

## CC 산화제 개폐밸브 성능향상에 관한 연구

배영우\*, 김도형\*\*, 홍문근\*\*\*, 이수용\*\*\*\*, 장기원\*\*\*\*\*

### Study on the performance improvement of a Main Oxidizer shut-off Valve

Youngwoo Bae\*, Dohyung kim\*\*, Moongeun Hong\*\*\*, Soo Yong Lee\*\*\*\*, Kiwon Jang\*\*\*\*\*

#### Abstract

MOV(Main Oxidizer shut-off Valves) control the combustion of launch vehicle systems by the supply and the isolation of liquid oxygen to a main combustion chamber in launch vehicle systems. Moreover, the MOV should secure a constant flow rate of liquid oxygen for combustion instability in the steady operational state. Although it has been showed that a EM(Engineering Model) with a high discharge coefficient value compared with the TM(Technology Model) fills the overall performance requirements, additional design modifications in some critical parts of the EM were conducted to improve the performance. The configurations of the pressure-control body, the middle flange, and the lips of the inlet body of the EM were modified and the performance tests have been performed with test models. Consequently, the intended improvements have been verified by the performance tests.

#### 초 록

발사체 추진시스템에서 CC(Combustion Chamber) 산화제 개폐밸브는 액체산소를 연소기로 공급 및 차단함으로써 연소를 개시 및 중단시킬 뿐만 아니라, 정상운영 상태에서는 연소기 내 안정된 연소가 가능하도록 일정한 유량의 액체산소를 공급한다. TM(Technology Model)에 비해 높은 유출계수를 가지는 EM(Engineering Model)이 전반적인 요구 성능을 만족하는 것으로 나타났지만, 성능 향상을 위해 EM의 주요 부분에 대한 추가적인 설계 변경을 수행하였다. 공압 제어부, 중간 플랜지, 그리고 밸브 입구의 립 부분의 형태를 설계 변경하였으며, 해당 시험 시제를 제작하여 성능시험을 수행하였다. 이러한 성능 시험을 통해 의도했던 성능 향상이 이루어진 것을 최종 확인하였다.

키워드 : 산화제 개폐밸브(Main oxidizer valve), 누설시험(leakage test), 극저온시험(cryogenic test), 소킹(soaking)

---

접수일(2010년 1월 7일), 수정일(1차 : 2010년 4월 7일, 2차 : 2010년 6월 17일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

\* (주)한화/bae0731@hanwha.co.kr

\*\* (주)한화/domi1122@hanwha.co.kr

\*\*\* 발사체미래기술팀/conquet@kari.re.kr

\*\*\*\* 발사체미래기술팀/sylee@kari.re.kr

\*\*\*\*\* (주)한화/jkiwon@hanwha.co.kr

## 1. 서 론

우주발사체 액체추진기관용 CC(Combustion Chamber) 산화제 개폐밸브(MOV, Main Oxidizer shut-off Valve)는 연소기에 산화제인 운영 온도 90K의 액체산소(LOX, Liquid OXygen)를 공급해주는 엔진공급계 구성 요소로써, 연소기 매니폴더 전단 배관에서의 유로 개폐 기능을 통해 고압/극저온 액체산소의 공급을 제어하여 엔진 기동과 연소 중단을 수행한다 [1]. 산화제 공급 배관 내의 압력이 연소압력 보다 상당히 높은 수준에서 유지/운영되며, 일반적인 산업용 밸브의 작동 환경 및 운용조건에 비해 매우 극한적이고 제한적인 운영 환경 조건이므로, 이를 만족하는 산화제 개폐밸브를 개발하기 위하여 압력손실 최소화 및 중량 최적화를 비롯해 힘평형 해석 및 극저온 환경에서의 기밀 유지 등의 주요 핵심 기술에 대해 중점적으로 연구하여야 한다 [2,3].

