해당 길이의 조도의 4배로 가정하였고, 굽힘반경/배관직경 비율을 1.5로 일괄 적용하였다. Flowmaster에서는 압력강하요소를 반영하는 모델을 따로 사용하고 있으며, 유효면적과 손실계수 (Filling loss factor)를 입력하여 일정 유량이 흐를 때 압력강하 값을 계산한다. 해당 압력강하와 압력강하계수 값의 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta P = \frac{K\rho Q^2}{2A^2}$$

$\Delta P$ 는 압력강하값,  $K$ 는 압력강하계수,  $A$ 는 배관단면적,  $\rho$ 는 유체 밀도, 그리고  $Q$ 는 부피유량

Table 1. Major parameters of modeling of LOX filling system for KSLV-I flight test validation

Fluid	
Fluid	Liquid Oxygen, LOX
Compressibility	Incompressible fluid
Reference Temperature, °C (K)	-183 (90)
Reference Density, kg/m <sup>3</sup>	1141
Vapor Pressure, bar	0.0296
Dynamic Viscosity, N-s/m <sup>2</sup>	1.64e-4
Pipe&Bend	
Pipe Schedule	10S
Absolute Roughness	0.1 mm
Flexible Pipes	4 times length to general pipe modeling
Bending Radius/pipe diameter	1.5
Pressure Loss	
Pressure loss in flow meter, filter, and heat exchanger, bar @MAX flow rate for pump	0.5
Pressure loss in KSLV-I, bar @MAX flow rate for KSLV-I	5.5
Pump Performance	
Rated Head, m	81
Rated speed, rpm	3500
Rated Flow Rate, L/min	2333.3

이다. 본 모델링에서는 필터, 유량계, 그리고 열교환기의 압력강하값은 단순한 가정을 통해 일반적인 압력 손실 요소 (Pressure loss component)로 가정하여 모델링에 적용하였으며, 이에 대한 손실계수는 펌프 최대 유량에서 0.5 bar의 압력강하값을 가질 때의 값으로 설정하였다. 나로호 발사체 내부 압력강하값은 발사체보안보호협정으로 인해 나로호의 경우 설계도면이 제공되지는 않았으나, 손실계수는 시험 유량값 최대 유량값에서의 압력강하값을 5.5 bar를 적용하여 산정하였다.

산화제공급펌프의 성능은 펌프 제조사에서 제공한 최적 성능 구간의 펌프 수두 81 m, 펌프 동작 속도 3500 rpm, 그리고 펌프 유량은 2333.3 LPM을 유동 해석에 적용하였다. 펌프 성능 곡선의 정확한 값을 반영하기 위하여 나로호 발사 시점에 수행된 독립성능시험을 통해 획득한 펌프성능곡선을 적용하였으며 이는 Fig. 2에 제조사에서 제공된 펌프 성능 곡선과 비교하여 보여진다[3]. 해당 펌프 성능 곡선은 산화제 공급 펌

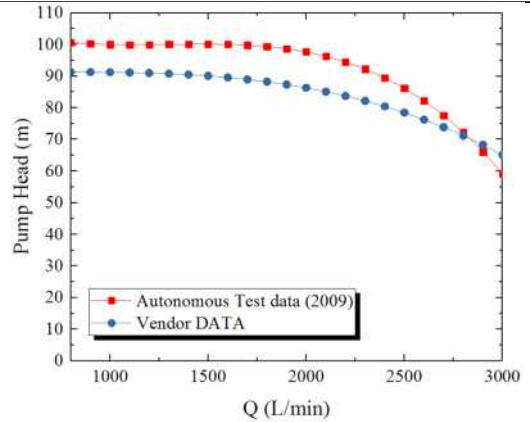


Fig. 2 Comparison of performance curves for LOX supply pump in launch complex between the autonomous test result and the performance curve certified by Cryo Industries Korea

프의 이중화를 위한 두 개의 펌프에서 모두 확인된 성능 곡선이다. 산화제공급펌프의 동일 유량대비 공급 수두압 값이 대부분의 유량 구간에서 약 10% 수준으로 상회함을 알 수 있다. 모델링 설계 내용과 변외로 언급이 필요한 부분으로

Table 2. LOX filling operation with percentage of duration and flow rates and pressure in KSLV-I in FT #1

