

초저온/고압용 Safety Relief Valve 의 성능 및 구조적 안전성에 관한 연구 An Investigation on Performance and Structural Stability of Cryogenic/High Pressure Safety Relief Valve

*김성진¹, 이현우¹, #김철², 조해용³

*S. J. kim¹, H. W. Lee¹, S. Y. Jung², #C. Kim², H. Y. Cho³

¹ 부산대학교 창의공학시스템 협동과정, ² 부산대학교 기계기술연구원, ³ 충북대학교 기계공학부

Key words : Safety Relief Valve, FEM, Valve Lift, Impact Load

1. 서론

현재 국내 조선산업은 세계 시장 점유율 1 위의 세계적 위상에도 불구하고 LNG 선, LPG 선, 해양구조물 등의 고부가가치 선박에 탑재되는 조선기자재의 국산화율은 극히 저조하여 대부분을 유럽, 일본 등지에서 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 고부가가치선박 중의 하나인 LNG 및 LNG-FPSO 선에 대량으로 장착되는 초저온 고압용 밸브를 국산화 개발한다면 밸브 시장에서도 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만, 국내의 경우 LNG 선박 또는 여러 산업분야에서 사용되는 초저온, 고압 밸브와 관련하여 글로브 밸브, 버터플라이 밸브, 볼 밸브 등의 On-Off 밸브 및 유량제어밸브에 관한 연구는 다수 진행된바 있으나 압력제어밸브의 한 종류인 Safety Relief Valve 에 관한 국내연구는 미흡한 실정이다.^[1]

LNG 선박용 Safety Relief Valve 는 고부가가치 밸브로서 초저온, 고압상태의 LNG(액화천연가스) 저장탱크 및 배관과 연결되어 있어서 시스템의 압력이 설정압력 이상이 되었을 때 내부 유체를 방출하여 일정한 압력을 유지시켜주는 중요한 기능을 한다. 작동환경이 초저온, 고압이므로 내압과 열하중에 대한 충분한 구조적 안정성을 가져야 하며, 민감한 스프링 설계를 통해 내부압력 변동에 신속히 동작할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 고압 환경하에서 Safety Relief Valve 를 유한요소해석 상용프로그램인 ANSYS/LS-DYNA 를 이용해 충돌해석을 수행하여 초저온 / 고압환경에서의 밸브가 열릴 때 발생하는 충격하중에 의한 구조적 안정성을 평가하는 것에 목적이 있다.

2. Disc, Guide, Holder 의 충돌해석

Fig. 1(a)는 밸브 어셈블리 형상을 나타낸다. 밸브가 개방될 경우 Holder 와 Guide 가 직접적인 충돌이 일어남을 확인할 수 있다. 또한 밸브가 개방될 때 스프링 하중과 Disc 하부의 유체에 의한 하중으로 인해 실제 가속도를 갖는 부품은 Disc 와 Holder 를 포함하여 Stem, Bottom Seat 총 4 가지 부품이지만 Stem 과 Bottom Seat 는 충돌해석 시 구조적 취약부위가 아니기 때문에 Fig. 1(b)처럼 충돌해석 모델에서는 제외 시켰다. 충돌해석 모델은 Holder 와 Guide 가 충돌하는 순간으로 결정하였다.

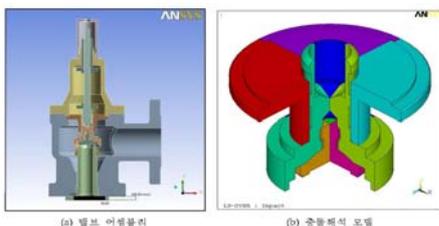


Fig. 1 밸브 어셈블리 및 충돌해석 모델

밸브가 개방되어 충돌이 일어날 때까지의 시간은 매우 짧기 때문에 실험적으로 충돌속도를 계산하기가 쉽지 않다.

따라서 Newton 제 2 법칙을 이용하여 스프링 하중과 Disc 하부에 작용하는 유체에 의한 하중을 이용하여 Disc 와 Holder 의 가속도를 계산하였으며, 가속도 결과를 이용하여 시간 변화에 따른 속도 및 변위를 계산하였다. 이때 충돌 해석 모델에서 생략된 Stem 과 Bottom Seat 의 질량을 고려하여 가속도를 계산하였다.