MOV 개발과 관련하여 포핏(Poppet)과 피스톤(Piston)이 분리된 구조를 가지는 MOV의 TM(Technical model)과 EM(Engineering model)을 설계, 제작하여 성능시험을 수행하였으며 [4, 5], EM의 경우 TM의 낮은 유출계수를 크게 향상시켰을 뿐만 아니라 [6-8], 극저온 씬을 PTFE에서 PCTFE로 교체함으로써, 전반적인 기밀 성능이 설계 규격을 만족하는 것으로 나타났다 [5]. 한편 본 연구에서는 EM의 추가적인 성능 향상을 위해 공압 제어부, 중간플랜지, 그리고 밸브 입구의 립 부분의 형태를 변경하고 해당 시험 시제를 제작하여 성능시험을 수행하였다. 공압부의 형상개량, 중간플랜지부 기밀성능 향상, 밸브 입구의 립 구조보강을 중점적으로 연구하여 실제 발사체 환경과 유사한 극저온/고압 환경에 최적화된 시험시제를 설계, 제작하여 성능시험, 극저온/상온 기밀시험 및 진동시험 등을 통해 향상된 성능을 검증하였다. 본 논문 2절에서는 제작과정 중 중요공정인 소킹(Soaking)공정에 대해 간단히 소개하고, 이후 성능 향

상을 위해 개선한 설계내용 및 인증시험에 대해 내용을 정리하도록 한다.

## 2. 소킹(Soaking)

소킹 공정은 시제품을 제작하는 공정 중 주요 공정으로써, 정삭 가공 전 각 부품을 액체질소에 넣어 극저온 환경에서 발생할 수 있는 치수변화를 미리 발생시키는 작업이다(그림 1 참조). 이는 극저온에 사용되는 MOV의 경우, 극저온 환경에서 치수변화가 일어나 조립 및 기밀 성능에 영향을 줄 수 있기 때문에 정삭 전에 소킹 공정이 필수적이다.



그림 1. MOV EM B형 소킹

밸브 입구 몸체(Inlet Body)의 중요부위에 해당하는 8부분 치수를 소킹 전후로 측정하여 비교한 결과는 다음 표 1과 같다.

표 1. 소킹 전후 Inlet Body 치수측정결과(단위: mm)

	가공치수	1차 소킹	2차 소킹
1	106.032	106.101	106.101
2	115.050	115.125	115.121
3	95.658	95.716	95.716
4	116.46	116.54	116.57
5	186.008	186.075	186.089
6	198.008	198.089	198.094
7	250.020	250.170	250.170
8	175.500	175.624	175.622

1차 소킹 후 치수측정결과 최대 0.124mm를 포함한 평균 0.088mm의 변화량을 확인할 수 있었고, 이는 약 0.060%에 해당하는 변화율이다. 하지만 2차 소킹 후 치수측정결과를 살펴보면 평균 0.007mm의 변화량 및 약 0.005%의 변화율을 나타낸다. 결과적으로 1차 소킹에서 극저온 환경이 부품소재인 STS321에 영향을 주어 소성변형이 일어나지만 2차 소킹이 추가적인 소성 변형을 일으키지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 부품제작 공정에 황삭 또는 중삭 이후 소킹 공정을 수행함으로써 정삭가공 후 극저온 환경시험에서 소재의 변형이 야기할 수 있는 치수변화를 최소화 할 수 있다. 본 논문 연구를 위해 제작된 부품은 각각 중삭 공정까지 완료한 후 정삭 및 연삭에 들어가기 전 소킹 공정을 최소 1시간이상 적용하고 최종 치수로 가공되었다. 정삭 및 연삭 가공 후 치수검사 시 중요치수를 모두 만족하였으며 가조립 시 문제가 없음을 확인하였다.

### 3. 공압부(Control Part)

공압부는 밸브의 포핏을 움직이는 구동부로서 기존 EM의 경우 공압부 몸체, 플랜지(Flange) 및 볼트 12개로 구성된다. 이에 대한 설계변경항목으로 볼트 대신에 톱니나사(Buttress Tread)를 공압부 몸체에 적용하여 너트에 해당하는 품목을 추가하였다. 이는 체결부의 한 쪽으로만 압력이 가해지는 내압에 적합한 형상으로 개량하면서 부품수를 줄이고, 작업공정을 단순화시킴으로써 공압부의 누설이 발생할 수 있는 경우의 수를 최소화 하는데 목적이 있다. 그림 2는 기존 설계와의 비교이다. 기존 설계의 공압부는 볼트 조립형식으로 M5 볼트 및 와셔가 각각 12개씩 조립되어 금속 씬을 통한 기밀을 유지하는 역할을 하였다. 기밀유지에 문제는 없었지만 조립 부품수가 많음에 따라 조립분해 소요시간이 길고, 금속 씬을 균일하게 압착시켜야 하므로 조립공정이 복잡해지는 단점이 있었다.

