

시험용 달 궤도선의 추진제 공급부 설계 검증 Part I: 수치해석

김선훈^{a,*} · 김수겸^a

Engineering Validation for Propellant Isolation Assembly of Korea Pathfinder Lunar Orbiter Part I: Numerical Analysis

Sun-Hoon Kim^{a,*} · Su-Kyum Kim^a

^a Satellite Bus Development Division, Korea Aerospace Research Institute, Korea

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

ABSTRACT

In this study, a comparison was conducted to verify the propellant isolation assembly of the Korea Pathfinder Lunar Orbiter (KPLO). An engineering validation model (EVM) is being developed to simulate the flow of the flight model. Three factors were selected for comparison: the total pressure drop during propellant isolation assembly, the waterhammer by driving thruster valve, and the orifice set up for flow control and damping the waterhammer. The analysis results are compared with EVM test results. In the future, backup data to confirm the design will be established.

초 록

본 연구에서는 지상 시험과 수치해석을 비교하여 시험용 달 궤도선의 추진제 공급부 설계 검증을 하고자 한다. 비행 모델의 유동 흐름을 모사할 수 있는 지상 시험용 검증 모델을 제작하고 있으며, 지상 시험용 검증 모델과 비교하기 위한 항목을 배관 내 전체 압력 강하량, 추력기 밸브 구동에 의한 수격 현상 그리고 유량 제어 및 수격현상 완화를 위한 오리피스 장착의 세 가지로 선정하였다. 해석 결과를 향후 지상 시험 결과와 비교하여 최종적으로 설계 확정을 위한 근거 자료를 확보하고자 한다.

Key Words: KPLO(시험용 달 궤도선), Propellant Isolation Assembly(추진제 공급부), Waterhammer (수격현상), Pressure Drop(압력강하)

1. 서 론

Received 25 December 2018 / Revised 22 April 2019 / Accepted 24 April 2019

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2018년도 추계학술대회(2018. 12. 19-21, 웨스틴 조선호텔 부산) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

위성에서 추진 시스템은 임무 궤도에 진입할 추력을 제공하며 원활한 임무 수행을 위해 주기적으로 궤도 유지를 하며 임무 수행 중 목표물

을 지칭할 수 있도록 자세제어의 역할을 수행한다. 시험용 달 궤도선(Korea Pathfinder Lunar Orbiter, KPLO)은 발사체로부터 분리되어 4개의 30 N급 궤도 선회 추력기(Orbit Maneuver Thruster, OMT)를 이용하여 달 궤도에 진입하고, 8개의 3.4 N급 자세제어 추력기(Attitude Control Thruster, ACT)가 위성의 자세를 조정한다. 이와 같이 KPLO 추진 시스템의 기능은 위성의 수명에 직접적인 영향을 미친다.

따라서 지구 대기권으로부터 달 궤도에 진입하고, 달 궤도에서 정상적인 임무 수행을 할 수 있도록 추진 시스템의 추진제 공급부(Propellant Isolation Assembly, PIA)에 대한 검증이 필수적이다.

실제 추진 시스템과 위성의 운용 환경을 모사하기에는 천문학적인 금액이 소요된다. 대신, PIA를 검증하기 위한 방법으로 아래 두 가지를 선정하였다.

첫 번째는 이론적인 검증을 위한 전산유체해석이다. 특성곡선법(Method of Characteristics, MOC) 기반의 해석 툴인 Flowmaster2(6.1 ver.)를 사용하여 추진 시스템의 PIA를 모사하였다. 경계조건으로 위성이 우주공간에서 임무 수행 중 발생할 수 있는 임무 상황을 설정하여 PIA 설계의 완전성을 뒷받침할 자료를 수집하였다.

두 번째는 검증 모델(Engineering Validation Model, EVM)을 이용한 지상시험이다. 실제 운용 환경인 우주 공간처럼 중력을 상쇄하기 위해 모든 배관을 2D 평면에 상사하여 배치하였다. 추진제인 하이드라진(N2H4)과 물성치가 유사한 순수(De-ionized Water, DIW)를 작동유체로 사용하였다. 앞서 수치해석에서 선정한 임무 상황으로 지상 시험을 수행하고, 그 결과를 수치해석 결과와 비교하여 최종적으로 PIA의 설계를 확정할 근거 자료를 확보하고자 한다.

