

RELAP5/MOD3 코드를 이용한 안전밸브의 동적 거동 해석

Analysis of Safety Valve Performance with RELAP5/MOD3

이도환, 박성근, 홍승열, 김양석, 정래혁
한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 안전밸브 동적 거동 해석을 위한 RELAP5/MOD3 코드의 활용성을 검토하였다. 1" 안전밸브에 대한 코드의 예측 결과와 설계에서 일반적으로 사용되고 있는 Napier 식으로부터 계산된 용량을 비교하여 코드 사용의 적절성을 검토하고 코드로부터 계산된 질량 유량이 Napier 식을 이용하여 대략적으로 평가한 값에 10% 범위 내에서 일치함을 확인했다. 두 가지 입력 모델을 통해 Nodalization과 배관 마찰의 영향을 살펴보았는데 이들의 영향은 해석 결과에 미미한 것으로 나타났다. 또한, 배관 형상과 길이에 따라 야기될 수 있는 밸브 불안전성 발생 여부를 살펴보았다. 마지막으로 밸브 Blowdown 평가를 위한 시험 설비를 제시하고 이 설비에 대한 해석을 통해 상부링 위치 변화에 따른 Blowdown의 변화를 평가했다.

Abstract

The applicability of the RELAP5/MOD3 for the safety valve performance analysis is examined in the present study. By comparing the capacity of the 1" valve predicted from the code with the calculated results from the Napier relation, the usefulness of the code for the safety valve analysis is verified. This comparison reveals that the two capacity values are agreed within 10%. The nodalization sensitivity and the frictional effect of the pipe are investigated for two input models. It is found that these effects on the predictions are negligible in the present study. Observation is made to the occurrence of valve instability which can be caused by the upstream pipe configuration and the length. Finally, a typical facility design for the blowdown tests is presented and the percent blowdown change for the valve is assessed by varying the adjusting ring positions.

1. 서론

스프링 장착형 안전밸브는 상류 또는 압력 용기의 압력이 허용 값을 초과하면 밸브가 개방되어 유체를 방출시킴으로써 계통의 압력을 설계값 이하로 유지시키는 역할을 하는 기기이다. 밸브가 너무 천천히 개방되면 계통의 압력을 설계 기준 이하로 조절하는 데 필요한 유체를 짧은 시간 동안 충분히 방출하지 못하고 밸브가 너무 빨리 개방되면 방출 배관에 과도한 동적 하중이 전달된다. 그러므로 안전밸브를 설계하고 성능을 평가하기 위해서는 다양한 유체 및 열역학 조건에서의 밸브에 대한 거동을 이해하는 것이 필요하다. 안전밸브 내부에는 디스크와 시트면의 급격한 기하학적 형상 변화에 따라 박리가 발생하는 매우 복잡한 3차원 유동장이 존재하고 밸브 디스크가 스프링, 전단 압력 및 유동의 결과로서 생기는 힘에 의해 동작됨에 따라 유동장은 비정상 상태가 되므로 정확한 3차원 유동 해석은 아직까지 어렵다. 또한, 설계 과정에서는 밸브 성능을 최적화하기 위해 밸브 내부 부품의 형상 또는 치수 등을 지속적으로 변경해야 하므로 1차원 해석 방법을 이용하여 개발 중인 모델의 성능을 평가한 후 최종적으로 완성된 원형 (Prototype) 모델에 대해 정확한 3차원 해석을 하는 것이 밸브 개발 과정에서는 효과적이다.

그동안 그 중요성에 반해 안전밸브에 대한 연구 결과는 많지 않으며 TMI Action Item에 따라 미국 EPRI가 가압기 안전밸브에 대한 시험 및 해석 연구를 수행한 것이 최초의 심도 있는 연구였다[1]~[4]. EPRI가 수행한 일련의 연구에서 Singh[1]은 밸브의 불안정 상태와 전단 배관과의 관계를 규명했다. 그는 빠른 디스크의 움직임으로 인해 발생한 음압의 변화에 따라 전단 배관의 마찰이 증폭되고 이에 따라 디스크가 불안정성이 증가한다는 사실로부터 전단 배관 마찰 손실에 따른 불안정성 판별 기준을 개발했다. 안전밸브 설계시 중 밸브가 열린 후 되닫힐 때의 압력 차이인 Blowdown이 매우 중요한 데이터는 Blowdown이 어느 한계 이상 되면 계통 압력이 과도하게 떨어질 수 있기 때문이다. 이에 따라 Singh과 Shak[2]는 배압, 상부링의 위치 그리고 스프링 강성 (Stiffness)과 Blowdown의 관계를 평가 했다. Singh 등 [3]과 Lanegrman[4]는 밸브 디스크의 위치 변화, 질량 유량 등에 대한 예측 모델을 개발하여 실험 결과와 비교하였다. 특히 Langerman은 RELAP5/MOD1을 이용하여 밸브 거동뿐만 아니라 전단 압력 등 계통변수 등도 예측하고 코드 사용의 적절성도 밝혔다.

