

Flowmaster를 이용한 발사체 액체산소 충전 모드 해석

박순영* · 김지훈** · 박편구*** · 유병일**

Analysis on the Filling Mode of Liquid Oxygen to the Launch Vehicle Using Flowmaster

Soon-Young Park* · Ji-hoon Kim** · Pyung-Gu Park*** · Byung-Il Yu**

ABSTRACT

The process of charging an oxidizer in the liquid propellant rocket can divide into the cooling of the oxidizer tank, the high flow charge, the small flow charge, and the replenishment charge for the correction of temperature. The oxidizer of the Naro(KSLV-I) first stage uses the liquid oxygen. And the flow rate and the temperature specification corresponding to each charge mode are presented for the requirement. The flow throttling valve and heat exchanger are installed in the oxidizer filling system in order to satisfy this kind of the flow rate and temperature requirement specification. In this research, by using the Flowmaster which is a commercial one-dimension thermo-fluidic analysis program, one dimensional flow system analyses was performed to predict the exact flow rate at each specific mode. Also, the flow rate correction sensitivity of the flow control valves was analytically determined to satisfy the flow condition refinement at each mode within the limited certification test.

초 록

액체로켓에 산화제를 충전하는 과정은 크게 산화제 탱크의 냉각, 고유량 충전, 소유량 충전, 온도 보정을 위한 추가 충전으로 나눌 수 있다. 나로호(KSLV-I) 1단의 산화제는 액체산소를 사용하며, 각 충전 모드에 해당하는 유량 및 온도 요구조건이 제시되어 있다. 이러한 유량 및 온도 요구조건을 만족하기 위해서 산화제 공급시스템에는 유량조절용 밸브와 열교환기가 설치되어 있다. 본 연구에서는 발사체 산화제 충전과정에서 정밀한 유량 공급을 위하여 상용 1차원 열-유동 해석 프로그램인 Flowmaster를 이용하여 1차원 유동 시스템 해석을 수행하였다. 아울러 제한된 인증 시험을 통하여 각 모드에서의 유량 조건을 만족시키기 위한 유량제어밸브들의 유량 보정 민감도를 해석적으로 구하였다.

Key Words: Liquid Rocket(액체로켓), LOx(액체산소), Liquid Oxygen Filling System(액체산소 충전 시스템), Flowmaster(플로우마스터)

* 한국항공우주연구원 발사체엔진팀

** 한국항공우주연구원 추진기관체계팀

*** 한국항공우주연구원 터보펌프팀

연락처, E-mail: psy@kari.re.kr

나로호(KSLV-I) 1단은 액체산소(liquid oxygen)와 등유(kerosene)를 추진제로 사용하는 액체로켓이다. 이 중 발사체 산화제 탱크(OT1)에 액체산소를 충전하는 절차는 다음과 같다. 먼저 상온의 발사체 탱크에 급작스럽게 극저온 액체산소를 높은 유량으로 충전할 경우 발생할 수 있는 열충격을 감소하기 위한 충전배관 및 발사체 산화제 탱크의 냉각 단계가 있다. 발사체 탱크가 충분히 냉각된 후 이제 본격적인 고유량 충전이 있으며, 이때 산화제 탱크 대부분을 충전하게 된다. 발사체 산화제 탱크에 있는 레벨 스위치를 이용하여 액체산소가 일정 이상 충전되면 이때부터 저유량으로 충전을 시작한다. 저유량 충전 후 다시 발사체 탱크의 상부까지 모두 충전이 되면 충전 모드가 종료된다. 충전이 완료되면 이때부터는 보충 충전모드로써, 발사체 산화제 탱크로부터 기화되는 액체산소 만큼 지상의 열교환기로부터 온도가 낮아진 액체산소가 추가 충전하게 된다. 보충 충전모드에서는 액체산소의 기화량을 정확히 예측하기 어렵기 때문에 일정한 충전 유량을 고수하기 보다는 고유량 보충 충전모드와 저유량 보충 충전모드로 나누어, 저유량 보충 충전모드에서는 기화량이 충전량을 능가하여 발사체 탱크에서 산소량이 감소하게 되며, 고유량 보충 충전모드에서 감소된 산화제를 다시 보충하게 된다[1].