충돌 가속도를 계산하기 위한 식은 아래와 같다

$$\sum F = F_{fluid} - k(y_{initial} + y) = ma = m \frac{dV}{dt} \quad (\text{where } F_{fluid} = \frac{\pi}{4} \times d_2^2 \times p_{rest})$$

Fig. 2 는 Disc 와 Holder 가 Guide 에 충돌할 때까지 즉, 밸브가 최대 양정으로 개방되었을 때까지의 Disc, Guide, Stem, Bottom Seat 의 가속도, 속도, 변위를 나타낸다. 가속도, 속도, 변위 계산 시 시간증분은 0.00001s 를 적용하였다. 유한요소해석시 충돌속도는 Fig. 2(c)의 시간-변위 그래프에서 변위가 최대양정(9.5mm)에 도달했을 때의 시간을 Fig. 2(b)의 시간-속도 그래프에 적용하여 구한 값인 6.536m/s 를 적용하였다.

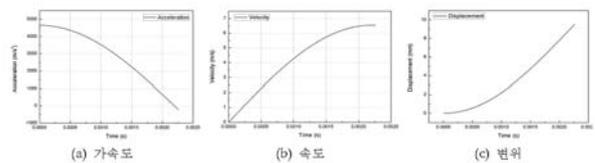


Fig. 2 충돌 가속도, 속도, 변위

Disc, Holder, Guide 의 소재 물성은 상온에서의 SUS316 탄성계수, 포아송비를 적용하였으며 밀도의 경우 Guide 는 SUS316 의 밀도 7850kg/m³ 을 적용하였고 Disc, Holder 는 8000kg/m³ 을 사용하였다. 충돌해석 모델에서는 Stem 과 Bottom Seat 가 생략되어 있으나, 실제 충돌에서는 Disc, Holder, stem, Bottom Seat 모두가 관여하고 있으며 충돌 가속도, 속도, 변위 계산할 때에도 Stem 과 Bottom Seat 을 포함하여 값을 계산 했기 때문에 충돌해석에서 Stem 과 Bottom Seat 의 질량이 반영하여 소재의 새로운 밀도를 정의하였다. 따라서 충돌하는 물체인 Disc 와 Holder 의 밀도는 Disc, Holder, stem, Bottom Seat 의 질량을 Disc 와 Holder 의 체적으로 나눈 값인 8000kg/m³ 이 사용되었다. 초저온 유체의 영향으로 인해 내부의 온도차이가 존재하지만 충돌해석에서는 온도 차에 의한 열 변형 및 열응력은 고려하지 않았다.

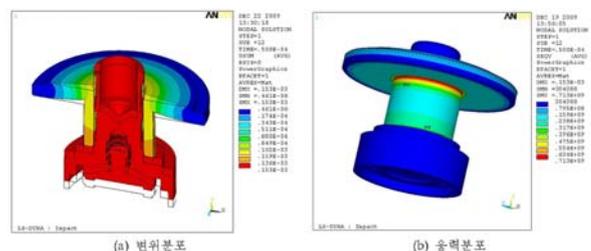


Fig. 3 충격해석 변위 및 응력분포

Fig. 3 는 변위 및 응력분포를 나타낸다. 충격하중에 의해 구조적으로 가장 취약한 부위는 Fig. 3(b)에서처럼 Guide의 곡률부로 최대응력 713MPa 이 발생하였다. 탄소성 해석이 아닌 탄성해석이기에 때문에 Guide의 응력이 다소 크게 발생했지만 소재의 항복강도가 386MPa 임을 감안한다면 소재 항복강도 이상의 응력이 발생하므로 구조적으로 불안정함을 알 수 있다.

3. 양정변화를 통한 안전성 확보

양정의 변화에 따라 밸브의 유출계수가 변할 수 있기 때문에 반드시 양정변화에 따른 유동해석이 수행되어야 한다.

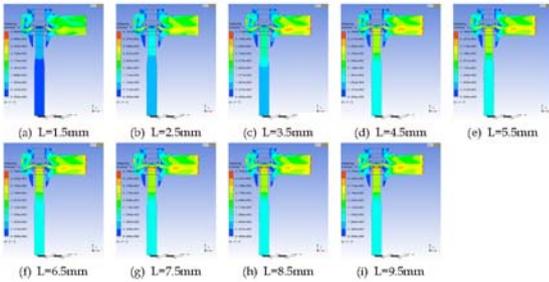


Fig. 4 양정변화에 따른 밸브 내부의 속도분포

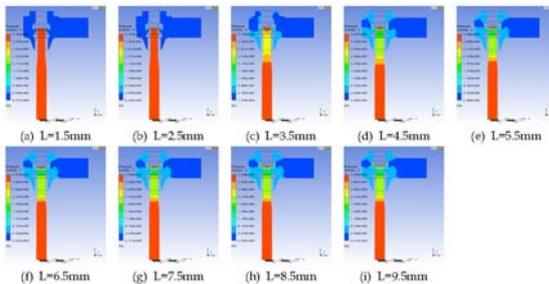


Fig. 5 양정변화에 따른 밸브 내부의 압력분포

Fig. 4 는 양정변화에 따른 밸브 내부의 속도분포를 나타내며, Fig. 5 은 양정변화에 따른 밸브 내부의 압력분포를 나타낸다. 속도 및 압력분포 모두 양정이 9.5mm 에서 4.5mm 로 변할 때까지는 큰 차이를 보이지 않으나 4.5mm 에서 3.5mm 로 변화에 따라 노즐 출구 부분에서 속도가 급격히 감소하고 압력이 크게 상승하는 경향을 보였으며, 밸브출구의 유향을 기준으로 유출계수를 계산한 결과 Fig. 6 에서처럼 유출계수 역시 급격한 감소를 보였다.