원자력 발전소용 주요 안전밸브는 ASME Code 등에 의해 기술된 설정치 (Setpoint), Blowdown, Overpressure 허용 한계 내에서 설계, 제작되어야 한다[5]. 따라서 밸브 제작 전 해석적 방법을 통해 설계의 적절성을 확인하는 것이 필요하다. 원자로 계통의 안전 해석 및 성능 해석에 주로 사용되어 온 RELAP5/MOD3 Code에는 안전밸브 (Safety Valve) 또는 방출 밸브 (Relief Valve)에 대한 밸브 모델이 포함되어 있어 설정치를 제외한 디스크 변위 및 용량을 예측할 수 있다 [6]. 밸브 열림 압력과 되닫힘 압력의 차이인 Blowdown을 평가하기 위해서는 디스크 위치에 따른 밸브 전단 압력의 변화를 구해야 하는 데 이를 위해서는 계통 해석을 모사할 수 있는 프로그램 코드가 필요하다. 또한,

시작품의 용량 (질량 유량) 인증 시험 전 공장 시험을 통해 제작 밸브의 적절성을 확인하게 되는 데 시험 설비가 대상 밸브 시험에 적절하지 못할 때에는 시험 밸브에 Chatter 또는 Flutter 등이 발생하는 등 신뢰할 수 없는 결과가 발생할 수 있으므로 시험전 설비의 운전 조건이 밸브 거동에 적합한지 평가하는 것도 필요하다. 이 계통 운전 조건 모사에도 RELAP5/MOD3 Code는 효과적이라 할 수 있다.

현재 안전 및 방출 밸브에 대한 개발이 국내 제작사들에 의해 진행 중이나 시간에 따른 밸브 거동을 예측할 수 있는 방법이 아직 개발에 활용되지 않고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 안전밸브 개발시 유용하게 적용할 수 있는 RELAP5/MOD3 코드를 소개하고자 한다.

2. 밸브 동적 거동 모델

RELAP5/MOD3에 포함된 밸브 동적 거동 모델은 참조 문헌 [6]에 기술되어 있다. 이절에서는 이해를 돕기 위해 이 밸브 거동 모델을 재 기술하였다. Fig. 1은 일반적으로 사용되고 있는 안전 및 방출 밸브에 대한 단힘과 열림 상태의 단면을 나타낸 것이다. 계통 압력이 밸브의 설정 압력보다 커지면 디스크는 시트로부터 떨어지게 되고 시트 Annulus를 통과하는 증기 유동과 상부 조정링 (Adjusting Ring)에 의해 방향이 바뀐 유동에 의해 추가적으로 발생한 힘이 디스크를 더욱더 위쪽으로 밀어 올리게 된다. 적절히 작동되는 밸브는 최대 위치까지 밸브가 개방되고 Blowdown이 진행될 때까지 최대 위치를 유지한다. 계통 압력이 강하되면 설계 Blowdown에 도달할 때까지 디스크의 위치는 낮아지고 설계 기준 Blowdown에 압력이 도달하면 밸브는 급격히 닫히게 된다. 디스크의 초기 Lift, 단힘 거동 및 Blowdown은 상부 및 하부 조정링 설정에 의해 결정된다. 이 조정링 들은 시트 영역으로부터 흐르는 증기의 흐름 각도를 조정한다. 일부 안전밸브에는 Bellows가 장착되어 있는 데 이 Bellows는 Body Bowl에 존재하는 배압 (Back Pressure)으로부터 디스크의 뒷면을 격리시키고 유체가 대기 중으로 누설되는 것을 방지하는 역할을 한다. 그러나 Bellows가 있더라도 디스크의 바깥 부분은 배압에 노출될 수 있다.

RELAP5/MOD3 코드에 사용된 동적 거동 모델은 노즐과 시트 영역을 검사체적으로 구성하고 이 검사체적을 흐르는 1차원 유동에 의한 힘으로부터 유도된다. 유동에 의한 힘은 디스크에 반력으로 작용하므로 이 반력과 스프링 힘, 디스크 상부에 작용하는 압력에 의한 힘을 Newton의 제 2법칙에 대입하면 밸브 동적 거동 모델이 얻어진다. Fig. 2에 점선으로 표시된 검사 체적에 아래와 같은 운동량 보존법칙을 적용하면 디스크에 작용하는 힘 F_D 는 얻어진다.

$$F_D = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho U_i dv + \int_{cs} \rho U_i U_j n_j dA \quad (1)$$

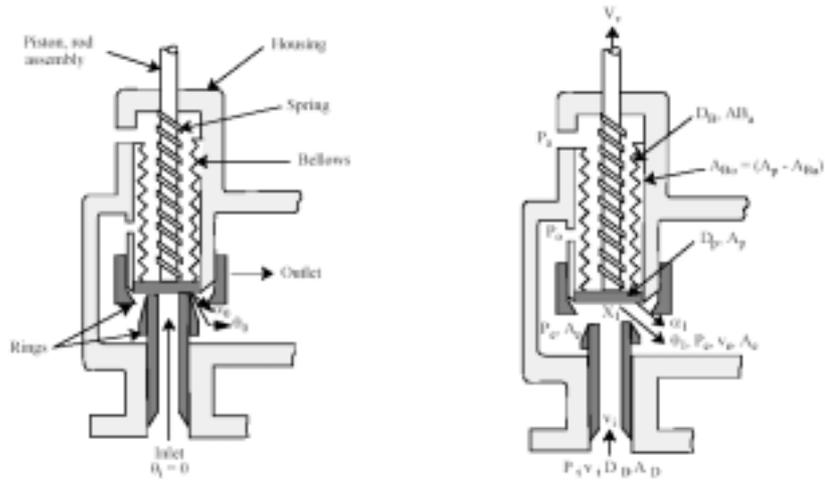


Fig. 1 A relief valve in the closed position (left side) and open position (right side)