이와 같이 정의된 발사체 산화제 탱크의 충전 모드에서 정확한 충전 유량 확보란 발사 시의 기타 여러 시스템과의 운용 순서나 시간과 밀접한 연관을 가지기 때문에, 정확한 유량을 충전하는 것은 신뢰성 있는 발사 시퀀스 운용을 위해 필수적이라고 할 수 있다. 또한 급속한 극저온 산화제의 충전으로 올 수 있는 열충격을 방지하기 위해서도 정확한 유량 공급이 필수적이다. 실제 로켓의 인증 시험에서도 이와 같은 유량 측정이 되지만 제한된 횟수의 인증 시험에서 다수의 모드에서 정확한 유량값을 찾기 위해서는 해석적인 검토가 반드시 선행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 상용 1차원 열-유동 해석 프로그램인 Flowmaster를 이용하여 나로호 산화제 충전 유량을 계산하였다.

2. 본 론

2.1 산화제 공급시스템의 구성

Figure 1은 간략화 된 산화제 공급시스템(Liquid Oxygen Filling System, LOFS)를 나타내고 있다. 저장탱크(A10)에 저장되어 있는 산화제가 펌프(P30)로부터 가압되어 유량조절을 위한 종단 밸브 블록(End valve block)을 통하여 발사체로 공급된다. 이때 배관의 예냉(cooling)을 위한 드레인 탱크(A52)가 있어 이 쪽으로 액체산소를 흘러넘으로써 충전전 공급배관의 냉각을 수행한다. 또한 발사체 대유량 충전모드와 저유량 및 보충충전 모드에서의 펌프의 유량 특성을 일정하게 유지하기 위한 바이패스 배관과 유량 조절밸브(PV33)가 있어, 대유량 충전에서는 PV33 밸브를 닫아주고 소유량 충전과 보충충전 모드에서는 PV33 밸브를 어느 정도 열어서 펌프를 통과하는 총 유량이 각 모드에서 큰 차이가 없도록 한다. 종단 밸브에는 밸브의 개도를 수동으로 조절할 수 있는 유량 조절 밸브(KF valve)가 충전 라인에 총 6개(KF61~KF63, KF87 and KF88) 있다. 각 모드에서의 밸브의 개폐여부는 다음 표와 같다. 또한 보충 충전 모드에서 산화제의 온도를 낮추어 주기 위한 열교환기(X90)가 있다. X90은 액체질소가 담겨져 있는 용기에 충전하는 액체산소를 다수의 유로를 가지는 형태로 흘러주며, 열교환기 출구에서의 액체산소 온

Table 1. Liquid oxygen filling mode

Mode	Q[l/min]	T[K]	Valve
Cooldown	260~530	90~94	KF61 +KF63
Large flow filling	1300~1600	90~92	KF61 ~KF64
Small flow filling	420~580	90~92	KF61 +KF64
Large flow replenishment	150~210	87~91	KF87 +KF88
Small flow replenishment	15~20	87~91	KF88

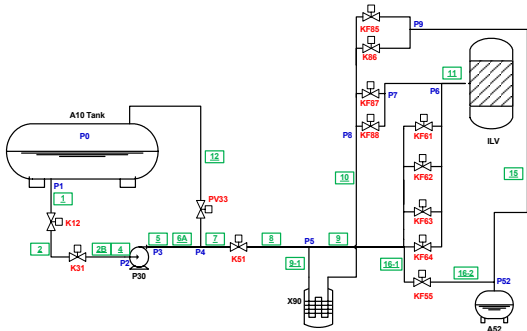


Fig. 1. Simple Schematic of Liquid Oxygen Filling System

도는 용기에 채워져 있는 액체질소의 양(높이)을 조절함으로써 각 모드에서 요구되는 값을 얻게 된다. 또한 각 충전 모드에서의 유량값을 측정하기 위한 유량계는 발사체 공급 배관의 최후단에 위치한 coriolis type 질유량계(FI63)와 KF61 밸브 후단의 오리피스 유량계(FI61), KF63 밸브 후단의 오리피스 유량계(FI62), 열교환기 후단의 오리피스 유량계(FI80) 및 KF88 밸브 후단의 오리피스 유량계(FI81)를 통하여 각각의 모드에서 정확한 유량 측정이 이루어질 수 있도록 하였다.