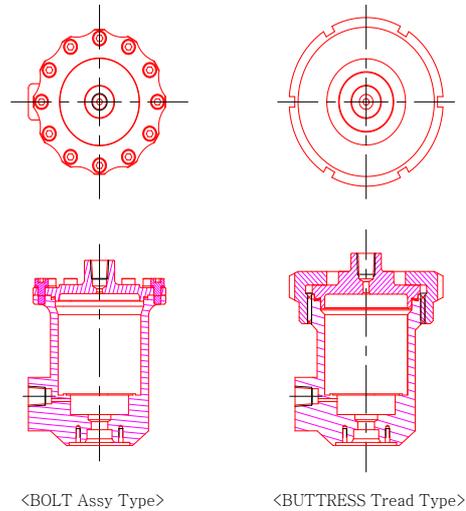


그림 2. MOV EM 공압부 형상변경

따라서 톱니나사를 공압부의 몸체에 적용하고 볼트 대신 공압부와 결합되는 너트를 사용하여 이러한 단점을 해결할 수 있도록 형상을 개선하였다.

#### 3.1 시험시제품 제작 및 조립

톱니나사 형식 공압부의 기밀여부를 확인하기 위하여 시험시제품을 설계/제작 하였다. 가공의 용이성을 고려하여 공압부의 하단부분을 단순화하여 설계하였고, 내경은 기존 시제와 동일한 치수로 가공되었다. 이 외에 나사부의 체결로 인한 동종금속간의 고착을 방지하기 위하여 이황화 몰리브덴 표면처리를 적용하였다 (그림 3 참조).

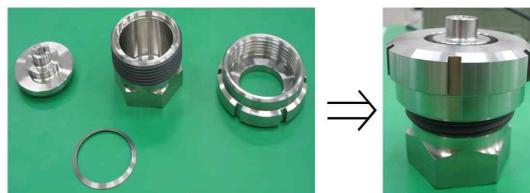


그림 3. 공압부 시험시제

### 3.2 인증시험 수행

- 상온기밀시험
  - 사용기체 : 헬륨가스
  - 가압조건 : 8.4MPa
  - 공압부에 8.4MPa까지 가압하여 3분간 대기한 결과, 누설 없음을 확인하였다 (그림 4 참조).



그림 4. 공압부 기밀시험

- 극저온기밀시험
  - 시험온도 : 극저온(-196℃, 액화질소 사용)
  - 사용기체 : 헬륨가스
  - 가압조건 : 8.4MPa
  - 시험시제가 액화질소에 들어가 있기 때문에 누설이 발생되어도 육안확인이 불가능하므로 압력센서를 입구 포트에 연결하여 압력 데이터를 저장하고 차후 데이터 처리를 통해 확인한다 (그림 5, 6 참조).



그림 5. 공압부 극저온 시험

- MOV EM 요소기술 시험 절차서에 따라 [5] 시제를 극저온시험용 챔버 내에서 MEOP의 1.05배인 8.4MPa까지 가압하여 열평형 상태까지 대기한 결과 누설 없음을 확인하였다.

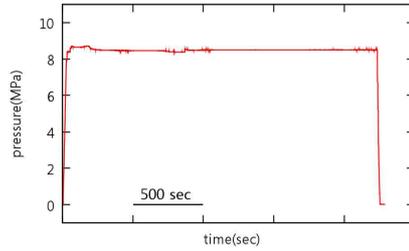
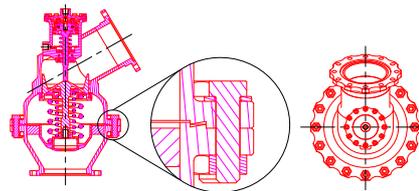