준정상 상태 유동이라고 가정하여 시간항을 무시하고 전단 응력에 의한 힘과 시트에 작용하는 힘, 상부링에 작용하는 힘 등을 무시하면 디스크에 작용하는 반력은 아래 식 (2)에 의해 계산될 수 있다.

$$P_i A_D + P_e A_e \cos \theta - F_R = \dot{m}_f (-v_e \cos \theta - v_i) \quad (2)$$

RELAP5/MOD3 코드는 유로를 1차원으로 간주하므로 출구 유동의 방향과 출구 압력의 방향을 식 (2)와 반대로 간주함을 유의해야 한다. 이것은 Fig. 2의 유로를 펴서 왼쪽은 입구로 오른쪽은 출구로 만든 것과 유사하다. RELAP5/MOD3의 밸브 모델에 사용된 부호의 개념을 이용하여 식 (2)를 정리하면 식(3)과 같이 된다.

$$P_i A_D - P_e A_e \cos \theta - F_R = \dot{m}_f (v_e \cos \theta - v_i) \quad (3)$$

여기서,

P_i = 밸브 입구 압력

A_D = 입구 노즐 면적

P_e = 밸브 링 출구 압력

A_e = 밸브 링 출구 면적

F_R = 유동에 의한 반력

\dot{m}_f = 질량 유량

v_e = 링 출구 유속

v_i = 밸브 입구 유속

디스크에 작용하는 힘은 유동에 의한 반력 F_R 과 디스크에 작용하는 압력에 의한 힘을

고려하고 Newton의 제2법칙을 이용하면 구할 수 있다.

$$F_R - P_o A_{Bo} - P_a A_{Ba} - C\dot{x} - Kx - Mg = M\ddot{x} \quad (4)$$

여기서,

P_i = 밸브 입구 압력

A_D = 입구 노즐 면적

P_e = 밸브 링 출구 압력

A_e = 밸브 링 출구 면적

C = 댐핑 계수

K_S = 스프링 상수 또는 강성

x = 피스톤 위치

식(3)을 (4)에 대입하면 밸브 동적 거동 방정식을 만들 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K_S x = -P_a A_{Ba} - P_o A_{Bo} - P_e A_e \cos \theta - \dot{m}_f (v_e \cos \theta - v_i) + P_i A_i \quad (5)$$

여기서,

M = 동작하는 밸브 부품의 총 질량 (즉, 피스톤, Bellows, Spring 등을 합한 질량)

RELAP5에서는 각 시간 Step에 대한 유동장이 계산되면 상속도 (Phasic Velocity)와 열역학적 상태량을 이용하여 피스톤에 작용하는 유동 반력을 계산한다. 그 다음 밸브 동적 거동 모델을 이용하여 유동 반력에 따른 새로운 시간 Step에서의 피스톤의 위치와 속도를 계산한다.

3. 모사 결과

안전밸브의 경우 작동 유체가 단상 증기이므로 설계 단계에서 안전밸브를 지나는 질량 유량 (즉, 용량)은 설정 압력이 1500 psia 이하일 때 Napier의 식으로 평가될 수 있다 [5].

$$W = 51.45 \times A \times P \times K \quad (6)$$

여기서,

W = 질량 유량, lbm/hr

A = 밸브가 Lift 되었을 때의 실제 방출 면적, in²

P = 설계 설정 압력 + 10% overpressure + 14.7, psia

K = 인증 계수

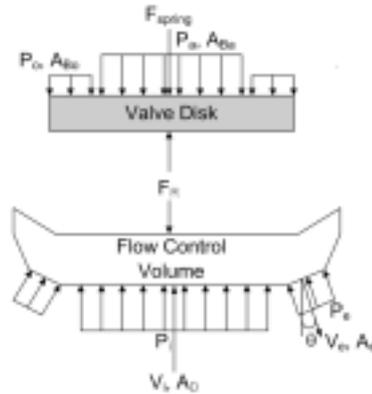


Fig. 2 Fluid dynamic forces acting on the valve components

식(7)을 이용하여 계산한 질량 유량은 RELAP5/MOD3 코드를 이용한 밸브 거동 해석 결과의 비교 자료로 사용된다. 인증 계수는 시험을 통해서만 얻어지는 데 본 논문에서는 일반적으로 설계 단계에서 적용하는 0.975를 사용하였다.

Table 1에는 본 논문에서 해석을 위해 사용한 주요 밸브 설계 값을 나타낸 것이다. Table 1의 밸브 입구 직경을 이용한 방출 면적과 설정 압력을 식 (6)에 적용하면 설계 질량 유량이 10% Overpressure의 전단 압력 조건 (즉, 1.0073×10^7 Pa 또는 1461 psia)에서 대략 4.5kg/s (=35,692 lbm/hr)이라는 것을 알 수 있다.