2.2 Flowmaster Network

Figure 2~3에 Flowmaster를 이용하여 LOFS 시스템을 구체적으로 모델링하기 위해서 구성한 해석 모델을 표시하였다[2]. 본 연구에서는 발사체에 실제로 산화제를 충전할 때의 유량을 정확히 계산하고, 이를 바탕으로 KF 밸브들의 개도를 정확히 도출하기 위해서 가능한 실제 LOFS 시스템의 레이아웃이나 구성품을 빼놓지 않고 모델링하였으며, 각 구성품의 특성 또한 일일이 반영하였다. 특히 펌프의 유량-수두 곡선은 충전 유량과 매우 밀접한 연관을 가지기 때문에 펌프를 PV33 밸브만 열고 바이패스 모드로 운전하면서 얻은 시험(autonomous test) 결과 Fig. 4와 같이 유량의 3차 형태로 보간하여 사용하였다. 이외의 곡관과 오리피스, 배관 및 밸브 등은 Flowmaster 기본 모델과 제조사의 규격을 입력으로 구성하였다. 열교환기는 유량 해석만을 고려하여 유동 저항 모델로 대체하였다.

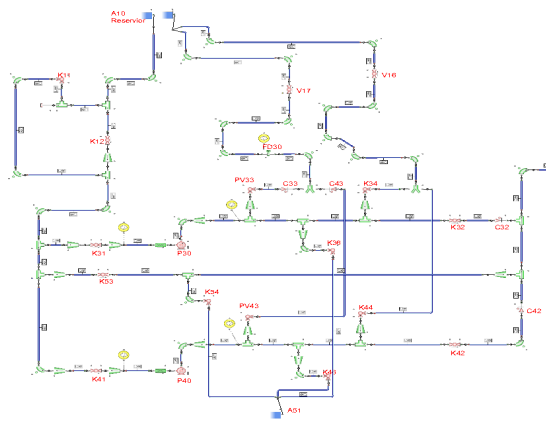


Fig. 2. Flowmaster Network of Liquid Oxygen Filling System : Around the reservoir(A10) and the pumps(P30)

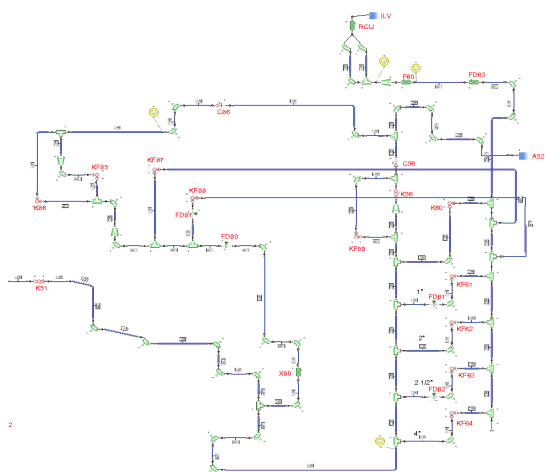


Fig. 3. Flowmaster Network of Liquid Oxygen Filling System : Around the heat exchanger(X90) and the end valve block

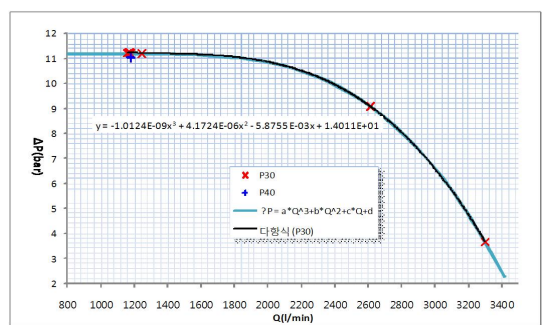


Fig. 4. Head Curve of Electrical Pumps(P30)