현재 EVM은 PIA의 모사 시험을 위한 주요 구성품의 입고 및 배치가 완료되었으며, 최종 조립을 거쳐 2018년 12월까지 완성하여 실험을 수행하고 Part. II에서 자세한 내용을 다룰 예정이다.

2. 본 론

선행연구에서는 ACT가 4개뿐인 상태에서 Flowmaster와 EcosimPro의 두 해석 툴을 이용하여 PIA 설계의 건전성을 확인하였다[1,2].

그러나 이후 제어마진을 위해 ACT가 4개 추가되어 Fig. 1과 같이 총 8개의 ACT를 갖는 형상으로 설계가 변경되었다. Fig. 2는 Schematic 내의 기호에 관한 설명이다. 서론에서 언급한 바와 같이 추후 수행 할 EVM의 지상시험과 함께 비교 검증할 항목으로 아래의 세 가지 사항을 선정하였다.

- 1) Orifice
- 2) PIA Steady-state Pressure Drop
- 3) Waterhammer Analysis

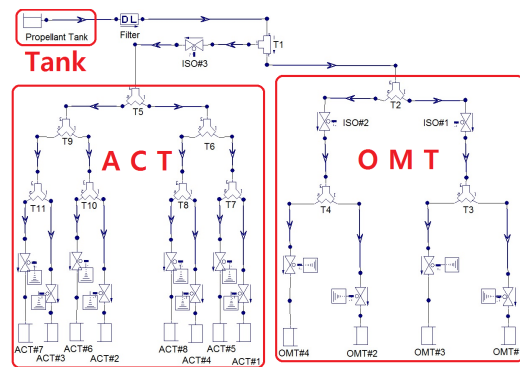


Fig. 1 Schematics of KPLO Propulsion Subsystem.

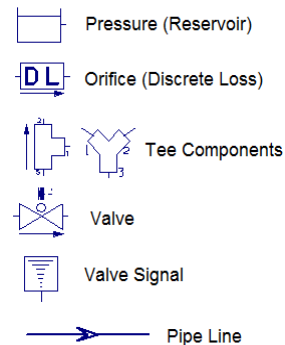


Fig. 2 Symbols of the Schematic

2.1 오리피스스의 직경과 장착 위치

오리피스를 장착함으로써 OMT에 적절한 유량의 추진제를 공급할 수 있다. 또한 상대적으로 많은 유량이 공급되는 OMT쪽의 밸브 구동에 의한 수격현상의 영향을 완화하는 효과를 기대할 수 있다.

$$K = \frac{2g\Delta HA^2}{Q^2} = \frac{1}{C_d^2} \quad (1)$$

오리피스는 Eq. 1과 같이 무차원으로 표현되는 손실계수(Resistance Coefficient, K) 값을 이용하여 설계한다. ΔH 는 오리피스를 통과하며 발생하는 추진제의 차압으로, 수주미터(mH_2O) 단위를 사용한다. A는 오리피스 구멍의 면적(m^2), Q는 추진제의 부피유량(m^3/s)이다. 일반적으로 K는 Discharge Coefficient(C_d)와 Eq. 1과 같은 관계를 갖는다.

Figure 3에 오리피스를 장착할 후보 위치 세 지점을 표기하였다. ACT를 제외한 OMT만을 제어하기 위해 Tee 1 분기점 후단으로 설정하였다. Point 1은 OMT 4개의 유량을 한꺼번에 조절하기 위한 곳이며 일반적으로 유량 제어는 배관 중단에서 수행하는 것이 유리하여 Point 2와 3에 각각 2개, 4개씩 배치하는 방안을 고려하였다. 특히 Point 3은 각 추력기 별 세밀한 제어가 가능할 것으로 판단하였다.

오리피스의 K는 오리피스의 형상에 의해 일정한 값을 갖는다. 일반적으로 K보다는 C_d 로 표현되는데 0.61 ~ 0.64의 값을 갖는다.

오리피스가 형상에 의해서 결정된 일정한 K값을 가질 때, 지정된 배관 내 유량(Q)에 대한 목표 차압(ΔH)을 설계하면 오리피스의 직경을 계산할 수 있다.