설계 변수	주요 설계 값
밸브 공칭 직경	1 in
밸브 입구 직경	0.02m (0.7874 inches)
밸브 Seat 외경	0.03m (1.1811 inches)
최대 Rated Lift	0.0079m (0.3110 inches)
Valve Spring Constant	2.892962×10^5 N/m (1740lb/in)
Valve 설정 압력	9.071151×10^6 Pa (1315 psi)
Valve Mass	0.03667 kg (0.08084 lbm)

Table 1 본 연구의 밸브 설계 변수

안전밸브는 ASME QME-1 또는 KEPIC MNB에 따라 방출 용량을 인증 받아야 하는데 Fig. 3에 본 연구의 대상으로 선정된 밸브의 공장 용량 시험을 위해 현재 제작중인 시험 설비의 개략도를 나타내었다. Tank에는 안전밸브의 설정 압력보다 높은 압력의 증기가 충전되어 있어 시험 개시 밸브 (Test Initiation Valve)가 열리면 밸브 전단 압력이 밸브의 되닫힘 압력보다 작아질 때까지 Tank에서 방출된 유체가 밸브의 스프링을 밀어 올리고 이 시간 동안 방출된 증기로부터 밸브의 용량을 확인하는 시험 장치이다.

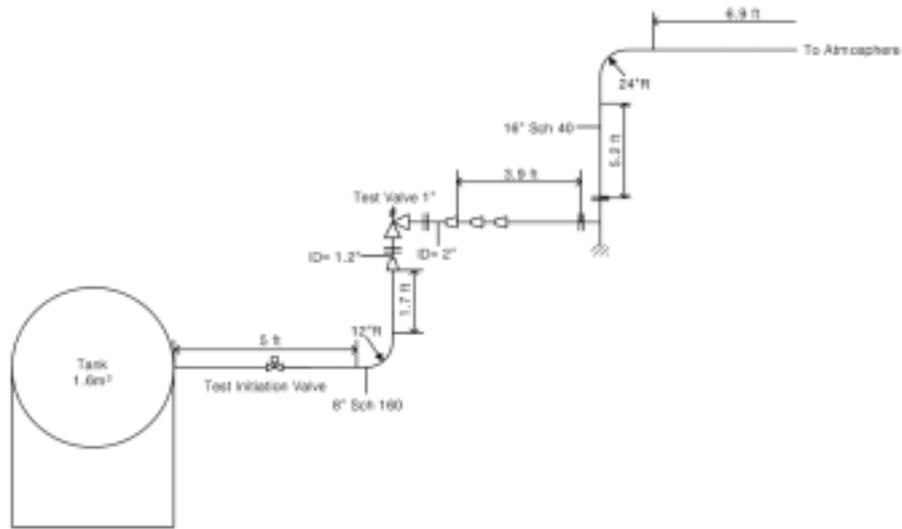


Fig. 3 Simplified schematic of the test facility for the capacity test

질량 유량 확인을 통한 RELAP5/MOD3 코드 적용의 적절한 지를 확인하기 위해 배관 마찰을 제거하고 밸브 전후단 배관을 최대한 단순화시켜 Nodalization (Case I로 명명)한 Diagram과 시험 설비에 연결된 배관을 고려한 것 (Case II)에 대한 Nodal Diagram을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 계산시 Tank와 시험 개시 밸브 전단까지의 초기 압력은 밸브 전단에서 약 10%의 Overpressure가 가해지도록 10.78732×10^6 Pa (1564 psi)로 설정하였으며 Tank의 유체는 포화 증기로 설정하였다. 또한 안전밸브 후단의 방출 배관의 초기 조건은 대기 상태에서의 건공기 (Dry Air)로 가정하였다. Tank는 Single Volume으로 모사했으며 시험 개시 밸브는 선형적으로 동작하는 MOV (Motor Operated Valve)로 가정하였다. 유체는 대기중으로 방출되는 데 대기 경계 조건은 Time Dependent Volume을 사용하여 모사하였다. 밸브 Blowdown에 영향을 주는 것으로 알려진 배압 (Back Pressure)은 아직까지 관계식이 없어 대기압으로 가정했으며 계산시 Choking Model은 안전밸브에만 적용했다. 본 연구에 사용된 코드 버전은 RELAP5/MOD3.2.2gamma이다.

Fig. 6~9는 Fig. 4와 5의 Nodalization을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. 안전 밸브 전단 배관의 형상 및 길이는 밸브 동작시 안정성에 영향을 줄 수 있는데 이 그림들에서 밸브의 불안정한 거동을 예측할 수 있는 점이 발견되지 않으므로 Fig. 3의 배관 구성은 안전밸브 시험에 적절한 것으로 평가된다. Fig. 6~8로부터 Fig. 3의 Fig. 6에 Case I과 Case II의 시간에 따른 질량 유량을 도시하였다. 그림으로부터 최대 유량은 5.1 kg/sec 정도이며 Fig. 7로부터 밸브 전단 압력이 10% Overpressure 조건일 때 5kg/sec 정도임을 알 수 있다 (실제 계산치는 4.9 kg/sec). 이 값은 식 (6)에 따라 최초

로 가정된 값과 10% 정도의 차이를 나타내는데 이는 밸브가 최대로 열렸을 때 실제 밸브의 최소 단면적이 밸브 노즐 단면적보다 크고 최소 단면적의 위치가 노즐로부터 Seat 면으로 이동함에 따라 기인한 것으로 추정된다[3]. 또한 Fig. 6으로부터 본 연구에서 평가한 유동장 해석 결과는 Nodalization에 따라 크게 민감하지 않고 밸브 동적 거동 결과도 배관 마찰의 영향을 크게 받지 않는다는 사실을 알 수 있다.