Table 3. Determined KF valve's Revolution Number

Valves	Dn	Kv max	Kv adjust.		Step	Full stroke	Adjust. Stroke		Revolutions, total	Revolution, adjust.
	mm	m3/hr	m3/hr	%	mm/rev	mm	%	mm	rev.	rev.
KF61	25	9.5	2.162	22.8	1.5	7	56.5	3.95	4.5	2.56
KF62	50	29	14.672	50.6	1.5	14	80.0	11.19	9.7	7.76
KF63	65	63	6.083	9.7	1.5	20	31.4	6.28	14.0	4.40
KF64	100	100	9.249	9.2	1.5	25	30.0	7.50	16.4	4.92
KF87	50	29	3.289	11.3	1.5	14	36.0	5.04	10.3	3.69
KF88	15	4	0.382	9.6	1.5	7	31.0	2.17	4.9	1.50

2.2 해석결과 및 고찰

Table 3은 Flowmaster를 이용하여 각 유량조절 밸브의 개도를 계산한 결과이다. 하지만, 이들 계산은 임의의 A10 탱크 수두와 OT1 압력을 기준으로 해석된 결과이다. 실제 충전 유량을 정확히 계산하기 위해서는 충전 시의 A10 탱크나 발사체 내의 OT1의 수두나 얼리지 압력을 정확히 알아야 하지만, 실제 OT1의 압력은 기화량이나 발사체 운용과 관련되어 어느 정도 변동 가능하다. 이러한 변화량을 고려하여 몇 가지 OT1의 압력에 대해서 각 유량계를 통과하는 유량을 계산하였으며, Fig. 5에 KF62 밸브에 대한 예를 제시하였다. 즉, 각 유량조절밸브의 고유유량 특성과 산화제 충전 배관에서의 유동 저항을 정확히 파악하기 어렵기 때문에 이와 같은 형태의 민감도(sensitivity)를 사전 해석을 통하여 도출하고, 실제 인증 시험을 통하여 획득한 유량계 측정값을 대입하여 유량 보정을 수행할 필요가 있다. Table 3은 이와 같은 방법으로 도출된 각 유량조절밸브의 정격 회전수에서 유량 조절 민감도($\partial Q/\partial\theta$)를 나타내고 있으며, 이 민감도란 유량조절밸브의 유량조절용 핸들 1 회전당 발사체에 공급되는 산화제 유량 변화량을 나타낸 것으로, 이 값을 이용하여 실제 인증 시험과정에서 쉽게 유량 보정이 가능하다.

3. 결 론

나로호 1단의 산화제 충전 시 각각의 모드에 해당하는 유량을 공급하기 위한 유량제어밸브의 개도를 Flowmaster를 이용하여 해석적으로 도출

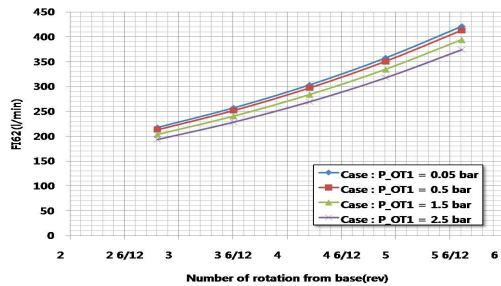


Fig. 5. An Example of Flow Rate to OT1 vs. KF62 Valve Revolution Number

Table 3. Sensitivity of KF valves

Valve Tag No.	$\partial Q/\partial\theta [l/(min \times rev)]$
KF61	41.978
KF62	152.13
KF63	73.283
KF64	75.924
KF87	37.373
KF88	13.32

하였다. 아울러 유량제어밸브의 유량 특성 오류나 충전 시의 OT1 압력이나 충전 배관의 유동 저항의 불확실성으로 인해 발생할 수 있는 충전 유량의 오차를 쉽게 보정하기 위한 각 제어밸브의 유량 조절 민감도를 계산하였다.

참 고 문 헌

1. KARI, "Operation Manual of Liquid Oxygen Filling System of KSLs," 2009
2. Flowmaster Co. Ltd., "Flowmaster Reference Manual," 2008