

안전릴리프밸브의 블로우 다운 예측 및 유체-구조 연성해석

최지원, 장시환, 이권희*
동아대학교 기계공학과

Blowdown Prediction of Safety Relief Valve and FSI Analysis

Ji-Won Choi, Si-Hwan Jang, Kwon-Hee Lee*

Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 안전릴리프밸브는 배관라인 혹은 탱크의 과도한 압력을 완화하고 사용 적정압력 수준으로 유지해주는 장치이다. 안전릴리프밸브는 스프링 보닛에 통풍구가 대기 쪽으로 혹은 배출구 쪽으로 뚫려 있는지에 따라 배압의 변화에 직접적으로 영향을 받게 된다. 배압은 축적 배압(Built-up back pressure)과 부과 배압(superimposed back pressure)으로 나뉘게 되며 사용조건에 따라 배압의 특성이 달라진다. 본 연구에서 사용되는 안전밸브는 Conventional Safety Relief Valve로써, 배압의 특성을 가정하였다. 또한 개방력과 스프링력 사이의 힘의 평형 방정식을 세워 이론적 접근방법으로 초기 스프링 변위를 구하였다. 디스크가 받는 반력 즉 개방력과 스프링력을 비교하여 블로우 다운을 예측하였다. 블로우 다운은 설정 압력과 디스크 제단힘 압력 간의 차이이다. 본 연구는 ASME 규격 코드에 따라서 블로우 다운 시험 전에 전산 유동해석프로그램 CFX17.1을 이용하여 수치적으로 예측하였음을 밝힌다. 또한 유체-구조 연성해석(fluid-structure interaction analysis)을 통해 안전밸브 트림부의 안전성을 검토하였다. 향후, 시험과 전산수치해석 값을 서로 비교하여 블로우 다운 이론적 접근방법과 유동해석방법을 제안하고자 한다.

Abstract A safety relief valve is a device that relieves excessive pressure in piping lines or tanks and maintains pressure at the appropriate pressure level for use. The (pressure in the) safety valve is directly influenced by the change in the back pressure, depending on whether the vents in the spring bonnet are vented to the atmosphere or to the outlet. The back pressure is divided into the built-up back pressure and the superimposed back pressure, and the back pressure characteristics vary according to the usage conditions. The safety valve used in this study is a Conventional Safety Relief Valve. The blowdown of the safety valve is predicted by establishing the equilibrium equation between the opening force and spring force considering the back pressure characteristics. Its reliability is secured by using CFX17.1. In addition, the safety of the safety valve trim was examined through fluid-structure interaction analysis.

Keywords : Blowdown, Conventional safety relief valve, Fluid-structure interaction analysis, Opening force, Spring force

1. 서론

현 산업에서 압력 방출 장치인 안전밸브는 배관 시스템 혹은 고압 용기 장치에 사용되어 일정 수준으로 압력을 제한함으로써, 인명 피해 및 기계-산업시스템 보호의 목적으로 사용이 된다. 이로 인해서 안전밸브는 API, ASME와 같은 엄격한 규격, 법령이 정해져 있어 사용요

건에 맞게 사용할 필요가 있다. 안전밸브의 종류로는 기구에 따른 구분(스프링식, 지렛대식, 추식 등), 유량 제한 기구에 따른 구분(양정식, 전량식), 용도에 따른 구분(안전밸브, 릴리프 밸브, 안전릴리프밸브)이 있다[1]. 안전릴리프밸브는 스프링 하우징의 통풍구 위치에 따라 초기 개방력과 설정 압력에 영향을 주게 된다.