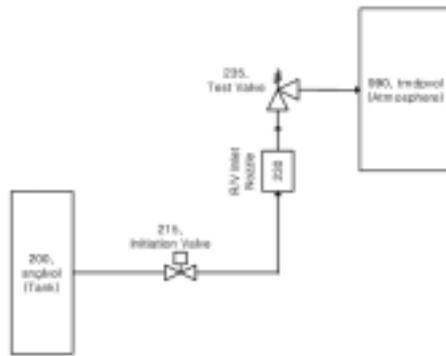


Fig. 4 RELAP5/MOD1 nodalization for the test facility (Case I)

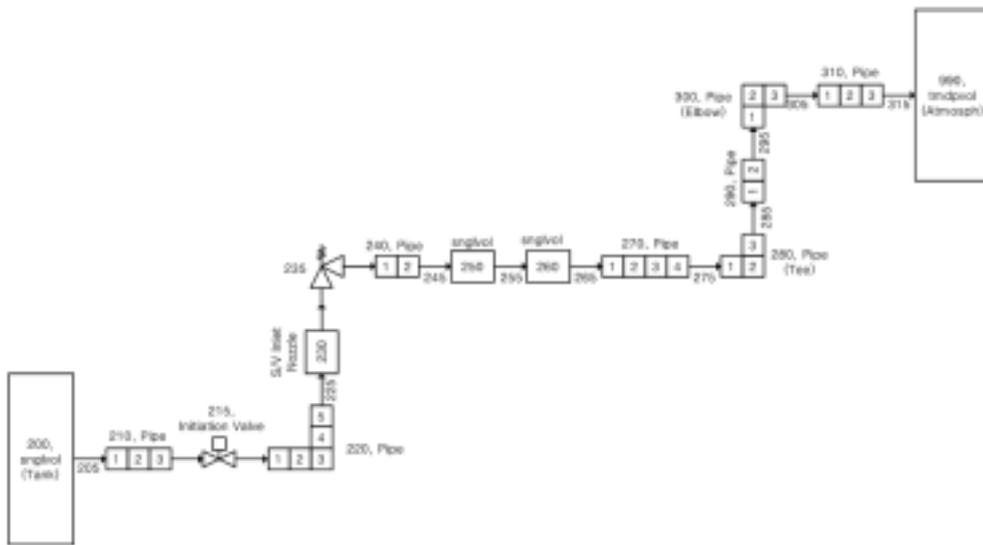


Fig. 5 RELAP5/MOD1 nodalization for the test facility (Case II)

