

CC 산화제 개폐밸브 유량계수 향상에 관한 연구

홍문근*

Study on the improvement in C_v of a Main Oxidizer shut-off Valve

Moongeun Hong*

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, in the steady operational state, the MOV should secure a constant flow rate of liquid oxygen for combustion instability in the combustion chamber. Concerning the development of MOV, TM(Technology Model) has been manufactured and normal operations of the valve have been verified. However, the C_v of TM has been proved to be too low as compared with a design specification value. Therefore, CFD analysis have been performed by modification of the configurations of TM in order to increase sufficiently C_v of EM(Engineering Model), which is the following model of TM. The modifications of TM configurations such as partial scale-up of valve, increase of stroke length, and outlet angle of 120° would result in a considerable augmentation of C_v . It has been verified by flow capacity tests that the improved C_v of EM is min. 212, which is higher than C_v of TM, 161 by about 32%.

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. CC 산화제 개폐밸브 개발과 관련하여, TM(Technology Model)의 극저온 산화제 개폐밸브를 제작하여, 밸브의 정상적인 작동성능을 이미 확인한 바 있다. 반면 TM의 유량계수, C_v 가 설계기준 값보다 상당히 작았기 때문에, 차기 개발 단계인 CC 산화제 개폐밸브 EM(Engineering Model)의 설계/제작을 통해 충분히 개선된 C_v 특성을 확보하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석 결과, 밸브 출구 각도를 120° 로 변경하고, 밸브의 부분적인 크기 증가와 스트로크 길이를 증가시킴으로써 EM의 C_v 를 상당히 향상시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 유량시험을 통해 측정된 EM의 개선된 C_v 는 최소 212로써, 기존 TM의 C_v 값인 161보다 32%가량 증가된 것을 확인하였다.

키워드 : 산화제 개폐밸브(Main oxidizer valve), 유량계수(Flow capacity), 전산유동해석(CFD analysis), 압력손실계수(Pressure loss coefficient), 압력손실(Pressure loss)

접수일(2009년 8월 4일), 수정일(1차 : 2009년 9월 28일, 2차 : 2009년 10월 22일, 게재 확정일 : 2009년 11월 1일)

* 발사체미래기술팀/conquet@kari.re.kr

1. 서 론

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. CC 산화제 개폐밸브 개발과 관련하여, 이미 극저온 산화제 개폐밸브(MOV, Main Oxidizer shut-off Valve)의 1차 시제품, 즉 TM(Technology Model)이 개발되어 일차적으로 작동성능을 확인하였다 [1].

밸브 설계의 최적화를 위해서는 작동성 뿐만 아니라, 다음의 주요 설계 요소에 대한 면밀한 검토가 요구된다 [2]: a) Pressure drop and flow capacity, b) Leakage, c) Response time, d) Actuation forces, e) Weight, f) Envelope, g) Valve life. 상온 기밀뿐만 아니라 극저온에서의 기밀 성능, 밸브 작동 시간, 힘평형, 무게 및 크기 등 모두 면밀한 설계가 필요한 설계 요소들이지만, 가장 기본이 되는 설계 요소 하나는 밸브 유량특성 및 압력 손실이라고 말할 수 있다. 아무리 다른 설계 요소들이 완벽하더라도, 해당 압력 강하 조건에서 설계 유량을 맞추지 못하는 밸브라면 아무 소용이 없는 것이다.

한편 TM의 경우, 불행히도 주요 설계 요구 중에 가장 기본이라고 볼 수 있는 유량/차압 (Pressure drop and flow capacity) 조건을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 설계 요구에 부합하는 유량/압력강하 특성을 나타낼 수 있는 MOV EM(Engineering Model)의 설계 및 제작을 위해서 관련 해석을 수행하기로 한다. 압력 손실을 예측하기 위해 상용 CFD 프로그램인 Fluent를 사용하며 유동해석을 수행하기로 하고, 밸브 크기(dimension), 밸브 출구 각도, 스트록(stroke) 길이 등 TM의 주요 형상을 수정함으로써 설계 유량/차압 조건을 만족할 수 있는 최종 EM의 형상을 결정하고자 한다.