본 연구에서 사용된 안전릴리프밸브는 스프링 하우징

본 연구는 산업통상자원부 지정 지역혁신센터사업(RIC) 고기능성밸브기술지원센터(B0010565) 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kwon-Hee Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7638 email: leekh@dau.ac.kr

Received October 30, 2017

Revised (1st November 20, 2017, 2nd November 22, 2017)

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

의 통풍구가 대기 쪽으로 뚫려 있는 형태이다. 또한, 초기 디스크 개방 시, 배압은 개방력을 향상하는 효과를 얻을 수 있다. 배압의 특성은 디스크가 개방이 이루어지면 유체의 유동으로 인해서 예측이 쉽지 않다. 디스크 개방이 이루어지면 순간적으로 배압의 특성으로 인해서 힘의 균형이 무너지게 되는데 이때 채터링-플러터 현상이 발생하여 밸브의 시트 및 디스크의 수명을 단축하는 악영향을 발생시킨다. 채터링은 디스크가 시트에 닿아 밸브와 관련 배관이 손상되는 동작을 나타내고, 플러터는 디스크와 시트가 닿지 않은 상태에서 밸브가 빠르게 떨리는 것을 말한다[2]. Chabane & Plumejault는 안전릴리프밸브의 배압의 특성에 따라 채터링 현상을 실험과 전산수치해석을 수행하였다[3].

안전밸브는 디스크가 개방을 시작하면서부터 압력이 증가하여 단일로 설치 시에는 10% 과압, 다중으로 설치 시에는 16% 과압을 허용한다[4]. 디스크가 개방하는 순간, 밸브 입구의 압력 증가 대비 디스크 개방 높이가 극도로 증가하는 경우가 있는데, 이때 밸브 입구 압력을 팽핑 압력이라고 한다[5]. 블로우 다운 예측 시, 설정 압력을 이용하지 않고 실제로 디스크가 개방되는 시점으로부터 블로우 다운을 예측할 수 있다. 따라서 밸브의 종류 및 적용 유체에 따라 압력 변화와 디스크 높이 변화도 다르기 때문에 이에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 전산 수치해석프로그램 ANSYS CFX17.1로 디스크가 받는 반력과 스프링력 간의 힘의 평형 방정식으로 블로우 다운을 예측하였으며, 나아가 유체-구조 연성해석을 통해서 안전릴리프밸브 트림부의 안전성을 검토하였음을 밝힌다.

2. 블로우 다운

2.1 블로우 다운 예측 방법

본 연구에 사용된 안전릴리프밸브의 단면도와 각 부품의 명칭을 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구는 실험 이전에 전산수치해석 프로그램 CFX17.1을 이용하여 블로우 다운을 예측하였다. 안전릴리프밸브는 스프링 보닛의 형태에 따라 배압의 특성이 달라지고 초기 개방력에도 영향을 미친다. Fig. 2에서 (a)는 스프링 보닛이 뚫려 있는 형태로 디스크에 대기압과 배압의 영향을 받고, Fig. 2에서 (b)는 스프링 보닛이 밸브 내부 쪽으로 뚫려 있는 형상으로 배압의 영향만 받게 된다. 본 연구에서 사용한 밸브는 (a)로 Conventional Safety Relief Valve이다.

앞서 서론에서 언급한 것처럼 블로우 다운은 디스크가 실제로 열리는 압력과 다시 디스크가 닫힌 압력의 차이인 백분율로 식(1)과 같이 표시할 수 있다[6]. 디스크가 열리는 순간을 Popping point, 그때의 노즐 입구 압력을 Popping Pressure라고 하며, 디스크가 다시 닫히는 노즐 입구의 압력을 Reseating Pressure라고 한다. 닫힘 압력은 개방 압력보다 더 이하의 압력에서 닫히게 되는데, 그 원인은 개방에 필요했던 노즐의 면적보다 더 넓은 닫힘 면적을 차지하고 있기 때문이다. 따라서 힘의 평형을 이루기 위해서는 더 낮은 압력에서 닫혀야만 한다. 안전밸브는 Code Standard ASME Sec. VIII에 따라 블로우 다운은 7% 이하로 설정되어야 한다[4].