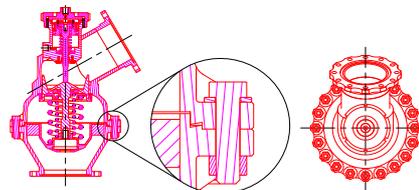
그림 6. 공압부 극저온시험 압력선도

### 4. 중간플랜지

중간플랜지 누설의 원인 파악 및 기밀을 위한 조립부 형상변경을 수행하였다. 그림 7은 기존 설계와의 비교이다. 기존 시제의 중간플랜지는 M12 볼트 및 와셔가 각각 16개씩 조립되었으며, 최초 상온기밀시험에는 누설이 없었으나 그림 8과 같이 극저온 시험 등의 환경시험 후 검증시험에서 누설이 발생되었다. 이에 따라서 내부압에 의한 쉘 Groove의 구조적 취약점을 발견하고 그림 7의 형상과 같이 구조보강을 위하여 볼트 개수를 20개로 변경, Taper 형상으로 플랜지 변경, 조립부 형상변경 등을 적용하여 상온 및 극저온 환경에서 기밀시험을 수행하였다



<Bolt 16EA Type MOV EM>



<Bolt 20EA Type MOV EM>

그림 7. MOV EM 중간플랜지 형상변경

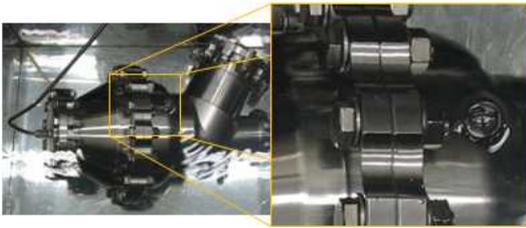
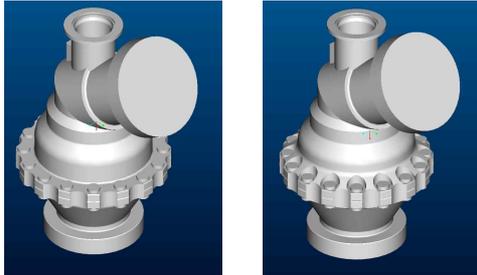


그림 8. 극저온시험 후 상온시험 시 누설발생

#### 4.1 중간플랜지 구조해석

본 구조해석은 중간플랜지의 극저온 환경 하에서 누설을 막는 목적으로 기존 설계와 구조 보강된 설계 간의 기밀부 변위 비교에 목적이 있다. 해석은 Finite Element Method를 기반으로 한 ANSYS를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 중간플랜지 모델의 빠른 해석진행을 위하여 그림 9와 같이 밸브의 관심 있는 부분인 중간플랜지 부분을 제외한 나머지 부분은 단순화하여 표현하였으며 공압부에 조립되는 피스톤 조립체는 제외시켰다.



<볼트 16개 Type>      <볼트 20개 Type>

그림 9. MOV EM 중간플랜지 해석모델 형상

해석조건은 그림 10에서 보는 것과 같이 볼트와 중간플랜지의 Contact 조건은 No Separation 조건을 사용하였으며 모든 조립부는 Bonded로 설정하였다. 그림 10에 파란부분의 구속조건은 Fix Support로 적용하였으며 내부에 압력은

10.5MPa로 적용하였다. 볼트의 조임 토크에 의한 축력은 아래 식(1)과 같이 간단한 식으로 계산되며 단면적 A는 식(2)를 이용하여 계산하였다.

$$F = T/A \dots \dots \dots (1)$$

$$A = \frac{\tan\alpha + \mu\cos\alpha \times \sec\beta}{1 - \mu\sin\alpha \times \sec\beta} \times \frac{d_m}{2} + \mu \frac{d_c}{2} \dots \dots \dots (2)$$

F : Axial Pre-load to Active	P : Pitch of Thread
$\alpha$ : Helix Angle of Thread, $\text{atan}(P/\pi d_m)$	$d_m$ : Thread Diameter
$\mu$ : Friction Coefficient, Assume = 0.25	$d_c$ : Collar Diameter
	$\beta$ : 1/2 Thread Angle
	T : Tightening Torque

표 2에서 해석을 위한 볼트 축력 및 내부 압력 조건을 확인할 수 있다. 해석결과 누설이 일어나는 금속 씰 부분의 X방향 벌어짐 양은 볼트 16개 Type에서 약 35 $\mu\text{m}$ 이며 20개 Type에서 약 23.5 $\mu\text{m}$ 로서, 20개 Type의 경우 변위량이 16개인 경우보다 33% 감소하는 것을 확인할 수 있다 (그림 11 참조).