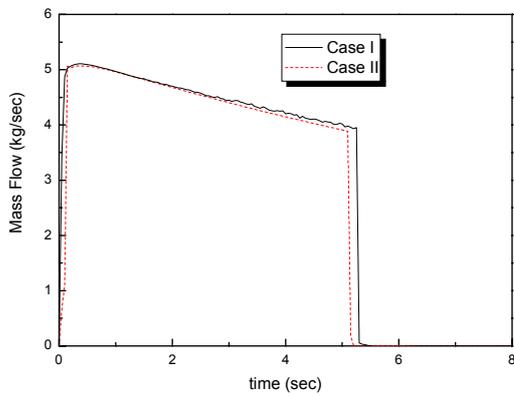


Fig. 6 Mass flow for Case I and II

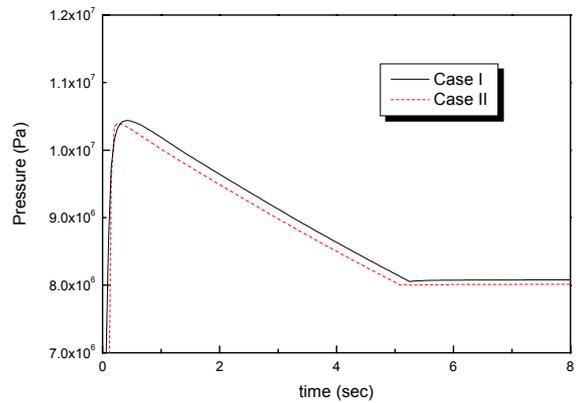


Fig. 7 Valve inlet pressure for Case I and II

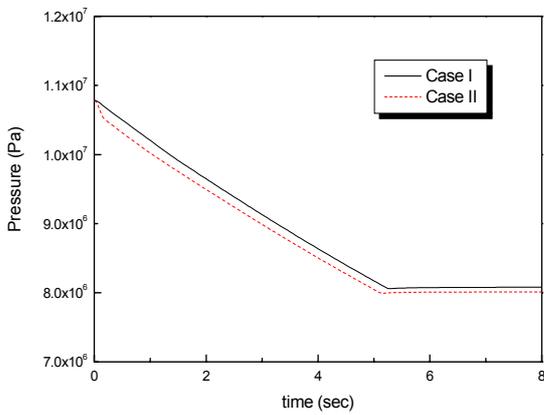


Fig. 8 Tank pressure for Case I and II

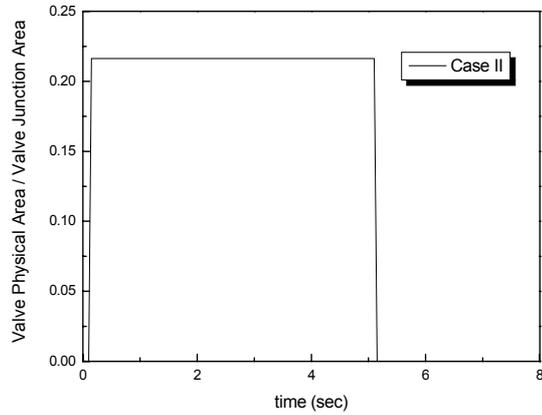


Fig. 9 Valve area ratio for Case II

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 안전밸브 전단 압력과 Tank의 압력을 나타낸 것이다. Fig. 7로부터 Fig. 3에 나타난 시험 설비는 밸브 용량 측정으로는 적절한 것으로 판단되나 밸브의 Popping 압력을 구분할 수 없어 밸브의 설정치 평가와 Blowdown 평가에 적합하지 않다고 판단된다. 이는 밸브의 설정 압력을 초과하는 Tank의 유체가 완충 기구 없이 밸브에 직접 도달하여 밸브를 순간적으로 개방시키기 때문이다. 따라서 제작 밸브의 실제 Popping 압력과 Blowdown을 평가하기 위해서는 Tank의 압력을 설정치 이하 압력으로부터 밸브의 설정 압력이상까지 올릴 수 있는 별도의 장치가 필요하다. 밸브 전단 Tank의 압력을 낮은 압력으로부터 올리는 일반적인 방법과 이에 대한 해석 결과는 아래에 기술하였다.

Fig. 9는 RELAP5/MODE3 해석으로부터 얻을 수 있는 밸브의 방출 면적과 밸브 Junction 면적의 비를 Case II에 대해 나타낸 것이며 Case I는 Case II와 Junction 면적이

달라 비교하지 않았다. 밸브 방출 면적은 밸브의 스템 변위에 비례하므로 이 그림으로부터 밸브의 되 닫힘 시간이 매우 빠르며 밸브에 가해지는 충격량이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 스프링 사용 기구에서 일반적으로 나타나는 현상이며 안전밸브의 경우 열림 (Popping) 시간과 되 닫힘 (Reseating) 시간이 50 msec 보다 작다고 알려져 있다.

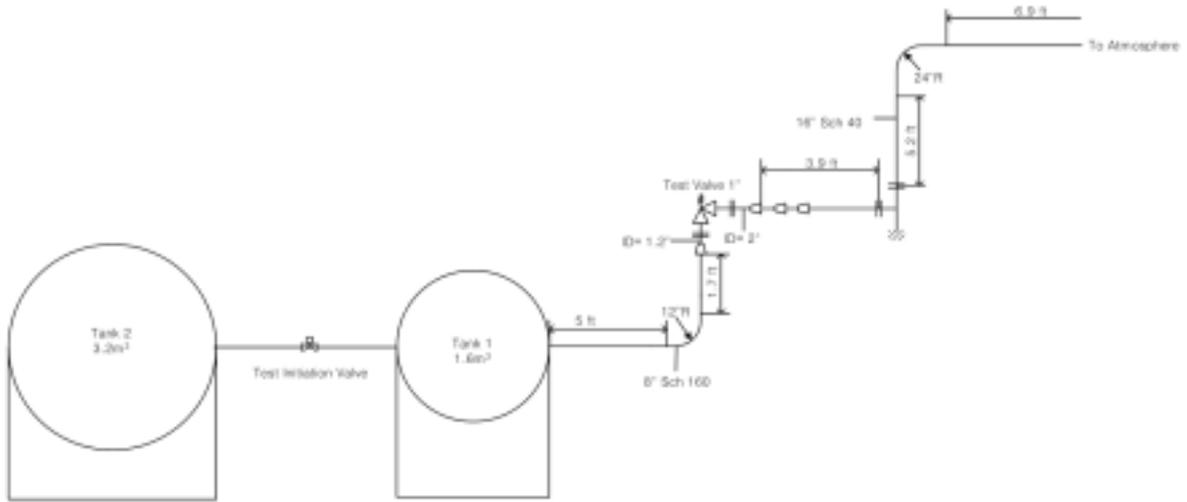


Fig. 10 Simplified schematic of the test facility for the blowdown test

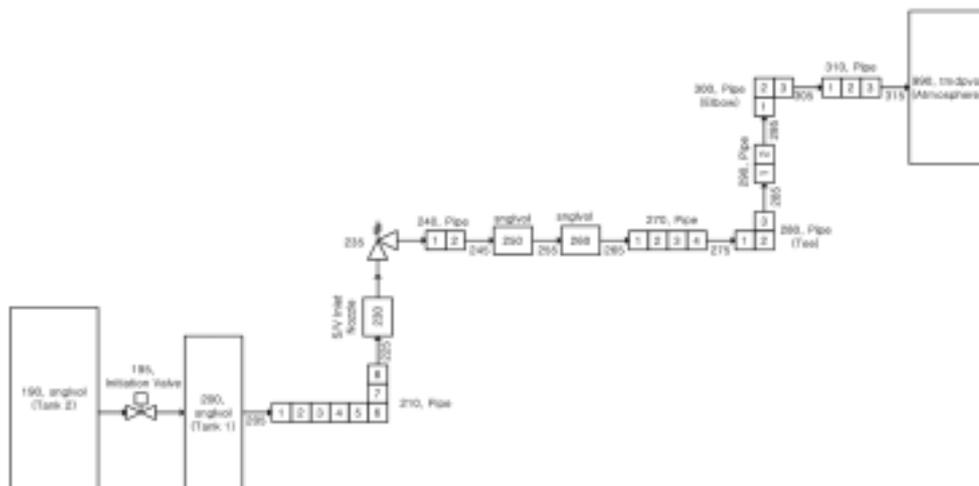


Fig. 11 RELAP5/MOD1 nodalization for the blowdown test facility (Case III)