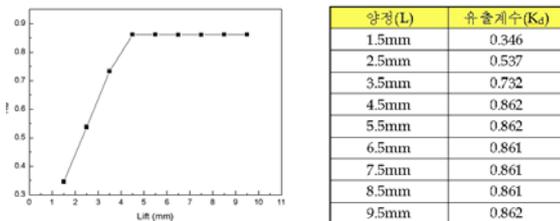


Fig. 6 양정변화에 따른 유출계수의 변화

밸브 유출계수에 영향을 미치지 않는 범위에서 충돌속도를 최소로 하는 양정을 4.5mm 로 정하고 충돌하는 부위의 Guide 길이를 5mm 증가시켰다. 양정이 감소한 만큼 Disc 와 Holder 가 가속되는 시간이 짧아지기 때문에 충돌속도가 변하게 된다. 따라서 충돌속도를 Fig. 7 과 같이 다시 계산하여 y 방향으로 5.64m/s 를 유한요소해석에 적용하였다.

소재 물성치, 변위 경계조건, 접촉조건은 첫 번째 방안과 동일하다. Guide의 두께는 4mm로 고정하고 응력 집중부의 곡률 변화와 Guide 길이 변화에 따라 총 4 가지 충돌해석이 수행되었으며, 결과는 Fig. 8 와 같다.

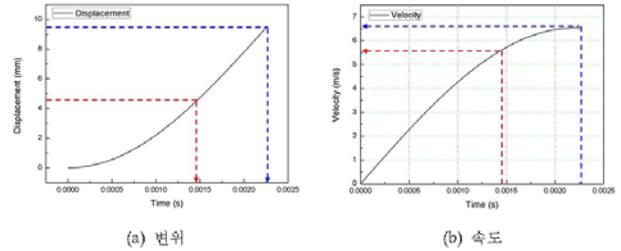


Fig. 7 양정변화에 따른 변위 및 충돌속도

충돌속도는 양정이 변하기 전 6.536m/s 에서 양정이 변한 후 5.64m/s 로 약 1m/s 의 속도가 감소되었다.

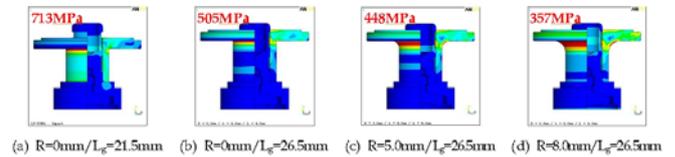


Fig. 8 최대양정을 변화시키는 경우

응력 집중부의 곡률과 Guide 길이에 따른 최대 Von-Mises 응력은 Fig. 8 와 같다. 두 번째 방안에서는 발생하는 최대응력이 357MPa 로써 소재항복강도 386MPa 이하인 Fig. 8(d)를 최종형상으로 결정하였다.

4. 결론

본 연구에서는 Safety Relief Valve 의 Disc, Holder, Guide 부의 구조적 안전성을 확보하기 위해 충돌해석과 양정변화에 따른 유동해석을 통해 형상의 최적설계를 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 모델의 구조해석을 통해 충격하중에 의해 구조적으로 가장 취약한 부위가 Guide의 곡률부임을 확인할 수 있었다.
- (2) 안전성 확보 방안은 최대 양정을 변화시켜 충돌하는 부위의 Guide 길이를 증가시키고 동시에 응력집중부의 곡률과 Holder 와 충돌하는 Guide 부위의 두께를 증가시키는 것이다.
- (3) 설계변수 값 R=8.0mm, Lg=26.5mm, t=4.0mm 을 획득하여 유한요소해석을 수행한 결과 최대응력이 357MPa 로 소재항복강도 386MPa 를 만족시키는 가이드를 설계할 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 나재봉, "수중구조물(CARG DOOR)의 해석을 통한 충격 안전성에 대한 연구", 한국정밀공학회 2007 년도 춘계학술대회논문집
2. 김동균, 김정환, "LNG 선박용 글로브 밸브 구조해석에 관한 연구", 한국마린엔지니어링 학회지, 8, 1013-1019, 2007.