본 연구의 2장에서 TM 밸브의 유량/압력강하 특성을 정리하고, 3장에서는 목표로 하는 C_v 특

성을 가질 수 있는 EM 형상 도출을 위한 유동 해석 내용을 소개하기로 한다. 마지막으로, 4장에서는 3장의 해석 결과를 바탕으로 수정된 최초 EM에 대한 추가 해석 및 해석 결과를 바탕으로 최종 제작된 EM의 C_v 예측과 유량시험 결과를 소개하기로 한다.

2. MOV TM

유공압시스템 구성품의 전/후단 연결 배관 사이징이 같을 경우 C_v 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3].

$$Q = C_v \times \sqrt{\frac{\Delta p}{G}} = \sqrt{\frac{2}{\rho_w K}} \times A_2 \times \sqrt{\frac{\Delta p}{G}}$$

따라서 주어진 Δp 값에서 부피유량 Q 을 증가시키기 위해서는 C_v 값이 커야한다. 한편 $C_v \sim A_2 \times K^{-0.5}$ ($C_v = \sqrt{2/\rho_w K} \times A_2$)이므로, C_v 는 밸브와 연결된 배관지름 d 가 커질수록, 그리고 밸브의 압력손실계수 K 가 작을수록 커지며, 일반적으로 K 는 밸브가 개방될수록 급격하게 작아진다. 위 식의 유도는 밸브 전/후단의 배관지름이 같은 경우이며 $\Delta p (= 1/2\rho u^2 \times K)$ 의 속도 u 가 밸브 바로 전단에서의 유속을 의미하지만, 실제적으로 밸브 내부에서의 속도가 압력손실과 관련되기 때문에 밸브 내부 유로면적이 커져 밸브 유속을 낮추게 되면 결과적으로 압력손실이 작아진다고 볼 수 있다. 한 예로 밸브 내부 유로면적을 늘리게 되면, 같은 배관 사이즈의 경우 압력손실 계산에 필요한 u 는 동일하나(같은 유량일 경우), 상대적으로 Δp 가 작아지므로 결과적으로 밸브의 K 가 작아지게 된다고 해석할 수 있다.

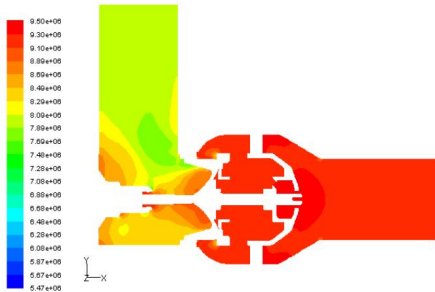
TM의 C_v 예측을 위해 그림 1에서와 같이 상용 CFD 프로그램인 Fluent를 사용하여 밸브 내부의 유동을 해석하였다. 해석 결과, 173kg/s 기준으로 TM의 압력 손실이 12.2bar로써 이에 해당하는 C_v 는 166로 나타났다. 한편 실제 제작된 MOV TM의 유량계수 측정 시험을 수행하였으며, 그림 2에서

측정된 밸브 전/후단의 압력차 및 해당 유량을 확인할 수 있다. 시험을 통해 얻은 C_v 는 161으로써, CFD 예측값과 대략 3%의 오차를 보였다.