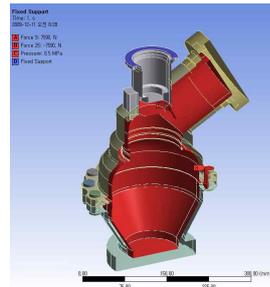
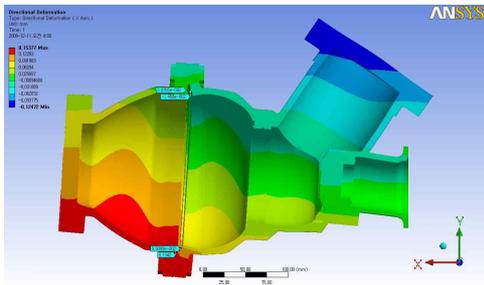


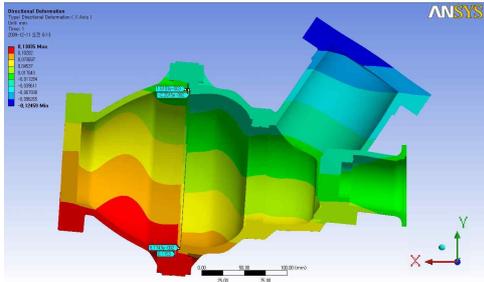
그림 10. MOV EM 중간플랜지 해석조건

표 2. Load Data

Object	Value	Unit
볼트 축력	15180	N
내부 압력	10.5	MPa



<볼트 16개 Type>



<볼트 20개 Type>

그림 11. MOV EM 중간플랜지 변위

### 3.2 시험시제품 제작 및 조립

개발된 중간플랜지의 기밀여부를 확인하기 위하여 그림 12와 같은 형상으로 시험시제를 설계/제작 하였다. 주요 관심부인 금속 씬 Groove를 고려, 단순화하여 설계하였고, 금속 씬은 기존 시제와 동일한 치수를 적용하여 제작되었다. 플랜지 형상 변경에 따른 무게 증감 내용은 표 3과 같다.

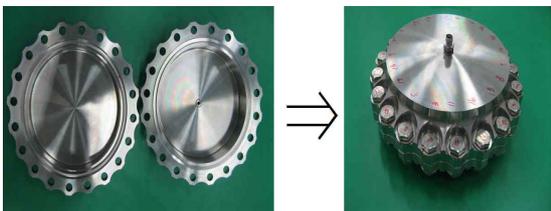


그림 12. 중간플랜지 시험시제

표 3. 형상변경 요소

구분	형상	볼트	증감무게
기존형상	Perpendicular	16개	0Kg
변경형상	Taper	20개	+0.926Kg (플랜지:+0.634Kg, 볼트 및 너트:+0.292Kg)

### 4.3 인증시험 수행

#### ○ 상온기밀시험

- 사용기체 : 질소가스
- 가압조건 : 10.6MPa
- 허용누설량 : 누설없음
- 공압부에 10.6MPa까지 가압하여 3분간 대기한 결과 누설 없음을 확인하였다.

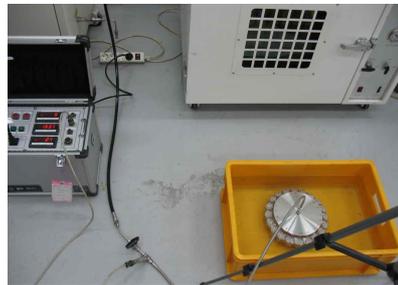


그림 13. 중간플랜지 상온기밀시험

#### ○ 극저온기밀시험

- 시험온도 : 극저온(-196℃, 액화질소 사용)
- 사용기체 : 헬륨가스
- 가압조건 : 10.6MPa
- 허용누설량 : 누설없음
- 시제가 액화질소에 들어가 있기 때문에 누설이 발생되어도 육안확인이 불가능하므로 압력 센서를 입구 Port에 연결하여 압력 데이터를 기록한다. MOV EM 요소기술 시험절차서에 따라 [5], 시제를 극저온시험용 챔버 내에서 MEOP의 1.05배인 10.7MPa까지

가압하여 약 45분간 대기하여 누설이 없음을 확인하였다.