Filling Mode		Duration	FI63	FI30	FI61	FI62	FI80	FI81	PI32	PI50	PI60
		% (percentage of the total duration and the maximum flow rate)								MPa, g	
Cooling	small flow rate 1	5.7	*	78.5	0	0	0	0	*		
	small flow rate 2	9.5	*	78.5	5.9	0	0	0	1.22	1.27	0.05 to 0.1**
	small flow rate 3	9.5	5.6	78.5	5.8	0	0	0	1.22	1.27	0.06 to 0.13**
	large flow rate	19.1	26.4	77.8	5.7	20.8	0	0	1.18	1.27	0.09~0.18*
Filling	large flow rate	53.3	100~93.8**	0.7	4.2	0	9.7	0.8	1.19	1.24	0.55 to 0.62**
Replenishment	large flow rate	2.9	12.5	80.0	0	0	12.8	1.1	1.19	1.22	0.29

\*Fluctuated

\*\*Linearly increased or decreased

써, 시험발사체 산화제 충전 운용 중 펌프 작동 유량 구간은 1000~1500 LPM이며, 향후 적용될 한국형발사체 산화제 충전 운용 중의 유량 구간 또한 2500 LPM 이하이므로 사용 구간에서 유량 성능이 실측에서 나르게 나오는 부분을 운용자는 숙지해야 한다. 또한, 현재 발사대 내부 모든 설비 및 장비는 장기보관 상태이므로 2018년 4월로 예정된 시험발사체 발사대 독립성능시험에서 펌프 성능 곡선을 새로이 획득하는 시험항목을 수행할 예정이다.

### 3. 나로호 비행시험 산화제 공급계 운용

나로호 실증 시험 자료는 1차 비행시험 (Flight test, FT) 중 발사 연기로 시험 종료가 되었던, FT 1.1 (2009년 8월 20일 시험)의 시험 결과를 사용하였다. Table 2는 해당 비행 시험의 산화제 공급계 주요 운용 사항을 보여준다. 충전 모드 (Filling mode)는 탱크 및 라인 냉각 (OT cooling), 산화제 충전 (OT filling), 그리고 산화제 보충 충전 (OT replenishment)로 구성된다. 각 충전 모드는 충전 목적에 맞게 충전 밸브들

의 개폐를 조절하여 발사체로의 산화제 공급 유량이 달라짐에 따라 구분된다. 충전 밸브는 KF61, 62, 63, 64의 주충전 밸브와 KF87, 88의 보충충전 밸브, 그리고 PV33의 공급 펌프 후단 바이패스 밸브로 구성되어 있다. Table 3은 각 충전 모드별 밸브 개폐 정보를 보여준다. 가령 대유량 냉각 (Cooling with large flow rate)에서는 KF61, KF63, 그리고 PV33은 개방, 나머지 밸브들은 폐쇄 상태로 충전 모드가 운용됨을 알 수 있다. 세부적으로 보면, 탱크 및 라인 냉각 모드에서 펌프 미작동 (Pump off) 상태에서 저장 탱크의 자체 가압값으로 소유량 냉각(Cooling with small flow rate)이 시작된 후, 펌프 작동 (Pump on) 상태에서 소유량 냉각 단계를 거친 후, 대유량 냉각 (Cooling with large flow rate)가 진행된다. 시스템 냉각이 완료되면 산화제 충전(Filling with large flow rate)이 시작되며, 이때 가장 많은 충전 밸브가 개방되고 공급 펌프 후단 바이패스 밸브가 폐쇄된다. 이 후 산화제 충전이 충전 조건을 만족하면 산화제 보충 대유량 충전 (Replenishment with large flow rate)으로 전환된다.

Table 2에서 보안 관계로 각 충전 모드의 운

Table 3. Valve status for opening/closing condition in cooling and filling mode

	Cooling with small flow rate 3	Cooling with large flow rate	Filling with Large flow rate	Replenishment with Large flow rate
KF61	O	O	O	X
KF62	X	X	O	X
KF63	X	O	X	X
KF64	X	X	O	X
KF87	X	X	O	O
KF88	X	X	O	O
PV33	O	O	X	O