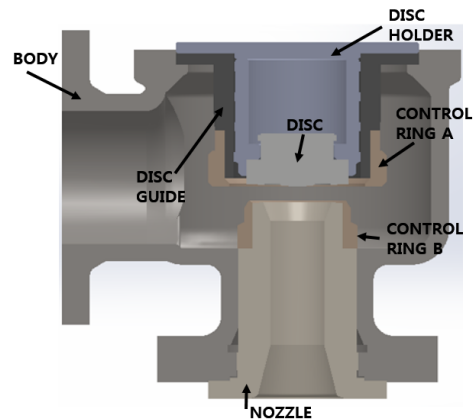


Fig. 1. Sectional view of Conventional Safety Relief Valve

$$\text{Blow down}(\%) = \frac{\text{Popping pressure} - \text{Reseating pressure}}{\text{Popping pressure}} \quad (1)$$

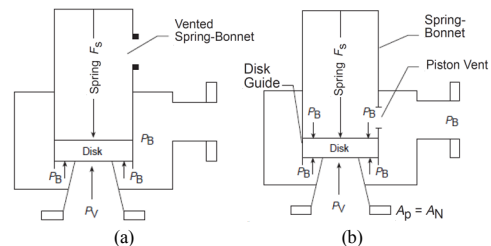


Fig. 2. Two types of conventional safety relief valve[5]

2.2 개방 직전

본 연구에 사용된 안전릴리프밸브의 개방 직전에서 개방력과 스프링력의 힘의 평형 방정식을 식(2)에 나타

내었다[5]. 식(2)는 개방 직전, 배압의 특성을 고려하여 스프링력과 노즐 입구의 개방력이 동일한 순간의 방정식이며, 배압은 1atm으로 가정하였다. 본 연구는 상용 소프트웨어 Solidworks 2012를 이용해서, 유체가 닿는 디스크의 면적과 노즐 입구의 면적을 확인하였다. 또한, 식(2)에서 후크의 법칙(Hooke's Law)으로 실험 초기의 스프링 변위를 구할 수 있었다. 초기 스프링 변위를 구해야 하는 이유는 초기 스프링력을 확인해야지만 완전 개방 시 스프링력도 확인할 수 있기 때문이다. 따라서 Fig. 3과 같이 디스크 행정 높이별 스프링력을 구할 수 있다. 스프링 상수 k 는 25.96kgf/mm이며, 디스크 행정 높이는 11.66mm이다. 스프링 상수와 디스크 행정 높이는 도면에서 확인하였음을 밝힌다. 총 0mm~11.66mm 이동 가능하며, 열리기 직전의 디스크 행정높이 0mm일 때는 스프링력이 648.9kgf로 확인되었고, 최대높이 11.66mm 순간에 스프링력은 951.59kgf로 확인되었다. 스프링력은 개방 직전에서부터 완전 개방 시까지 디스크의 행정에 있어서 Fig. 3과 같이 선형적으로 변한다는 것을 확인할 수 있었다. 개방력은 밸브 입구 설정압력과 노즐면적의 곱으로 나타낼 수 있다. 개방직전은 개방력이 스프링력 보다 작기 때문에 디스크가 닫힘을 유지할 수 있다. 또한, 디스크 개방이 시작되는 순간에서부터 개방력은 스프링력을 이기게 되어 유체를 방출하게 된다.