그림 14. 중간플랜지 극저온 시험

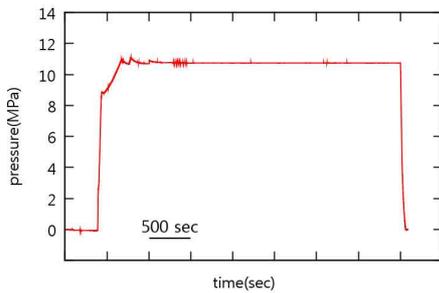
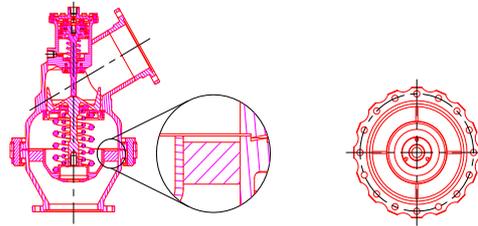


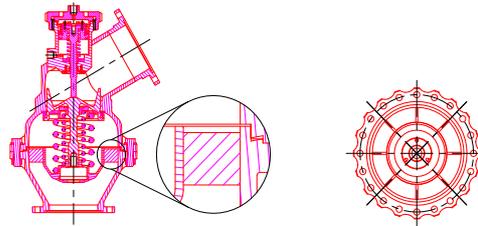
그림 15. 중간플랜지 극저온시험 압력선도

## 5. 밸브 입구부(Inlet Body)

본 과제에서 진행한 밸브 입구부의 요소기술 개발 내용은 기존 시제에서 발생되었던 진동시험의 Crack 원인 파악 및 문제해결을 위한 구조보강에 중점을 두었다. 그림 16은 기존 설계와의 비교이다. 기존 입구부의 지지대(Support Edge)는 30×20×6mm 크기로 4개가 조립되었으며, 그림 17과 같이 진동시험에서 용접부 Crack이 발생되었다. 이에 따라서 지지대의 조립부 취약점을 발견하고 구조보강을 위하여 그림 16의 형상과 같이 30×25×6mm 크기로 형상이 변경되었고 8개 조립하는 것으로 구조적인 강도를 높였다.



<Support Edge 4EA Type>



<Support Edge 8EA Type>

그림 16. MOV EM 중간플랜지 형상변경

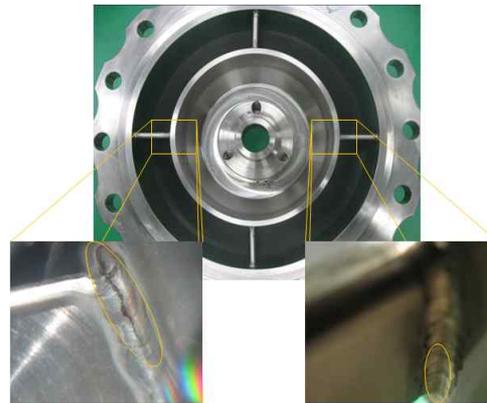


그림 17. MOV EM 진동시험 후 Crack 발생

### 5.1 입구부 구조해석

본 구조해석은 진동시험에 의해 파손이 발생한 밸브 입구부 지지대의 형상에 따른 응력 값을 산출하여 최적의 지지대 개수와 형상을 찾는 데 목적이 있으며 Random vibration 해석을 통하여 산출된 응력분포를 비교하였다. 밸브 입구부를 지지하는 지지대의 개수를 변화시킨 모델과 지지대의 두께를 변화시킨 모델로 총 4가지의 모델을

갖고 지지대의 개수와 두께 변화에 따른 응력 변화를 산출하였다. 본 해석 모델은 지지대 조립부분 용접을 묘사하지는 않았으며 지지대와 포핏, 입구부는 하나의 몸체로 가정하였다. 표 4에서 해석을 수행한 지지대 형상 변경 내용을 확인할 수 있다.

표 4. 지지대 모델 구성

구분	지지대 개수	지지대 두께	지지대 길이
기존형상	4	6 mm	20mm
두께 증가	4	12 mm	22.7mm
개수 증가	8	6 mm	20 mm
길이 증가	8	6 mm	22.7mm

해석 모델은 단품들 간의 Contact 조건을 모두 Bonded로 설정을 하였으며 공압부와 포핏 조립체의 무게 중심을 찾고 공압부와 포핏조립체 모델 대신 각각의 단품들의 무게를 각 무게중심에 Point mass로 인가하였다. 구속조건은 입구와 출구 부분의 볼트 조립부를 Fix로 잡았다. 그림 19에서 해석 조건을 확인할 수 있다. 모든 모델은 동일한 경계조건을 적용하였다. 각각의 모델을 이용하여 Mode 해석을 수행하였으며 Mode 해석결과를 이용하여 Random vibration 해석의 Load로 입력되었다.