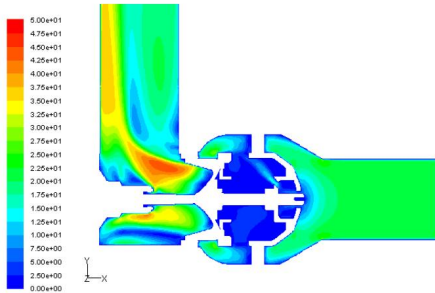
3. CFD 해석

3.1 밸브 스케일 수정

$C_v \sim d^2 \times K^{-0.5}$ 이므로, 밸브의 전체적인 크기가 커지고 유로 면적이 증가되면, 자연스럽게 C_v 도 증가된다. 이에 목표 C_v 를 만족할 수 있는 대략적인 밸브 크기를 확인하기 위해 TM의 단순한 크기 증가에 따른 C_v 변화에 대해 알아보도록 한다. 173kg/s의 유량을 유지하면서 설계요구조건인 5.6bar의 압력손실이 가능한 크기는 CFD 해석 결과, TM 크기의 대략 1.2배에 해당되는 것으로 나타났다. 밸브 및 밸브 입/출구와 연결된 배관 모두 1.2배 증가시킨 경우(Scale analysis Type I)와 배관은 그대로 둔 채 밸브만 1.2배 증가시킨 경우(Scale analysis Type II)에 대해서 해석을 수행했으며, 해석결과 Type I과 Type II의 173kg/s 유량 조건에서의 압력손실이 각각 5.8bar와 6.5bar로 나타났다.



(a) Pressure



(b) Velocity

그림 1. Pressure and velocity contours inside of the MOV TM.

3.2 밸브 출구 각도 수정

MOV TM에서 단순히 크기를 증가시켜 C_v 를 높이는 것은 물론 가능하나, 단순한 스케일 증가는 밸브의 무게와 사이즈 또한 상당히 증가하기 때문에 무게 및 사이즈에 제한되는 설계요구조건을 만족시키지 못할 위험성이 높아지게 된다. 이에 TM의 크기는 그대로 유지한 채, 밸브 내부의 부분적인 형상 수정을 통해 C_v 를 향상시킬 수 있는 형상 변수를 찾아보기로 한다. 우선 밸브 유로목(throat)과 밸브 출구 사이에서 발생할 수 있는 압력손실을 줄이 위해 밸브 출구 각도를 변경해 보기로 한다.

Type I은 제작성을 고려하여 밸브 유로목(throat) 이후 직각으로 꺾이는 밸브 아래 부분은 이전과 같이 유지한 것이고, Type II는 이러한 직각 부분을 제거하여 압력 손실을 줄이고자 한 것이다. 밸브 출구 각도는 각 Type에 대해서 15°, 30°, 45°의 경우에 대해 해석을 수행하였다. 그림 3에서 각 각도별 Type II의 해석 모델을 확인할 수 있다.

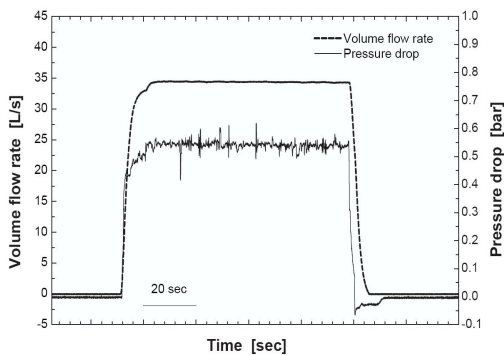


그림 2. Measured volume flow rate and pressure loss of the MOV TM.

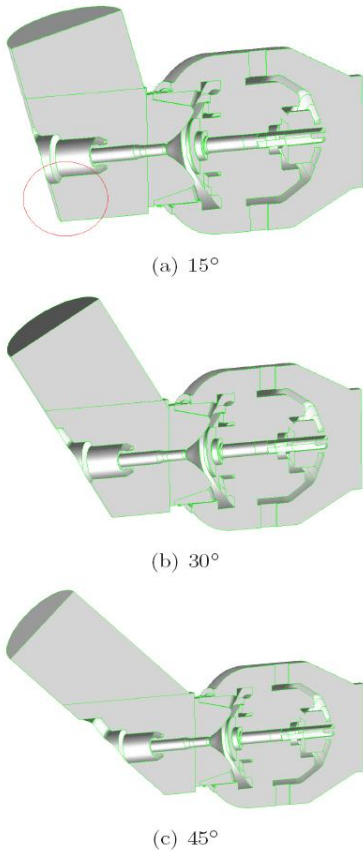


그림 3. Flow volumes of Type II according to outlet angles.