OMT의 설계검증모델의 연소시험 결과, OMT로 공급되는 유량을 설계유량인 13.6 g/s로 맞추기 위해, 추진제 탱크의 압력인 19 bar로부터 약 1.1 bar (약 11.2 mH_2O)의 감압이 필요하다. 따라서 목표 차압을 해당 값으로 설정하여 Eq. 1을 통해 오리피스의 직경을 계산하였다. 오리피스 계산 결과를 Table 1에 나타내었다.

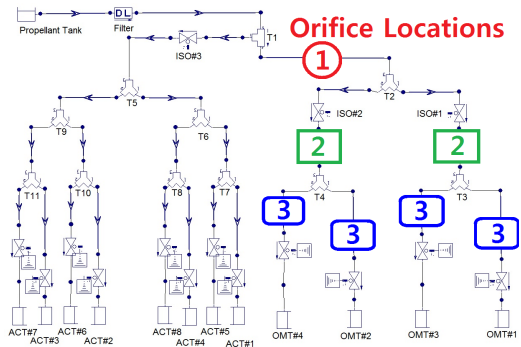


Fig. 3 Three cases of orifice location.

Table 1. Orifice design table.

	Point 1	Point 2	Point 3
No. of orifice	1 EA	2 EA	4 EA
Flow-rate per orifice [g/s]	54.4	27.2	13.6
Diameter [mm]	2.74	1.93	1.37
Target pressure drop, ΔH [mH_2O (bar)]	11.2 (1.1)		
Discharge Coefficient, C_d	0.62		
Resistance Coefficient, K	2.61		

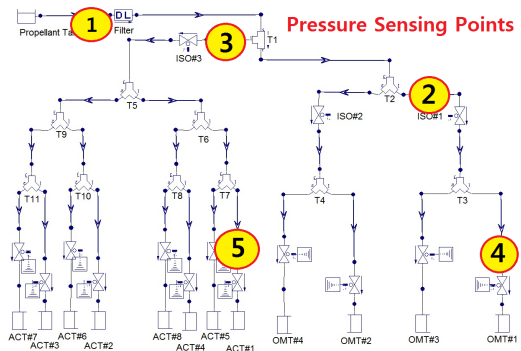


Fig. 4 Pressure sensing points.

Table 2. Characteristics of OMT inlet by orifice status.

Location	None	Point 1	Point 2	Point 3
Pressure [bar]	18.803	17.705	17.689	17.705
Flow-rate [g/s]	14.052	13.635	13.629	13.635

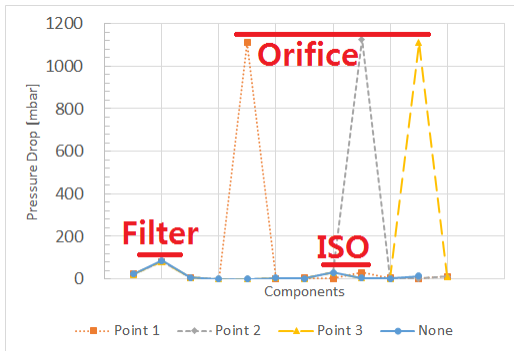


Fig. 5 Pressure drop of each component.

오리피스에 장착상태에 따른 정상상태 해석 결과는 아래 2.2절에서 함께 언급하고자 한다.

2.2 정상상태의 압력강하량

추력기 밸브를 통해 추진제가 지속적으로 공급되어 일정한 추력을 발생하고 있는 정상상태에서 해석을 진행하였다. 이 때, 특정 배관이나 구성부품에서 지나치게 높은 부하를 받는 부분이 있는지 확인 해 보았다.

Figure 4와 같이 해석 모델과 EVM에서 공통적으로 압력 변화를 측정하여 비교할 부분을 필터, ISO밸브, 추력기의 전단으로 총 다섯 군데로 선정하였다.

Table 2에 오리피스 장착상태에 따른 OMT 밸브 전단의 주입 압력과 OMT로 공급되는 유량을 나타내었다.

각 지점에 오리피스를 장착한 결과, 목표한 차압과 유량을 1%내외의 오차범위 이내로 만족하는 것을 확인하였다.