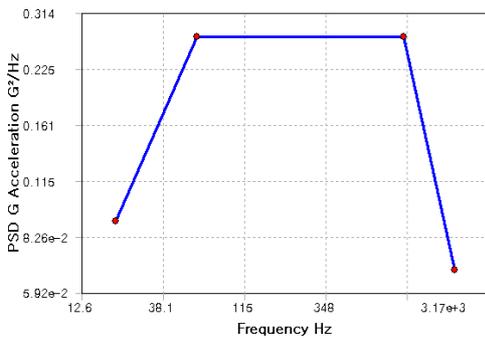


그림 18. X Direction Power Spectral Density

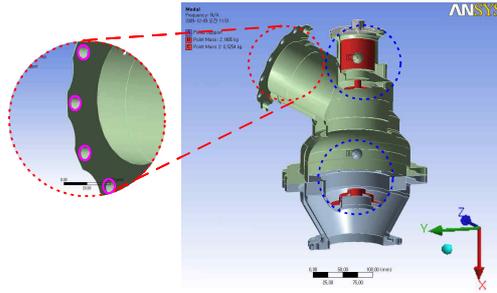
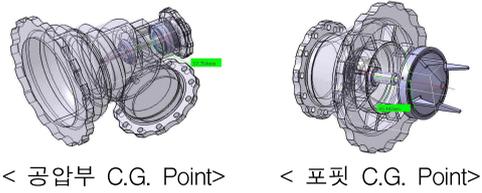


그림 19. MOV EM 해석조건

Random vibration 해석은 위에서 언급한 것 과 같이 Modal 해석 결과 값과 가진할 수 있는 Power Spectral Density(이하 PSD)를 이용하여 해석을 진행하였으며 PSD는 표 5에 자세한 값을 나타내고 있다. 진동시험 시에 가장 응력을 크게 받는 X방향의 Random vibration 해석을 진행하였다.

표 5. Power Spectral Density G Acceleration

Frequency (Hz)	PSD G Acceleration (G <sup>2</sup> /Hz)
20	9.1E-2
60	0.273
1000	
2000	6.8E-2

Random vibration 해석결과 응력 분포는 그림 20과 같은 분포를 보이며 위의 응력분포는 1 Sigma일 때의 결과이다. 1 sigma일 때의 기존형상에 지지대 개수가 4개에서 8개로 증가하면 용접부에 걸리는 힘이 40%정도 작아지는 것으로 나타나며 지지대의 길이를 20mm에서 22.7mm로 약 10% 증가시키면 응력은 79.6 MPa에서 57.5 MPa로 약 28% 줄어드는 것으로 나타난다. 이는 기존의 형상보다 지지대의 길이를 증가시켰을 때

대략 1.8배의 안전성을 확보할 수 있는 것이다. 위의 해석결과를 종합해 볼 때 지지대의 두께를 증가시키는 것보다 지지대의 개수를 늘리고 지지대의 길이를 증가시키는 방향의 설계변경이 가장 효율적이라고 판단되었다.

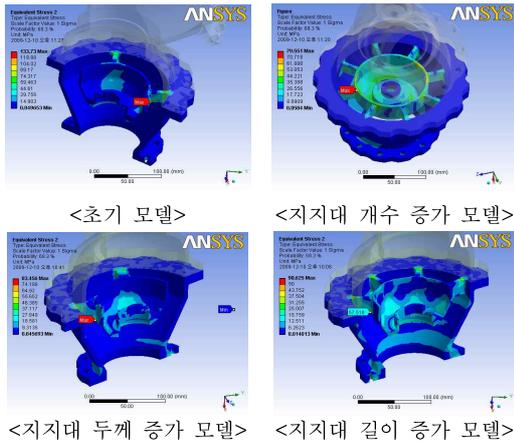


그림 20. Random Vibration 응력분포

### 5.2 입구부 시험시제 제작

설계된 시제로 진동시험을 진행하기 위하여 그림 21과 같은 형상으로 시험시제를 제작하였다.