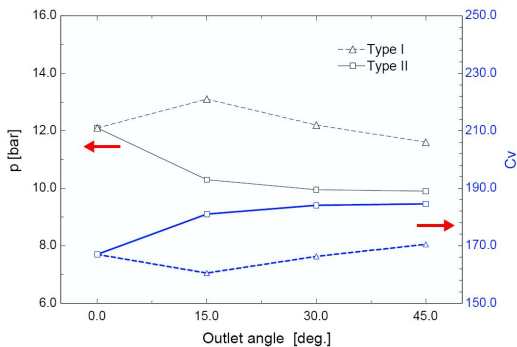


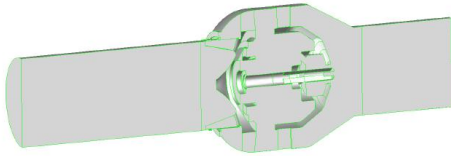
그림 4. Pressure drop and C_v according to outlet angles.

해석 결과는 그림 4에 정리하였다. 그림4에서 확인할 수 있듯이 출구 각도가 꺾이더라도 직각으로 꺾이는 부분이 있는 Type I의 경우 C_v 오히려 감소하거나 크게 향상되지 않았고, Type II의 경우 출구 각도를 변경함으로써 대략 2bar 정도의 압력손실이 줄어드는 것으로 나타났다.

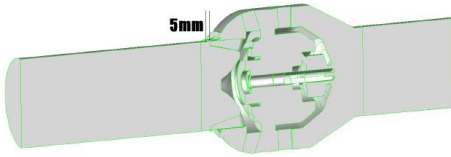
3.3 스트로크 길이 수정

그림 4에서 확인할 수 있듯이 밸브 출구 각도를 45°로 꺾어도 압력 손실이 여전히 10bar가량의 높은 값을 유지하고 있다. 이에 밸브 스트로크(stroke) 길이 변화에 따른 C_v 값 변화 경향을 파악하기 위해 출구 각도를 90° 더 꺾은, 즉 스트레이트(straight) 직관 타입의 밸브 모델을 이용하여 유동해석을 수행하기로 한다. 기본 모델은 기존 TM에서 출구 각도를 90° 더 꺾은 것이며, 이 기본 모델로 부터 우선 스트로크 길이만 각각 5mm, 10mm 증가시킨 모델에 대해서 유동해석을 수행하였다. 또한 균형적인 밸브 형상 및 밸브 내 유로를 고려하여 스트로크 길이 증가에 따라 밸브의 전체 사이즈(특히 밸브 내부 반지름)도 각각 4mm와 8mm 증가시킨 모델에 대해서도 유동해석을 수행하였다. 우선 그림 5에서 유동해석에 적용된 모델들을 확인할 수 있다.

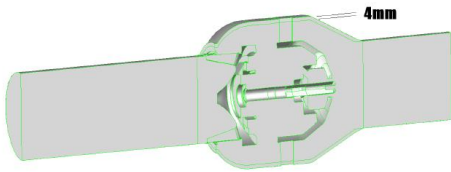
유동해석 결과는 그림 6에서 확인할 수 있다. 특이할 점은 밸브 유로가 꺾임이 없는 스트레이트(straight) 직관 타입임도 불구하고, 기존 TM 사이즈로는 압력 손실이 7bar 가까이 높다는 것이다. 한편 기본 모델에서 스트로크 증가에 따라 압력손실이 상당량 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 스트로크를 5mm 증가시킨 경우, 스케일 증가(4mm 증가) 효과가 스트로크를 10mm 증가한 경우에 비해 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 스트로크가 일정 수준 이상으로 커지게 되면 스케일 증가에 의해 얻어지는 유로 면적 확장 효과가 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Original stroke length: 23.5mm, no scale up



(b) Stroke length: 28.5mm, no scale up



(c) Stroke length: 28.5mm, scale up: 4mm

그림 5. Flow volumes for the analysis on the effect of the stroke lengths as well as the scale-up.