$$P_V \times A_N = F_S - P_B (A_D - A_N) \quad (2)$$

$$AN(\text{노즐면적}) = 33.74\text{cm}^2$$

$$AD(\text{디스크면적}) = 72.23\text{cm}^2$$

$$PB(\text{배압}) = 1\text{atm}$$

$$PV(\text{개방력}) = 17.7\text{bar}$$

$$k=25.96\text{kgf/mm}$$

$$PV \cdot AN = 609.14\text{kgf}$$

$$FS = 609.14\text{kgf} + 1\text{atm} \cdot (AD - AN) = 648.9\text{kgf}$$

$$Fs = kx$$

$$x(\text{초기변위}) = 24.99\text{mm} \approx 25.0\text{mm}$$

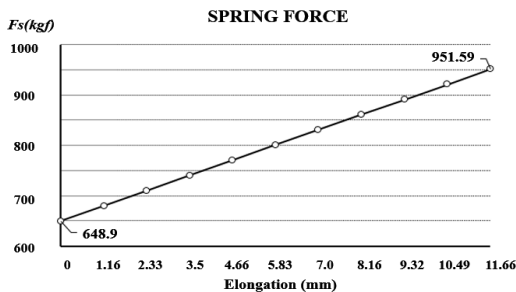


Fig. 3. Spring force according to disc stroke

2.3 완전 개방

완전 개방 시, 스프링력과 개방력의 평형 방정식을 식(3)에 나타내었다. 서론에서 언급한 것처럼 개방되는 순간 배압의 특성을 파악하기엔 어려움이 존재하기 때문에 완전 개방 시 배압은 생략하였다. 식(3)에서 스프링력은 $k(25.96\text{kgf/mm}) \cdot x(36.66\text{mm})$ 으로 951.6kgf이며, 변위 x 는 디스크 행정(11.66mm)과 조립단계에서 눌러지는 스프링 변위(25mm)의 합으로 나타낼 수 있다. 본 모델의 밸브 입구 조건은 설정 압력(17.7bar)의 감압(-) 및 과압(+) 설정으로 변경하면서 전산 수치해석을 시행하였다. 완전 개방 시 과압은 서론에서 설명한 것과 같이 ASME code에 따라 10%로 설정하였으며, 감압설정은 디스크가 닫히게 되는 순간에서 스프링력과 개방력이 동일한 입구압력을 알기 위함이다. 따라서 감압 설정 시에는 노즐 입구압력을 계속 변경해가면서 파악해야한다. 위와 같이, 식(1)에서 개방 순간의 압력(popping pressure)과 디스크가 다시 닫히는 순간의 압력(Reseating pressure)으로 블로우 다운을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 디스크 행정에 따라 노즐 입구의 압력 변화를 나타내고 있다[6]. 안전밸브의 설정 압력 이하에서 디스크는 일부 어느 정도 개방이 이루어지지만, 설정 압력에서 디스크 행정의 변화량이 상당히 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 4의 5번 지점은 설정 압력 이하의 압력지점이지만, 4번 지점(과압10%)과 동일한 디스크 높이이기 때문에 스프링력은 4번 지점과 5번지점이 동일하다. 따라서 과압10%에서의 스프링력은 951.6kgf이고, 이때의 동일한 개방력은 전산수치해석으로 CFX17.1을 이용하여 디스크가 받는 반력을 구하였다. 즉, Fig. 4에서 5번 지점까지의 스프링력은 변화가 없음을 알 수 있다.

Table 1은 디스크가 받는 반력(Lift)을 디스크 높이 100%에서 압력변화(과압 및 감압)에 따라 각각 나타내었다. 감압이 이루어질수록 디스크가 받는 반력도 작아짐을 확인할 수 있었고, 감압(6%)에서 스프링력과 동일한 개방력을 확인할 수 있었다. 하지만 이 수치는 배압이 고려되지 않았고, 앞서 2.1에서 설명한 스프링력도 배압이 가정으로 설정해서 정확한 스프링력은 아니다. 본 안전릴리프밸브의 블로우 다운 실험에서 사용되는 정확한 스프링변위를 먼저 확인하기 전에 본 연구를 시행하여 앞서 언급한 것과 같이 여러 가정이 있었다. 본 실험 이후, 실험의 운전조건과 동일한 스펙으로 전산 수치 해석을 재 수행함으로써 블로우 다운 예측방법을 정규화해서 구축할 예정이다.

