

# 산화제 탱크 2단계 압력 설정을 위한 벤트/릴리프밸브 설계

고현석\*†

## Design of Vent Relief Valve for Bi-level Pressure Setting of Oxidizer Tank

Hyeonseok Koh\*†

### ABSTRACT

We have designed the vent relief valve to set bi-level safety pressure for oxidizer tank. The minimum cavity volume was calculated to reduce the pressure deviation, and the valve operation characteristics was analyzed by using modeling. We have a plan to manufacture the validation model based on the analysis results.

### 초 록

2단계 압력 설정이 가능하도록 산화제 탱크용 벤트/릴리프밸브를 설계하였다. 압력 편차를 줄이기 위하여 최소 캐비티 부피를 계산하였고 모델링을 활용하여 밸브 작동 특성을 해석하였다. 해석 결과를 토대로 검증을 위한 시제품을 제작할 예정이다.

Key Words: Vent Relief Valve(벤트릴리프밸브), Oxidizer Tank(산화제 탱크), Relief Mode(안전모드), Propellant Tank Vent System(추진제 탱크 벤트계)

### 1. 서 론

산화제 벤트/릴리프밸브는 벤트모드와 릴리프 모드 두 가지 방식으로 작동한다[1]. 벤트모드는 지상에서 산화제를 충전하거나 비행 시 단 간 분리 또는 단-위성 분리 후 밸브구동탱크로부터 구동압을 공급받아 임의로 밸브를 개폐하는 방식이며, 릴리프모드는 주로 비행 중 탱크 압력이 설정 압력보다 높아질 경우 릴리프밸브가 작동

하면서 자동으로 밸브를 개폐하여 탱크 내부의 압력을 적정 압력으로 유지하는 작동 방식이다 [2]. 한국형발사체 2단의 경우 엔진 연소 전 공력가열에 의한 탱크 내 극저온 산화제의 온도가 상승하는 것을 막기 위하여 1단 비행 중 산소 증기압 수준에서 탱크 압력을 낮게 유지해야 한다. 이를 위해 산화제 벤트/릴리프밸브에 저압에서 크래킹이 이루어지는 릴리프밸브를 추가로 장착하여 1단 비행 중에만 작동할 필요가 있다.

본 논문에서는 저압 릴리프모드로 작동할 경우 크래킹 기준 압력을 제공하기 위한 최소 캐비티 크기를 계산하였다. 캐비티의 기준 압력은

\* 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: hkoh@kari.re.kr

릴리프밸브 스트로크에 따른 캐비티 부피 변화, 주변 온도, 외부 누설 등의 영향을 받게 된다. 이러한 변수들의 영향을 고려하였을 때 크래킹 압력의 변화가 1 % 이하가 되는 최소 캐비티의 부피를 계산하였다. 그리고 예비 설계 결과를 바탕으로 저압 릴리프모드로 작동하는 산화제 벤트/릴리프밸브의 특성을 해석하였다.

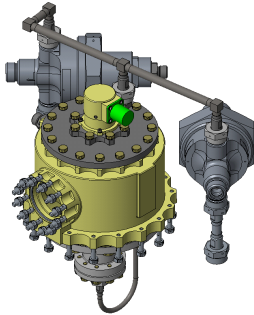


Fig. 1 Preliminary Design of Vent Relief Valve for 2nd Stage of KSLV-II

## 2. 밸브 설계

### 2.1 저압 릴리프밸브 작동 시 스트로크 영향

릴리프밸브 벨로우즈 내부 캐비티의 초기 부피,  $V_0$ 는  $6.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 이다. 릴리프모드로 작동하게 되면 벨로우즈가 압축되면서 내부 캐비티는 감소하게 된다. 형상 모델을 분석하여 계산한 캐비티의 부피 변화는 릴리프밸브 완전 개방 시  $5.22 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 이다.

릴리프모드 작동 시 최대 밸브 스트로크( $x_{\max} = 2 \text{ mm}$ )에서 부피 변화율은  $\Delta V/V_0 = -0.16$ 이며, 이에 따른 압력 변화율은  $\Delta P/P = 0.28$ 이다. 만일 릴리프모드 작동에 따른 압력 변화율( $\Delta P/P$ )이 1 % 이하가 되기 위해서는 초기 캐비티 부피가  $1.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  이상이 되어야 한다. 따라서 1.4 L 정도의 용기가 추가로 연결되어야 한다.

### 2.2 주변 온도의 영향

이상 기체의 경우 압력은 온도에 비례한다. 따라서 기준값 대비 압력 변화율  $\Delta P/P_{\text{ref}}$ 는 초기 캐비티의 부피와 상관 없이 온도 변화율  $\Delta T/T_{\text{ref}}$ 에만 의존하게 된다. 일반적으로 상온에서 크래킹 압력을 설정한 후 극저온에서 상온 이상까지의 넓은 온도 범위에서 밸브를 운용하게 되므로 주변 온도의 영향을 많이 받을 수 있다. 하지만 캐비티의 기준 압력이 낮을 경우에는 압력 변화량  $\Delta P$ 가 작게 되므로 크래킹 압력의 변화에는 큰 영향을 미치지 않는다.