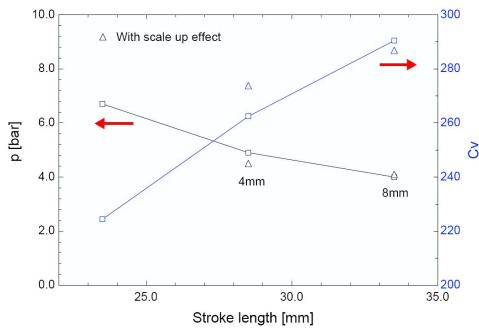


그림 6. Pressure drop and C_v according to stroke lengths (outlet angle: 180°).

3.4 수정 내용 정리

MOV EM의 C_v 를 향상시키기 위해 기존 TM에서 전체 사이즈 증가, 출구 각도 수정, 밸브 스트로크

증가, 그리고 밸브의 부분적인 크기가 증가된 여러 모델들에 대한 유동해석을 수행하였으며, 해석 결과를 바탕으로, 그리고 기존 TM에서 최소한의 크기 증가라는 점을 고려하여 실제 밸브 모델을 선정하여 유동해석을 추가로 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 EM의 C_v 를 향상시키기 위해 MOV TM 형상에서 다음과 같이 수정하도록 한다.

- ① Outlet 유로방향을 120° 로 변경
- ② Stroke 길이를 5mm 증가
- ③ MOV throat 지름은 10mm 증가
- ④ MOV throat 지름의 증가로 poppet assembly 사이즈도 지름 10mm 증가
- ⑤ MOV 내 유로 외경을 22.5mm 증가
- ⑥ MOV 길이방향으로 대략 20mm 증가

이와 같은 밸브 형상 수정을 통해 MOV로 인한 압력손실을 다음과 같이 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

- ①, ④, ⑤, ⑥: 2.5~3bar 압력손실 제거
- ②, ③: 3~4bar 압력손실 제거
- 예상압력손실: 12.2bar(MOV TM) → 6bar 수준(MOV EM)

4. MOV EM

4.1 1차 모델

3장 해석 결과에 따른 TM에서 수정된 최초 MOV EM의 내부 형상은 그림 7과 같다. 우선 밸브 출구 각도를 기존 90° 에서 30° 더 늘린, 120° 로 수정하였으며, 스트로크 길이는 5mm를 증가시켜 28.5mm로 변경하였다. 밸브 throat 지름은 기존 95.6mm에서 105.6mm로, 포펫 어셈블리 지름도 기존 109.4mm에서 119.4mm로, 유로면적 확보를 위해 MOV 하우징의 안쪽 지름을 153mm에서 175.5mm로, 유로방향 길이는 148.6mm에서 178.1mm로 변경하였다.

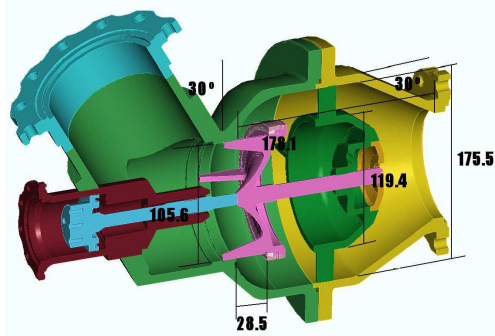


그림 7. 1st proposed MOV EM.

4.2 모델 수정

최초 모델(original model)에서 밸브 throat 통과 후 공압부 위치 변경을 통해 밸브 내부 유로를 확장하고, 동시에 밸브 내부 유체 속도를 낮춤으로써 얻을 수 있는 압력손실 감소 경향에 대한 해석은 모델 Version 1, 2, 3에서 수행하였으며, Version 4, 5는 보다 적극적인 개선 방안으로 포펫 주위 및 밸브 입구의 유로 프로파일을 변경하여 압력 손실을 낮추고자 노력하였다.