$$P_V \times A_N = F_S \quad (3)$$

Table 1. Force balance due to pressure change

Lift	Pressure	Fs [kgf]	Flift [kgf]
100%	Overpressure (10%)	951.6	1113.7
100%	Decompression (2.5%)	951.6	995.6
100%	Decompression (5%)	951.6	973.7
100%	Decompression (6%)	951.6	954.3

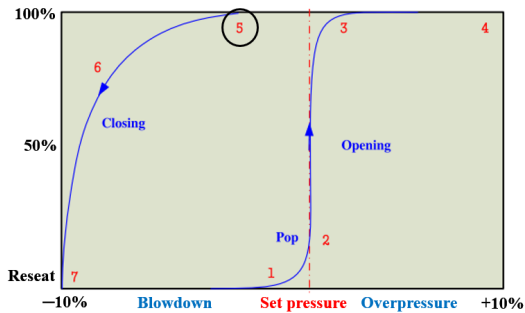


Fig. 4. Typical relationship between disc stroke and vessel pressure[6]

3. 유체-구조 연성해석(FSI)

유체-구조 연성해석 시, 필요한 경계조건과 밸브 트림부의 모델 정보를 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 신뢰성 있는 해석 결과를 얻기 위해, FSI 해석 시 복잡한 유동형태를 보이는 부분과 더 중요시 되는 부품에 메쉬를 적절히 조정하였다. CFD와 FEM 간의 인터페이스를 통해 중요부품인 트림부의 응력을 Table 4에 나타내었다.

수치해석결과, 과압 10%에서도 von-미세스 응력이 크게 나타나지 않아 충분히 안전성을 확인하였다. 트림부 전산수치해석 결과, 디스크 가이드에서 가장 큰 응력이 나타났지만, 재료 sus316의 항복 응력이 205MPa이므로 의미 없는 수치 정도이다.

따라서 본 안전릴리프 밸브는 운전사용조건인 입구압력 17.7bar에서 충분히 손상을 받지 않음을 확인할 수 있었다. 앞서 2장에서 블로우 다운 예측 시에서는 배압 조건 때문에 재해석을 수행한다고 하였다. 마찬가지로

유체-구조 연성해석(FSI)도 입구조건은 동일하지만, 배압특성에 영향을 받으므로 블로우 다운 실험 이후에 다시 재해석을 수행할 필요가 있다.

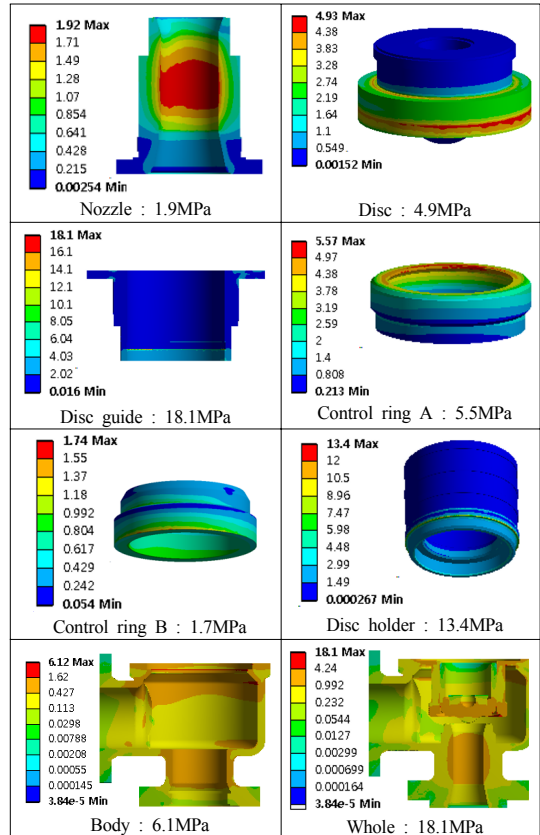
Table 2. Features of fluid model

Fluid model (CFD)	Boundary condition	
	Inlet pressure	17.7bar
	Outlet pressure	atmosphere
	Applied fluid	air
	Turbulence opt.	k-Epsilon
Element	1,000,000	