그림 21. 입구부 시험시제

### 5.3 인증시험 수행

설계된 내용과 같이 지지대를 추가적으로 용접하여 조립하고 기존에 시험하였던 그 외의 시제를 이용하여 조립한 후 MIL-STD-1540C에 따

라 진동/충격시험을 진행하였으며 (그림 22 참조), 진동시험 결과는 표 6에 정리하였다.

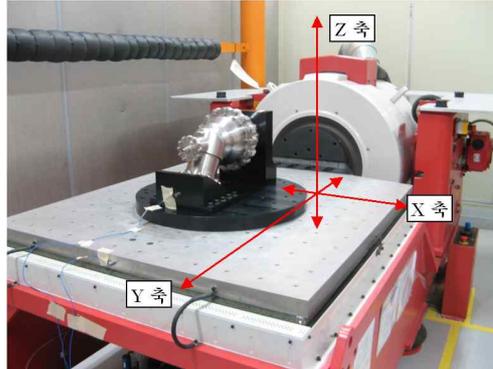


그림 22. 진동시험 축별 표기

표 6. 진동시험 결과 및 특이사항

시험순서	구분	시험결과/특이사항
Z축	정현 진동	특이사항 없음
	랜덤 진동	특이사항 없음
	충격	특이사항 없음
X축	정현 진동	특이사항 없음
	랜덤 진동	일부구간에서 마찰음 발생
	충격	Slip Table 충격시험범위 초과
Y축	정현 진동	특이사항 없음
	랜덤 진동	일부구간에서 마찰음 발생
	충격	Slip Table 충격시험범위 초과

### 5.4 환경시험 후 검증시험

- 작동시험 : 20회 동작
- 작동간 대기 시간 : 30 sec
- 결과 : 20회 정상작동(작동 중 미작동 및 끼임 현상 없음)
- 비파괴 검사 : 성능시험 후 밸브를 분해하여 ASTM E 1417에 따른 형광침투탐상법으로 입구부 조립체의 비파괴검사를 실시, 용접부 크랙현상 없음 확인.

## 6. 결 론

MOV EM(Engineering Model)의 추가적인 성능 향상을 위해 주요 핵심 부분인, 공압부, 플랜지 및 밸브 입구 립 구조의 설계를 보강 개선하였으며, 성능 확인 시험을 위해 시험 시제를 제작하여 관련 성능시험을 수행하였다. 실제 운영 환경과 유사한 극저온/고압 환경으로 극저온/상온 기밀시험 및 진동시험 등을 통해 개선된 성능을 검증하였다. 공압부의 형상개량으로 부품수를 현저히 줄였으며, 중간 플랜지부 기밀성능 향상에 대한 연구를 통하여, 누설 원인 및 기밀요소를 파악하여 해당기술을 습득하였다. 또한 입구부 구조보강을 연구하여 요구 진동규격을 만족하도록 설계를 개선하였다.

한편 설계 개선의 결과로써, 산화제 개폐밸브의 무게가 기존에 비해 대략 7.6% 증가하는 단점이 발생하였는데, 극저온용 고강도 소재에 대한 탐색과 함께 보다 최적화된 설계를 통해 성능 및 무게 면에서 설계 요구 규격을 동시에 만족시킬 수 있도록 개발을 추진해 나갈 계획이다.

## 참 고 문 헌

1. 홍문근, Design of a main oxidizer shut-off valve, KARI-LVFD-TM-2007-008, 2007.
2. 전재형 외, "산화제 개폐밸브의 힘평형에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제37권, 제8호, 2009, pp.812~818
3. 홍문근, 이수용, "Study on the force balance of a cryogenic poppet valve", The 7th JSME-KSME Thermal and Fluids engineering conference, 2008
4. Anon. 극저온 산화제 개폐밸브 개발보고서, (주)한화, 2008
5. Anon. 극저온 산화제 개폐밸브(MOV EM) 개발 및 인증시험 보고서, (주)한화, 2009
6. 홍문근, Cv for MOV EM design, KARI-LVFD

-TM-2008-003, 2008

7. 홍문근, "Study on the improvement in Cv of a main oxidizer shut-off valve", 항공우주기술 제8권 제2호, 2009. pp.140~148
8. 홍문근, "유동해석을 이용한 발사체용 산화제 개폐밸브 유량계수 향상에 관한 연구", 2008 ATES CFD/CAE Conference, 2008