Version 1, 2, 3과 달리 밸브 내 유로 변경이 적용된 Version 4의 경우 Version 3에서의 유동 박리와 밸브 입구의 경계층 두께를 줄이기 위해 포펫의 앞쪽 부분의 프로파일과 밸브 입구에서의 프로파일을 변경한 것으로써, 구체적인 포펫과 밸브 입구 벽 부분의 변경된 프로파일은 그림 8에서 확인할 수 있으며, 그림 9에 프로파일 변경에 따른 밸브 내부의 유동 변화를 나타내었다. 한편 Version 5는 Version 4에서 추가적으로 압력손실을 줄이기 위해 공압부 위치를 Version 2와 같이 총 20mm 뒤쪽으로 이동시킨 것이다. 그림 9에서 포펫 프로파일 변경에 따른, Version 3과 비교한 유동 변화를 확인할 수 있다. 해석결과를 통해 포펫 주위에서의 박리 현상과 밸브 입구의 경계층 두께가 상당부분 감소한 것으로 나타났다. 결론적으로 프로파일 변경과 공압부 이동을 통해 각각 대략 0.5bar의 압력손실을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

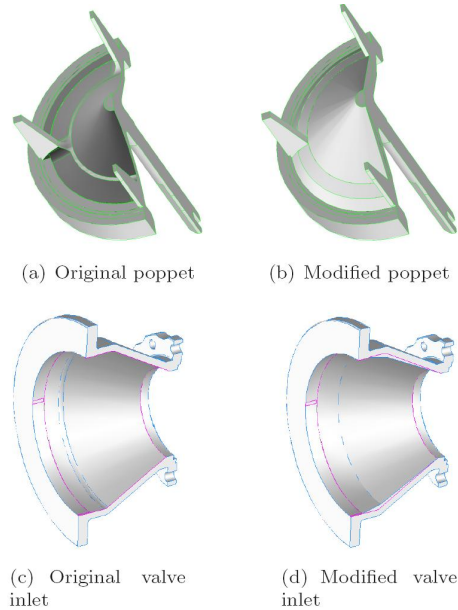
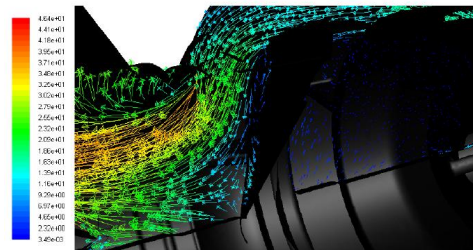
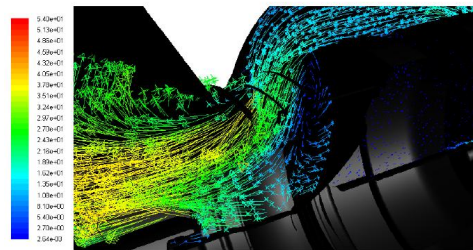


그림 8. Modified geometry of the poppet and the valve inlet of Version 4.



(a) Version 5



(b) Version 3

그림 9. Velocity vectors inside of Version 3 and Version 5 of MOV EM.

표 1. C_v evaluations of MOV EM candidates
(Mass flow rate: 173kg/s, Outlet pressure: 8MPa).

Model	$p_{1\min}$ [MPa]	Δp [bar]	C_v
TM	9.22	12.2	166
exp.	-	0.59	161
EM original	8.74	7.43	213
Version 1	8.68	6.84	222
Version 2	8.67	6.71	224
Version 3	8.74	7.35	214
Version 4	8.68	6.76	223
Version 5	8.63	6.26	232

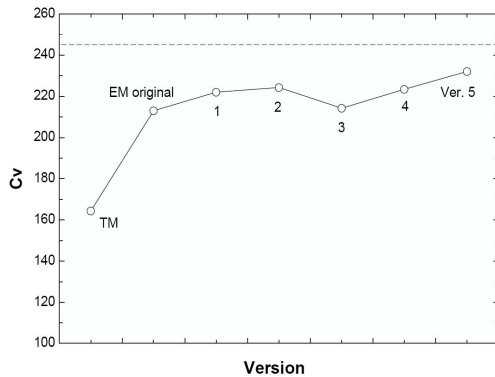


그림 10. C_v evolutions for each Versions of MOV EM.