Point 1,2,3의 해석 결과를 비교해 보면 오리피스의 장착 위치나 개수에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다. 따라서 EVM의 시험 결과와 비교하여 이상이 없는지 확인하고, 결정적으로 비행모델 제작에는 작업 편의성 등을 고려하여 결정해야 할 것이다. 개수에 의한 영향이 없으므로 간단하게 Point 1에 하나의 오리피스만 장착하면 충분할 것으로 판단한다.

Figure 5의 x축은 추진제 탱크로부터 추력기 중단까지 배관 및 구성 부품에 따라 순서대로 나열하였으며, y축은 각 지점의 배관이나 구성 부품에서 발생하는 압력강하량을 mbar 단위로

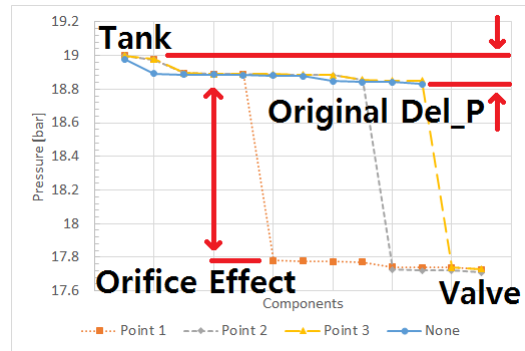


Fig. 6 Pressure distribution from tank to valve.

나타내었다. 유량 수준에 따라 적합한 배관 두께를 선정하였기 때문에 배관 자체에서 발생하는 손실은 거의 없다.

Filter, ISO밸브와 같은 주요 구성품에서 각각 80/30 mbar 정도가 손실되며, 오리피스는 설계한 수치인 1.1 bar 정도의 압력 손실이 발생한다.

또한 Fig. 6의 y축은 배관 내 압력을 나타낸다. 추진제 탱크의 압력인 19 bar를 시작으로 압력강하가 점점 누적되어 오리피스가 없는 기본 설계에서 최종적으로 추력기 밸브 전단에 18.8 bar로 유입된다. 따라서 약 0.2 bar가 KPLO PS의 설계 특성으로 볼 수 있다.

여기에 지정된 위치에 오리피스를 추가로 장착함으로써 OMT 쪽으로만 약 1.1 bar의 의도된 압력 손실로 유량 제어를 수행하였다. 어느 지점에 오리피스를 장착해도 약 17.7 bar로 일정하게 추진제가 원하는 유량만큼 공급됨을 확인하였다.

2.3 수격현상 해석

수격현상(Waterhammer)은 배관 내 유체가 밸브 등의 구동에 의해 급격한 변화를 맞이할 때 배관 및 구성품에 Impulse 충격이 가해지는 현상을 말한다. 잘못된 배관 설계나 밸브 운용에 따라 심각한 경우 구성품에서 보증하는 압력 이상의 비가역적 충격이 발생할 경우, 위성의 임무 실패로 이어지게 된다.

따라서 사전에 유동해석을 통해 추진제 설계의 안정성을 검토하고, pulse width 최소 조건 등 연속적인 밸브 운용에 대한 가이드라인을 제

시할 수 있을 것이다. 유동해석의 경우, 대개 최악의 조건을 상정하여 해석을 진행한다. 현재 KPLO의 임무에서 추진계 배관에 가장 부담을 주는 운용 형태는 OMT 4개가 모두 동작하는 Del_V 모드에서 위성의 자세를 제어하기 위해 ACT 8개 중 4개가 운용되는 상황이다. 따라서 모든 해석 조건은 해당 상황을 토대로 시행되었다.

또한 제어 관점에서도 배관에 무리를 주지 않기 위해 순차적으로 밸브를 구동하지만, 최악의 조건을 위해 모든 밸브가 동시에 열리고 닫히는 상황을 가정하였다.

마지막으로 밸브의 닫힘 응답시간이 수격현상의 해석에서 가장 큰 영향을 미친다.

ACT와 OMT 밸브의 시험 결과의 밸브 성능인 개폐 응답 시간을 nominal condition으로 명명하였고, 밸브의 닫힘 응답시간이 1 ms로 아주 짧은 극악의 상황을 extreme condition으로 명명하여 Table 3에 나타내었다.

이와 같이 가장 혹독한 조건에서 해석을 수행하여 위성이 어떠한 경우에서도 추진시스템의 안정성을 확보할 수 있도록 하였다.