안전밸브의 설정 압력의 적절성과 밸브의 Blowdown 요건에 대한 허용 여부를 확인하기 위해서는 Fig. 10과 같은 시험 장치가 필요하다. Tank 2의 압력은 Tank 1보다 높게 설

정되어 있고 Tank 2와 1사이에 있는 시험 개시 밸브가 열리기 전까지는 Tank 1의 압력은 밸브의 설정 압력보다 낮다. 시험 개시 밸브가 열리기 시작하면 Tank 2의 고압의 유체가 Tank 1로 유입되기 시작하고 Tank 2와 안전밸브에 가해지는 압력이 증가하여 밸브가 열리게 된다. 따라서 밸브 전단 압력 증가에 따른 밸브의 개방을 관찰할 수 있으며 밸브의 Popping 압력과 뒤 단힘 압력의 차를 측정하면 Blowdown도 계산할 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10의 시험 장치에 대한 Nodalization Diagram을 보여 준다 (Case III). Fig. 5와 이 그림을 비교해 보면 Tank 1의 후단에 있던 215번 시험 개시 밸브를 Tank2와 Tank 1 사이로 옮겼음을 알 수 있다. 계산시 Tank 2의 초기 압력은 Case I과 II의 모사에서 사용했던 Tank 압력과 동일한 10.78732×10^6 Pa (1564 psi)로 설정하였으며 Tank 1의 압력은 밸브 설정 압력의 90%에 가까운 8.335653×10^6 Pa (1209 psi)로 설정했다. 기타 조건은 Case II 모사시 사용했던 조건과 동일하다.