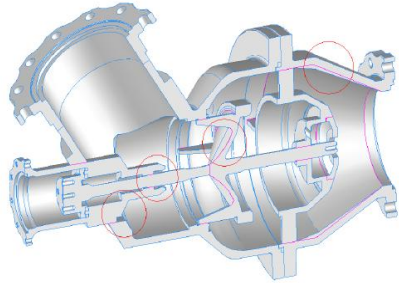
결론적으로 최종 EM의 밸브 내부 유로 형상은 Version 5에 준하여 변경하였다. 표 1과 그림 10에서 각 version에 따른 C_v 변화를 확인할 수 있다. 한편 Version 5가 여전히 목표 C_v 대비 대략 5%가량이 부족하지만, 밸브 유로 면적 확장 등 추가적인 변경을 진행하지 않은 이유에 대해 다음의 두 가지로 설명하기로 한다: 그 첫 번째는 추가적인 유로면적 확장은 필연적으로 밸브의 크기와 무게를 증가시켜 개발규격을 벗어날 위험성이 커진다는 것이고, 두 번째 이유로는 5% 부족분에 해당하는 C_v 는 밸브 입출구 플랜지 배관

사이즈가 밸브의 passage diameter(throat diameter) 보다 작기 때문에 발생하는, 배관 설계와 연관된 추가 압력손실 분이라고 간주할 수 있기 때문이다.

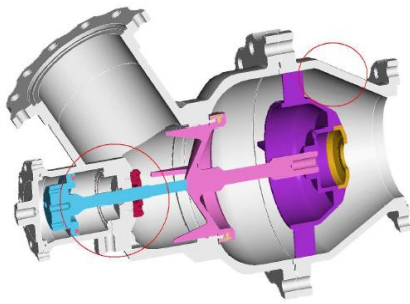
4.3 최종 EM과 C_v 측정

4.2절에서 정리한 내용과 같이 Version 5를 기본으로 하되, 밸브의 무게 및 크기뿐만 아니라 제작 가공성 등 여러 설계 요건들을 고려하여 최종적으로 제작된 MOV EM의 모습을 그림 11에서 확인할 수 있다. 실제 설계/제작 과정에서 무게와 크기 감소를 위해 공압부의 설계가 변경되었으며, 이에 따라 그림 11에서 보는 것처럼 밸브 내부 유로가 Version 5에 비해 좀 더 간섭을 받는 형태가 되었다. 한편 밸브 입구 플랜지의 프로파일 변경으로 인한 밸브 무게 증가와 배관 사이즈의 증가 가능성을 고려하여 입구 플랜지의 벽면 유로 프로파일 변경은 실제 EM 제작에서는 적용하지 않았다.

EM의 유동해석 결과 차압이 7.01bar로써 예상 C_v 는 219이다. 그림 12에서 유동해석에서 얻은 밸브 입구 압력 선도를 확인할 수 있다. 한편 유량 시험을 통해 제작된 EM의 유량계수를 측정하였다. 그림 12에서 유량시험 장비에 설치된 EM 모습과 측정된 유량 및 차압을 확인할 수 있다. 유량 시험을 위해 제작된 밸브 입/출구 연결용 배관 내부 지름이 밸브 입/출구보다 크기가 다르기 때문에 (연결배관 내경: 108.3mm, 밸브 입/출구 내경: 95.6mm), 이 부분에 의한 압력손실을 고려하여 해석한 결과, 유량 시험에서 측정될 것으로 예상되는 C_v 는 208로 계산되었다. 한편 시험 결과, 압력 측정 위치 차이에 의한 위치에너지 고려하여 측정된 C_v 는 203으로써 계산 값보다 대략 2% 가량 적게 나타났다. CFD에 의한 해석 결과와 대략적으로 2~3% 오차를 보인다고 가정할 때, 배관과 밸브의 입/출구 크기 차이에 의한 차압이 없을 경우의 EM C_v 는 최소 212 이상일 것으로 판단된다.