Table 3. Features of structure model

	Part	Material	Element	Allowable Stress[MPa]
Structure model (FEM)	Nozzle	sus316	634,000	205
	Disc	sus630	156,000	725
	Disc guide	sus316	475,000	205
	Control ring	sus304	224,000	205
	Disc holder	sus316	262,000	205

Table 4. Von-mises stress results of each part



4. 결론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 사용한 Conventional Safety Relief Valve를 ASME Code에 따라 이론적으로 블로우 다운 예측방법을 제시하였다.
2. 본 연구는 전산수치해석 프로그램 ANSYS CFX17.1을 이용하여 블로우 다운을 수치적으로 예측하였고, 유체-구조 연성해석을 수행하여 본 연구에서 사용한 안전릴리프밸브 트림부의 안전성을 검토하였다.
3. 본 연구는 실험 이전에 전산수치해석을 수행하여 블로우 다운의 수치를 적정 예측하고자 하였다. 블로우 다운 예측 시, 배압의 특성을 가정해서 개방 직전과, 완전 개방 시의 힘의 평형 방정식으로 블로우 다운을 적정 예측하였음을 밝힌다.
4. 전산수치해석을 수행하여 노즐 입구압력의 변화 (과압 및 감압)에 따라 디스크가 받는 반력과 스프링력을 비교하여 힘의 평형 방정식을 세워 블로우 다운을 예측하였다. 완전 개방 시, 디스크 최대높이에서 감압을 시켜 디스크가 받는 반력과 동일한 개방력을 확인하여 블로우 다운을 적정 예측하였다. 하지만 이 수치는 디스크가 닫힘 때의 노즐입구 압력이 아니기 때문에 정확한 수치는 아니다. 향후 실제 실험을 통해서 본 연구에서 접근한 블로우다운 예측방법의 신뢰성을 검토할 예정이다.
5. 향후, 본 연구에서 사용한 안전릴리프밸브 모델의 블로우 다운 시험을 통해서, 이론적 접근방법의 결과와 실제 실험데이터의 수치를 비교해서 정확한 이론적 접근방법을 수립할 예정이다. 나아가, 모든 안전밸브 모델의 배압 가정방법과 블로우 다운 예측방법을 정규화해서 전산수치해석 방법을 제안할 예정이다.

References

[1] JOKWANG. Type of safety valve [Internet].(accessed Oct, 10, 2017), <http://www.jokwang.co.kr/kor/02/21.htm>

[2] Anderson Greenwood, *Pressure Relief Valve Technical Manual*, p. 123, Catalog : PRVTM-US.97 http://kemco.or.kr/up_load/iecenter/club00000204_energy

qa/prvtechman.pdf

[3] S. Chabane, S. Plumejault, D. Pierrat, A. Couzinet. "Vibration and chattering of conventional safety relief valve under built up back pressure", 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October 14-16, 2009, Brno, Czech Republic.

[4] ASME 'Boiler And Pressure Vessel Code Section VIII - division I', 2013.

[5] Crosby Valve Inc. *Crosby Pressure Relief Valve Engineering Handbook*, p. 15, Technical Publication No. TP-V300 https://swan-associates.com/documents/Eng_Handbook.pdf

[6] X. G. Song, Y. C. Park, J. H. Park, "Blowdown prediction of a conventional pressure relief valve with a simplified dynamic model", *J. of Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 57, No. 1-2, pp. 279-288, January, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.054>

최 지원(Ji-Won Choi)

[준회원]



- 2015년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2015년 9월 ~ 2017 8월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 8월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>
기계설계, 최적설계

장 시 환(Si-Hwan Jang)

[준회원]



- 2017년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>
기계설계, 최적설계

이 권 희(Kwon-Hee Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학박사)
- 1994년 6월 ~ 1999년 6월 : 대우 자동차 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

기계설계, 최적설계