### 2.3 외부 누설의 영향

기준 압력을 주변 대기압보다 낮게 설정할 경우에는 장시간 기밀을 유지해야 한다. 산화제 벤트/릴리프밸브 가스켓 부위의 기밀시험 시 외부 누설은  $1.0 \times 10^{-4} \text{ atm-cm}^3/\text{s}$  이하가 되어야 한다. 공기 누설일 경우 질량으로 환산하면  $1.2 \times 10^{-10} \text{ kg/s}$  정도이다. 만일 대기압으로 기준 캐비티를 설정한다면 지상 운용 시 누설의 영향을 고려할 필요가 없으며, 비행 중 고도가 상승하면서 대기압력이 낮아지면서 발생하는 누설만을 고려하면 된다. 이 경우 1 %의 압력 강하가 일어나기 위해서는  $1.0 \times 10^{-4} \text{ atm-cm}^3/\text{s}$  누설이 발생한다고 가정하였을 때 추가 캐비티가 없더라도 1.7 시간 이상이 지나야 한다.

캐비티의 기준 압력을 대기압 이하로 설정할 경우에는 지상 운용 시 누설도 고려해야 한다. 총조립 및 발사 운용 기간으로 최소 6 개월 이상이 소요되므로 장기간 외부 누설을 고려하여 압력을 유지하기 위한 추가 캐비티가 필요하다. 외부 누설이  $1.0 \times 10^{-4} \text{ atm-cm}^3/\text{s}$ , 기준 압력을 0.01 MPa로 설정한다고 가정하였을 때 6 개월간 1 %의 압력 강하가 일어나기 위한 추가 캐비티의 부피는  $1.6 \text{ m}^3$ 이다. 외부 누설을  $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ atm-cm}^3/\text{s}$  수준으로 엄격하게 관리할 경우에는 추가 캐비티의 양을 줄일 수 있으나 벨로우즈 부품을 사용하거나 연결부를 용접하는 등 특수한 조치가 필요하다. 그리고 장기간 진공을 유지하기 위해서는 진공 흡착제(getter)의 추가 삽입도 고려해야 한다.

### 3. 저압 릴리프모드 작동 해석

저압 릴리프모드에서 크래킹 기준 압력을 제공하기 위한 캐비티는 상온 대기 압력 상태에서 기밀이 잡히도록 플러그로 막는 것을 가정하였다. 진공 용기를 부착하는 방안은 장기간 기밀을 유지하기 위해 부가적인 장비와 특수 공정, 기밀 유지를 위한 검증이 필요한 관계로 고려하지 않았다.

산화제 벤트/릴리프밸브 저압 릴리프밸브의 경우 스프링의 초기 하중을 조절하여 크래킹 압력을 변경한다. 그리고 스프링 상수를 조절하여 시스템 요구 규격을 만족할 수 있는지를 분석하였다. 벤트밸브 게이트 조립체의 유연요소와 릴리프밸브 내부의 유연 요소인 벨로우즈의 경우는 설계 변경을 고려하지 않았다. 릴리프밸브 벨로우즈의 강성은 설계값 35.7 N/mm를 적용하고 여기에 스프링의 강성을 변수로 고려하여, 릴리프밸브 전체 강성이 변화할 경우의 작동 특성에 대하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Modeling Parameter

Case #	Cracking Pressure (MPaA)	RV Spring Force (N)	RV Stiffness (N/mm)
1	0.17	147	48
2	0.17	147	60
3	0.17	147	72
4	0.15	100	48
5	0.15	100	60
6	0.15	100	72

릴리프밸브 스프링의 초기 하중이 147 N일 경우 강성에 따라 0.23 ~ 0.24 MPaA까지 탱크 얼리지 압력이 상승하는 것으로 나타났다. 릴리프밸브 스프링의 초기 하중을 100 N으로 낮춘 Case 4 ~ Case 6의 해석 결과를 보면, 탱크 얼리지 압력은 0.23 MPaA까지 상승하는 것으로 나타났다.

스프링의 초기 하중을 낮출 경우 탱크 최대 압력은 크게 차이를 보이지 않으나, 벨로우즈 캐

비티의 최대 압력을 낮추면서 120 초 이후 구간에서 탱크 압력을 보다 낮게 유지할 수 있는 것으로 해석 결과 나타났다.

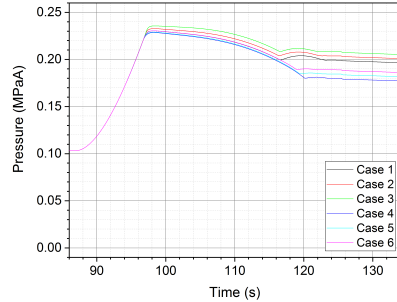


Fig. 2 Prediction of Tank Ullage Pressure for Low-Pressure Relief Mode

### 4. 결론

한국형발사체 2단 산화제 벤트/릴리프밸브 저압 릴리프모드 작동을 위한 밸브 설계를 수행하였다. 운용 환경을 고려하였을 때 시스템을 단순화하고 신뢰성을 높이는 방향으로 설계 검토를 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 밸브 작동 특성을 해석하였다. 향후 해석 결과를 토대로 도출한 설계변수를 고려하여 조만간 시제품을 제작할 예정이며, 축소형 탱크를 활용하여 검증 시험을 수행할 계획이다.

### 참고 문헌

1. 고현석, "벨로우즈 형상에 따른 산화제 벤트/릴리프밸브 릴리프모드 작동 특성 해석," 한국추진공학회 2015년도 춘계학술대회논문집, 2015, pp. 555-560
2. 고현석, 장제선, 김병훈, 한상엽, "힘평형 방정식을 활용한 산화제 벤트/릴리프밸브 릴리프모드 작동 특성 해석," 한국추진공학회 2014년도 추계학술대회논문집, 2014, pp. 764-767