(a) Version 5

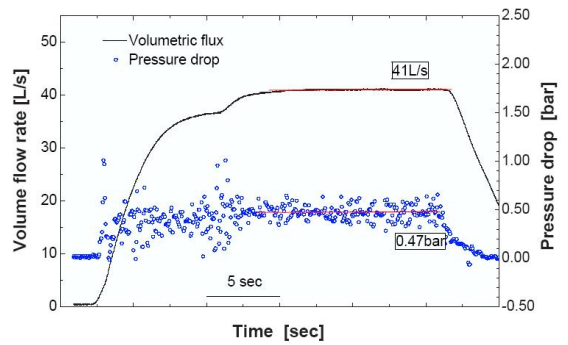


(b) Actual EM

그림 11. EM Version 5 and 3D modeling of actual EM.



(a) Experimental setup



(b) Δp & volumetric flux

그림 13. Experimental setup and measured data for the flow capacity of the actual MOV EM.

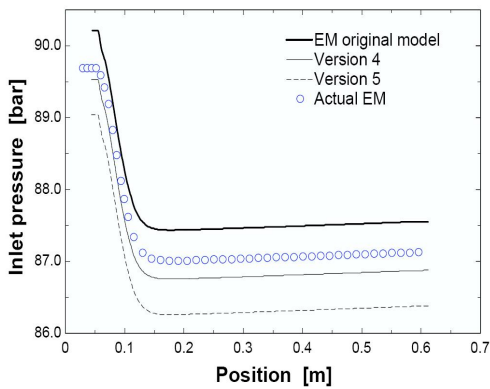


그림 12. Calculated inlet pressures of the actual MOV EM.

5. 결 론

발사체 추진시스템에서 CC 산화제 개폐밸브는 액체산소를 연소기로 공급 및 차단함으로써 연소를 개시 및 중단시킬 뿐만 아니라, 정상운영 상태에서는 연소기 내 안정된 연소가 가능하도록 일정한 유량의 액체산소를 공급한다. CC 산화제 개폐밸브 개발과 관련하여, TM을 제작하여, 밸브의 정상적인 작동성능을 이미 확인한 바 있다. 반면 TM의 낮은 유량계수, C_v 를 개선하기 위해 우선 TM의 C_v 값에 대한 유동해석 계산결과와 시험결과를 비교하여, 유동해석결과에 대한 신뢰성을 확보하였으며, C_v 특성을 향상시킬 수 있는 EM 형상 도출을 위해 매우 다양한 모델에 대한 유동해석을 수행하였다.

전체적이고 부분적인 밸브의 크기, 밸브 출구 각도, 스트록 길이 등 TM의 형상 수정에 따른 압력손실 정도를 CFD 유동해석을 통해 분석하였으며, 일차적으로 확정된 기본 모델을 바탕으로, 포켓 프로파일 변경 등 보다 면밀한 형상 변경을 통한 추가적인 해석을 통해 C_v 특성을 더욱 향상 시키고자 하였다.

해석 결과에 의해 결정된 EM 모델을 기본으로 하여, 무게 및 크기의 최적화에 따른 설계 변경이 반영된 실제 EM를 제작하여 C_v 특성을 확인하였다. 유동해석을 통해 계산된 C_v 값과 실제 유량시험을 통해 측정된 결과가 2~3%의 오차 내에서 일치하였으며 EM의 C_v 는 최소 212 이상일 것으로 판단되어진다. 이는 기존 TM의 C_v 값인 161보다 32%가량 향상된 것으로, 이후로도 유량 시험용 시제품 제작에 필요한 추가적인 개발 비용 없이, 설계요구조건에 부합하는 C_v 특성을 가지는 밸브 개발을 가능케 하는 설계 기술에 대한 신뢰성을 확보하였다.

참 고 문 헌

1. Hong, M., Design of a main oxidizer shut-off valve, KARI-LVFD-2007-008, 2007.
2. Howell, G. W. and Weathers, T. M., Aerospace fluid component designers' handbook, Vol. I, Revision D. RPL-TDR-64-25, 1970.
3. Hong, M., On the discharge coefficient, C_d , KARI-PCT-TM-2006-016, 2006.