용 시간 (duration)은 총 운용 시간 대비 백분율 값으로, 각 충전 모드의 유량값은 최대 유량값 (대유량 충전)의 백분율로 표현되어 있다. 각 충전 모드의 유량값 (Flow rate)은 충전 밸브 별로 설치된 유량계를 통해 측정된 값이며, 유량계는 FI63, FI30, FI61, FI62, FI80, FI81로 구성된다. FI63은 발사체-발사대 지상연결장치 전에 설치된 코리올리 유량계로 공급 총 유량값, FI30은 공급 펌프 후단 저장 탱크로 연결된 바이패스 배관의 밸브 PV33의 오리피스 유량계로 바이패스 유량값, FI61, FI62, FI80, FI81은 각각 KF61, KF63, KF87, KF88 충전 밸브 후단의 오리피스 유량계로 각 충전 밸브의 유량값을 의미한다. 모든 충전 밸브에 유량계가 설치되지 않았지만, 공급 총 유량값과 충전밸브의 유량값의 차이를 통해 설치되지 않은 밸브의 유량값의 추정이 가능하다. 각 충전 모드의 주요 압력 값은 PI32, PI50, 그리고 PI60 압력계의 측정값을 사용하였다. PI32는 공급펌프 후단 압력 (Pump outlet), PI50은 충전 밸브 부분의 입구부 압력 (End valve block inlet), 그리고 PI60은 발사체-발사대 지상연결장치 전의 산화제공급계의 최종 압력 (End valve block outlet)을 측정한다.

본 논문에서는 Table 2에서 음영 처리된 4가지 충전 모드에 대해서 비교를 수행한다. 최종 유량값 기준으로 초기 냉각 과정에서는 비등 상황으로 인한 이상 유동 현상으로 인해 유량값 섭동 (fluctuation)이 크기 때문에 의미있는 비교

를 할 수 없기 때문이다.

#### 4. 산화제공급계 유동해석 결과와 실증자료 분석

Table 4는 산화제공급계 유동해석 결과와 나로호 비행시험, FT 1.1의 실증자료를 비교하고 있다. 비행 시험 자료 (Test 열)는 앞서 Table 2의 값을 사용하고 있으며, 유동해석 결과 (Cal. 열)도 비행 시험 자료와 마찬가지로 최대 유량인 대유량 충전 시 총 공급 유량값을 기준으로 한 백분율 값으로 표현되었다. 각 충전 모드 별로 비교 결과를 살펴보면, 먼저 소유량 냉각 및 대유량 냉각 과정은 유량값 최대 5.5% (최대 유량값 기준), 압력값 최대 5.1%의 오차를 보여, 오리피스 및 코리올리 유량계의 측정 오차 (각각  $\pm 0.1\%$ ,  $\pm 0.7\%$ )를 감안할 때, 낮은 유량의 단상 유동 상황에서는 약 5% 수준의 정확도로 유량 및 압력 계산을 수행하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 대유량 보충 충전의 경우에도 유량값 최대 3.3%의 오차를 볼 때 타당한 분석이라 볼 수 있다. 대신 대유량 보충 충전의 압력값에서 PI60, 산화제공급계 최종단 압력값이 시험값 0.29 MPag와 계산값 0.07 MPag의 값은 오차가 75.8%로 매우 크게 발생하였다. 이는 실증 자료에서는 산화제 충전이 완료되고 난 후의 발사체 산화제 탱크 내의 산화제 수두압이 적용된 상황이 해석 모델에서 적용되지 않았기 때문이다. 따라서 대유량 보충 충전의 경우에도 앞서의 냉각 과정과 비슷한 출구 압력으로 해석이 수행되었다. 가장 주의 깊게 비교해야 할 부분은 대유량

Table 4. Comparison of flow rate and pressure between flight test and calculation results

	FI63		FI30		FI61		FI62		FI80		FI81		PI32		PI50		PI60	
	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.	Test	Cal.
1)	5.6	7.5	78.5	72.3	5.8	7.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1.22	1.24	1.27	1.28	0.06 ~ 0.13	0.06
2)	26.4	25.4	77.8	72.3	5.7	7.2	20.8	18.2	0	0.0	0	0.0	1.18	1.24	1.27	1.28	0.09 ~0.18	0.17
3)	100~ 93.8	69.1	0.7	0.0	4.2	3.8	0	0.0	9.7	4.6	0.8	0.6	1.19	1.24	1.24	1.28	0.55 ~ 0.62	0.90
4)	12.5	9.3	80.0	72.3	0	0.0	0	0.0	12.8	9.3	1.1	1.3	1.19	1.24	1.22	1.28	0.29	0.07

1)Cooling with small flow rate 3; 2)Cooling with large flow rate; 3)Filling with Large flow rate;