Figure 7은 일반적인 수격현상 그래프의 모델이다. 추력이 밸브가 열리면 배관에 정체되어있던 추진제가 공급되면서 압력이 하락하는 방향으로 파동이 발생하고 정상상태의 압력강하량만큼 하락된 압력에서 안정화 한다. 이후 밸브가 닫히면서 배관 내 추진제가 밸브에 부딪히며 압력이 상승하는 수격현상이 발생된다. 최고 압력을 거쳐 배관의 탄성에 의해 서서히 감쇠되어 원래 압력으로 회복된다.

오리피스가 없는 상태에서 수격현상 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 파란색 점선은 1ms의 닫힘 응답시간을 갖는 extreme condition이며 빨간색 실선은 nominal condition이다.

Figure 8에서는 Fig. 7의 steady-state pressure drop을 관찰할 수 없는데, 이는 steady-state pressure drop이 Fig. 6의 original del-P 값인 0.2 bar에 해당 하므로 그래프 상에서 drop을 거의 확인할 수 없는 수준임을 알 수 있다. 반대로 Fig. 9에서는 오리피스로 인해 del_p를 육안으로 확인할 수 있다.

Table 3. Response times of valve driving.

	Nominal Condition		Extreme Condition	
	Open	Close	Open	Close
ACT	5	4	5	1
OMT	10	5	10	1

* Unit: msec

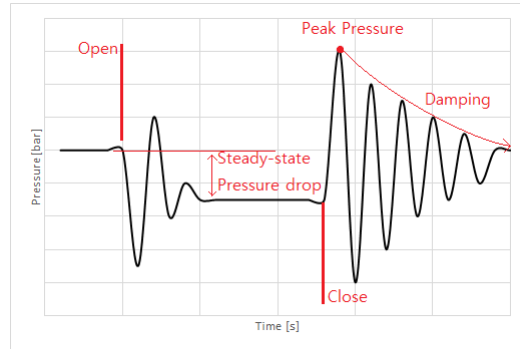


Fig. 7 General waterhammer model.

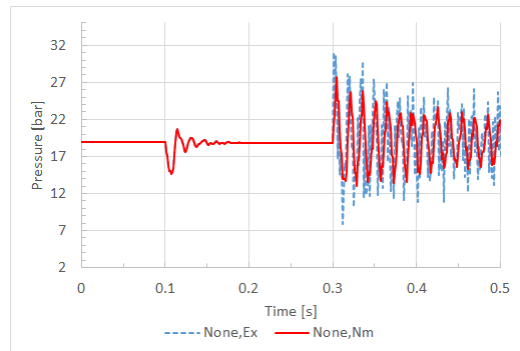


Fig. 8 Transient waterhammer analysis results without orifice.

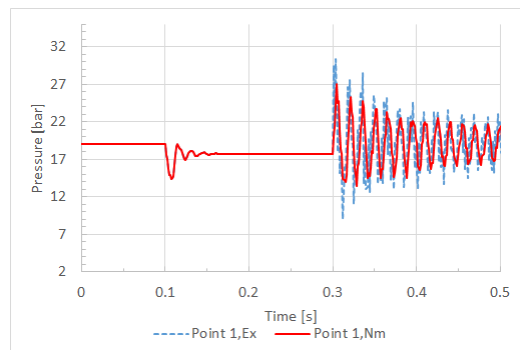


Fig. 9 Transient waterhammer analysis results with orifice at point 1.

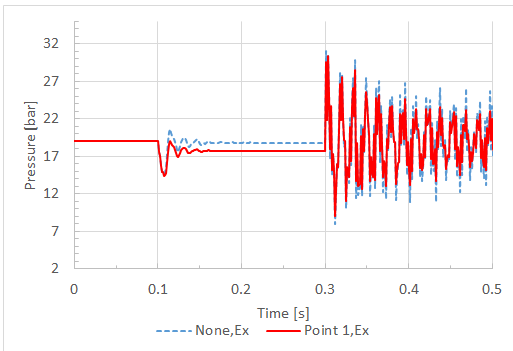


Fig. 10 Orifice effect for waterhammer, OMT.

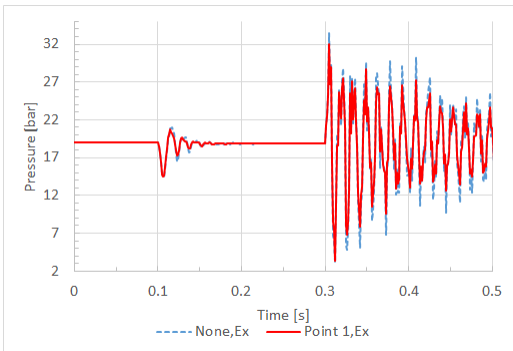


Fig. 11 Orifice effect for waterhammer, ACT.

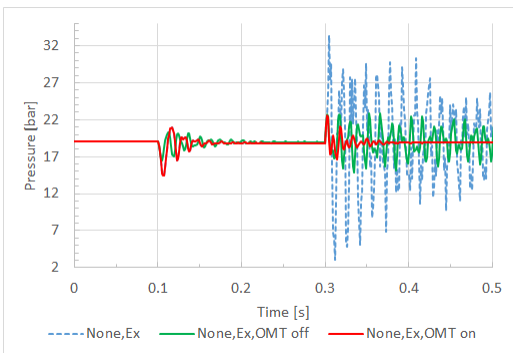


Fig. 12 Orifice effect for waterhammer, ACT by On-off Status of OMT.

Table 4. PS component's pressure table[2].

Pressure[bar]	Filter	HFLV*	LFLV*	ACT	OMT
Maximum Operating	27.58	22	31.03	24.13	27.58
Proof (Open/Close)	41.37	51.71	67.22	46.88 103.42	64.67 103.42

* H/LFLV: High/Low flow latch valve

밸브는 0.1 s에 열려 안정화 단계를 거쳐 정상 상태에 진입함을 알 수 있다. 이후 0.3 s에 밸브가 닫히면서 peak pressure를 지나 damping 되는 모습을 확인할 수 있다.

밸브가 닫힐 때 nominal condition에서 27.77 bar, extreme condition에서 31.12 bar를 기록하여 닫힘 응답시간이 짧을 때 더 높은 peak pressure를 관찰할 수 있었다. 따라서 유체가 밸브와 같은 구성품에 부딪히는 수격현상은 닫힘 응답시간에 큰 영향을 받음을 확인하였다.

Table 2와 Fig. 5,6의 정상상태 해석의 결과를 통해 오리피스 설치 Point 1,2,3 모두 압력/유량 오차범위 0.06%/0.022% 내로 사실상 같은 결과를 보인다. 따라서 아래에서 부터는 Point 1을 대표로 오리피스 장착 여부에 따른 비교를 수행하고자 한다.

Figure 9는 point 1에 오리피스를 장착한 경우 extreme/nominal condition 해석 결과이다. Peak pressure가 각각 30.33/27.11 bar로 최고 압력을 낮추는 효과를 확인하였다. 또한 오리피스가 있을 때 각 파동의 진행에서 최고 압력이 점점 낮아져 원래의 압력으로 안정화 하는 속도가 더 빨라지는 현상, 다시 말해 damping의 효과가 개선됨을 확인하였다.

Figure 10은 OMT, Fig. 11은 ACT에서의 해석 결과이다. OMT에 비해 유량이 상대적으로 1/8 수준인 ACT 쪽에서 더 큰 수격현상이 나타난 이유에 대해 알아보기 위해 OMT 밸브가 계속해서 열려 있는 상황과, OMT는 운용하지 않는 상황에서 ACT 밸브를 개폐하는 경우를 가정하여 해석한 결과, Fig. 12와 같은 결과를 도출하였다.

OMT 밸브가 계속해서 열려있는 상황에서는 OMT 쪽으로 추진제가 소모되고 있기 때문에 ACT 밸브의 폐쇄 영향에 대한 파동이 단혀있는 밸브에 부딪혀 수격현상이 증첩되지 않고, OMT의 유동을 통해 빠져나가는 영향으로 인해 상대적으로 낮은 peak를 관찰할 수 있다.

KPLO가 달 궤도에 성공적으로 진입한 이후에는 OMT를 사용하지 않고 ACT만을 운용한다. 따라서 Fig. 12의 'None, Ex, OMT off'는 해당 상황의 worst case로 볼 수 있다.