4)Replenishment with Large flow rate

충전 구간의 총 유량값, FI63의 결과이다. 대유량 충전 유량의 실험 결과값 대비 24.7 ~ 30.9%의 오차를 보인다. 최종 압력인 PI60의 결과 비교도 이러한 결과를 뒷받침한다. 시험 압력값 대비 해석값이 약 1.4 ~ 1.6배 큰 압력을 보이며, 이로 인해 해당 후단부 압력 상승분에 대한 유량 감소의 결과를 보인다. 나로호와 시험발사체 발사대는 1단 충전식으로 대부분의 지상 설비가 유사하지만, PI60 압력계 후단의 배관 연결 형태에서 가장 큰 차이점이 있다. 해당 부분은 발사체-발사대 지상연결장치와 그 장치로 연결되는 배관의 차이가 존재한다. 현재 시점의 해석 모델링에서는 PI60 후단 배관 및 지상연결장치가 시험발사체 형태로 모델링 되어 있으며, 이 부분은 상대적으로 매우 긴 길이 (~10 m)의 유연 배관으로 구성되어 있고, 나로호와 다르게 발사체 하단부로 바로 연결되지 않고 발사 패드 지상부를 지나 나로호 당시 발사체보다 높은 위치에서 연결되어 수두압이 생성된다. 이 두 원인으로 인하여 해석 유량값이 현저히 낮게 나오는 결과도 출된다. 따라서 PI60 후단부의 모델링의 변경이 필요하며, 이는 나로호의 지상연결장치의 압력 강하값의 산출 후에 적용할 계획이다.

### 5. 결론

(1) 소유량 냉각 및 대유량 냉각 과정은 유량값 최대 5.5% (최대 유량값 기준), 압력값 최대 5.1%의 오차를 보여, 오리피스 및 코리올리 유량계의 측정 오차 (각각  $\pm 0.1\%$ ,  $\pm 0.7\%$ )를 감안할 때, 낮은 유량의 단상 유동 상황에서는 5% 이내의 정확도로 유량 및 압력값 계산을 수행하였다.

(2) 대유량 보충 충전의 경우, 유량값 최대 3.3%의 오차로 유량값 계산을 수행하였다.

(3) 대유량 보충 충전의 압력값에서 PI60, 지상연결장치 전단 압력값이 시험값 0.29 MPag와 계산값 0.07 MPag의 값은 오차가 75.8%이다. 이는 발사체 산화제 탱크 내의 산화제 수두압 변동 계산이 적용되지 않았기 때문이다.

(4) 대유량 충전 구간의 총 유량값, FI63의 계산값과 시험값은 약 24.7 ~ 30.9%의 오차를 보인다. 지상연결장치 전단 압력값, PI60의 시험 압력값 대비 해석값이 약 1.4 ~ 1.6배 큰 압력을 보인다.

(5) 해석 모델링에서는 PI60 후단 배관 및 지상연결장치가 시험발사체 형태로 모델링 되어 있으며, 이 부분은 상대적으로 매우 긴 길이 (~10 m)의 유연 배관으로 구성되어 있고, 나로호와 다르게 발사체 하단부로 바로 연결되지 않고 발사 패드 지상부를 지나 나로호 당시 발사체보다 높은 위치에서 연결되어 수두압이 생성된다. 따라서 해당 부분의 압력강하가 높게 걸리며, 이로

인해 PI60의 압력값이 해석값에 비해 큰 값으로 해석된다.

(6) 단상 유동이 지배적인 선냉각 후 극저온 산화제 충전 상황에서는 단상 유동 해석 소프트웨어를 이용한 모델링이 소유량 조건에서는 높은 정확성의 유동 해석 결과를 보임을 확인하였다. 또한 향후 나로호 발사체-발사대 지상연결장치의 손실 계수를 모델링에 적용하여 대유량 조건에서의 해당 모델링의 신뢰성을 높일 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

1. Jaejun Lee, Sangmin Park, Sunil Kang, Hwayoung Oh, Eun Sang Jung. "Analysis on the Filling Mode of Propellant Supply System for the Korea Space Launch Vehicle." "Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference."2015. pp. 485~491.
2. Mansu Seo, Jae Jun Lee, Sunil Kang. "1-D Calculation of Simultaneous Filling Operation for Three Stages of Liquid Oxygen Filling System in Korea Space Launch Vehicle-II Launch Complex." "Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference."2016. pp. 837-845.
3. Soon-Young Park, Ji-hoon Kim, Pyung-Gu Park, Byung-II Yu. "Analysis on the Filling Mode of Liquid Oxygen to the Launch Vehicle Using Flowmaster." "Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference."2009. pp. 335-338.