해석 결과를 통해, 오리피스를 장착하는 목적이었던 OMT의 수격현상 완화 및 유량제어가 성공적으로 수행됨을 확인하였다. 또한 Fig. 11에 의해 오리피스를 장착할 경우 OMT의 수격현상이 ACT에 미치는 영향은 peak pressure와 damping 측면에서 소폭 감소함을 확인하였다.

KPLO 추진 시스템의 주요 구성품에 대한 최대 작동 압력과 보증 압력을 Table 4에 나타내었다. Extreme condition에서도 최대 약 30 bar 수준이므로 수격현상으로 구성품이 손상되어 위성의 임무 수행에 영향을 미치는 가능성은 낮다고 판단한다.

3. 결 론

전산수치해석 결과와 EVM 지상시험 결과를 비교하여 KPLO 추진시스템의 설계 확정을 위한 근거를 마련하고자 하였다. 정상상태 해석, 수격현상 해석, 오리피스 해석의 결과는 다음과 같다.

3.1 정상상태 해석

유량이 일정하게 공급되고 있는 정상상태 해석을 수행한 결과, 배관 내 유량에 따라 배관 두께가 적합하게 설계되어 배관 자체의 손실량은 무시할 만한 수준으로 측정되었다. Filter, ISO 등 주요 구성품에서는 각각 80/30 mbar로 측정되었으며, 오리피스가 없는 상태에서 총 0.2 bar 수준으로 나타났다.

오리피스를 장착하면, 설계 차압인 1.1 bar 정도 추가되어 최종적으로 Tank 압력 19 bar로부터 OMT 전단에서 약 17.7 bar 까지 감압되어 OMT의 설계 유량인 13.6 g/s를 만족한다. 오리피스는 ACT와 OMT의 분기점인 Tee 1 후단에 설치되기 때문에 ACT에는 약 18.8 bar의 압력이 공급된다.

3.2 수격현상 해석

배관 내 유체가 밸브의 개폐와 같은 급격한 환경 변화에 따라 구성품에 충격을 가하는 수격

현상에 대해 해석하였다. 수격현상에 영향을 미치는 요소로는 유량, 밸브의 닫힘 응답속도 등이 있다.

KPLO의 임무 조건 중 가장 많은 유량을 사용하는 조건에서 밸브의 닫힘 응답속도에 따라 nominal condition과 extreme condition으로 구분하여 해석한 결과, Fig. 7과 같은 일반적인 수격현상 모델과 유사한 개형의 그래프가 나타났다. 또한 밸브의 개폐에 의한 peak pressure가 각 구성품의 proof pressure를 초과하지 않으므로 설계에 문제가 없음을 확인하였다.

3.3 오리피스 해석

ACT를 제외한 OMT만의 유량 제어를 수행하고, 수격현상의 완화를 위한 오리피스의 설계를 수행하였다.

오리피스를 설치할 후보 위치를 세 군데로 정하여 각 구역에 맞는 오리피스의 직경을 계산하여 해석한 결과, 어떤 위치에 적용하더라도 원하는 유량 및 설계 압력을 확보할 수 있었다. 추후 EVM 시험 결과 및 작업성을 고려하여 결정하고자 한다.

또한 오리피스를 장착했을 때, OMT 자체의 peak pressure의 감소 및 damping 효과 증가를 확인하였으며, 상대적으로 유량이 큰 OMT의 수격현상 영향이 ACT로 전달되는 현상에 대한 감쇠효과를 확인하였다.

수치해석을 통해 앞으로 수행할 EVM 지상시험과 비교하기 위한 데이터를 확보하였으며, KPLO PS의 설계가 위성의 임무 수행에 타당함을 확인하였다.

References

1. Kim, S.H. and Kim, S.K., "Numerical Analysis for Verifying The Design of Propulsion Subsystem Propellant Isolation Assembly for Korea Pathfinder Lunar Orbiter," *KSAS 2017 Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 153-154, Nov. 2017.

2. Kim, S.H., Kim, S.K., and Chae, J.W., "Numerical Analysis of KPLO Propellant Isolation Assembly Using EcosimPro," *KSPE 2017 Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 204-205, Nov. 2017.
3. Wylie, E.B., Streeter, V.L. and Suo, L., *Fluid Transients in Systems*, Prentice-Hall Inc., New York, N.Y., U.S.A., Ch.3, 1993.