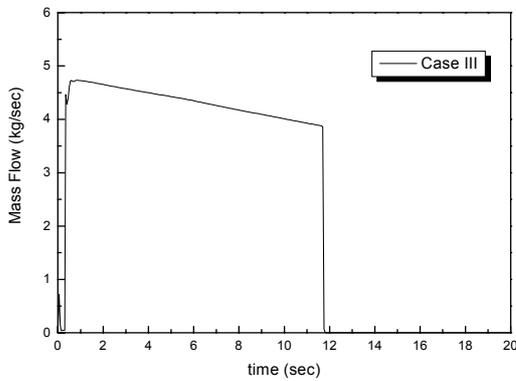


Fig. 12 Mass flow for Case III

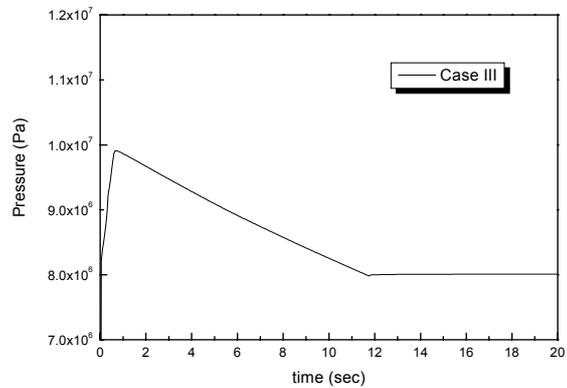


Fig. 13 Valve inlet pressure for Case III

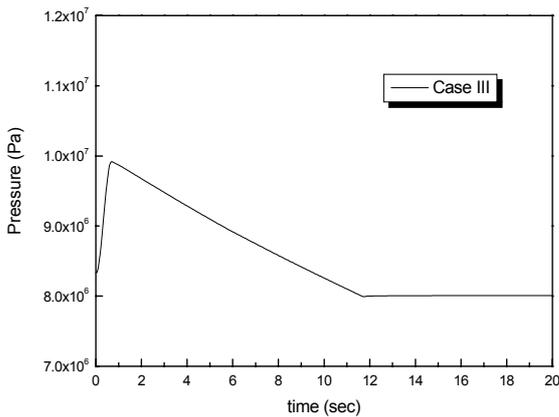


Fig. 14 Pressure of Tank 1 for Case III

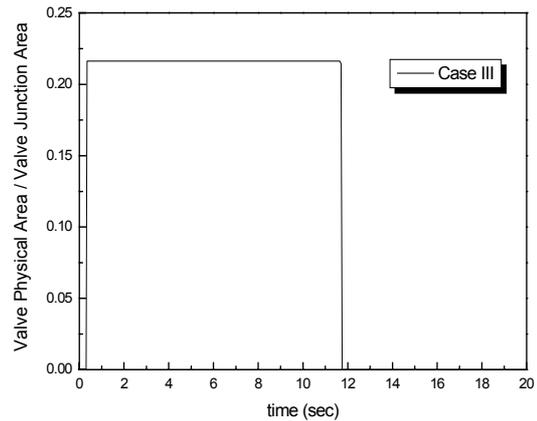


Fig. 15 Valve area ratio for Case III

Fig. 12~14는 Case III에 대한 질량 유량, 밸브 전단 압력, Tank 1의 압력 및 밸브 면적비의 시간에 따른 변화를 각각 보여 준다. 이들 그림으로부터 사실은 밸브 개방시간이 Case II에 비해 약 2배로 증가했다는 것을 첫 번째 알 수 있는데 이는 Tank 2의 추가에 의한 증기 용량에 기인한다. Fig. 7과 13을 비교해보면 Fig. 13의 초기 압력 증가 기울기가 Fig. 7에 비해 완만한데 이 영역에서 밸브 면적이 급격히 증가하는 위치를 찾으면 쉽게 밸브의 Popping 압력을 찾을 수 있다. Fig. 12의 최대 질량 유량은 Fig. 6의 최대치에 비해 작은 데 이것은 Tank 1의 압력 감소에 기인한다. Tank 1의 초기 압력은 Case II와 다르지만 밸브 방출 면적비는 Case II의 결과와 거의 동일함을 Fig. 9와 15의 비교를 통해 알 수 있다.

안전밸브에 있어 Blowdown은 계통의 과도한 감압을 방지하기 위해 필요한 변수이며 ASME PV&B Code의 Section III과 VIII에서는 주요 안전밸브에 대한 Blowdown 허용 기준을 규정하고 있다. 안전밸브의 Blowdown은 아래와 같이 밸브 Popping 압력과 되닫힘 압력의 차로 주어진다.

$$\text{Blowdown (\%)} = \frac{P_{\text{open}} - P_{\text{close}}}{P_{\text{open}}} \times 100 \quad (7)$$

여기서,

P_{open} = 밸브 Popping 압력 또는 열림 압력

P_{close} = 밸브 되닫힘 압력

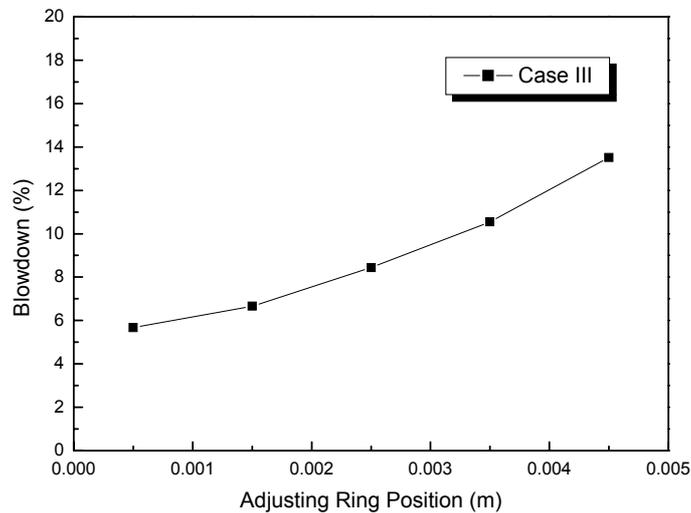


Fig. 16 Blowdown along with adjusting ring position for Case III

앞에서 말한바와 같이 Blowdown은 상부링의 위치, 배압, 스프링 강성에 의해 영향을 받는다. Fig. 16은 본 연구의 대상 밸브에 대한 Blowdown의 변화를 상부링의 위치에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 상부링의 위치는 밸브 Seat면을 기준으로 밸브 Seat면 아래로 내려간 거리로 결정했다. Fig. 16으로부터 상부링을 Seat면 아래로 내리면 내릴수록 Blowdown이 커진다는 것과 본 대상 밸브 최소 Blowdown이 5% 정도라는 것을 알 수 있다. 이 최소값은 가압기 안전밸브 등의 주요 안전밸브에 대한 최대 Blowdown 허용 기준에 접근한다. 같은 방법으로 배압 또는 스프링 강성 변화에 따른 Blowdown 변화를 평가할 수 있으며 이들은 밸브 설계시 Feedback 자료로 사용되거나 시험시 밸브 설정에 활용될 수 있다.

4. 결론

RELAP5/MOD3 코드는 현재까지 주로 안전해석과 계통의 과도 해석에 사용되어 왔으나 본 논문에서는 코드에 포함된 상세 밸브 모델을 이용하여 Blowdown 등 주요 밸브의 거동 변화를 예측하고 설계 또는 제작에 활용하는 방법에 대해 논의하였다. 또한, 현재 설계되고 있는 밸브와 용량 시험 설비에 대한 계산을 수행하여 밸브와 시험 설비의 적절성을 평가하였다. RELAP5/MOD3 코드를 이용하여 예측한 최대 질량 유량은 안전밸브 설계시 사용하는 Napier 식으로 계산한 유량과 10% 범위 내에서 일치하였으며 현재 시험 설비에 대해 평가한 밸브 전단압력 등은 배관 Nodalization 및 배관 마찰에 민감하게 영향을 받지 않았다. 또한 시험 설비의 배관 구성으로 인해 야기될 수 있는 밸브 거동의 불안정성도 나타나지 않았다. 밸브가 Blowdown 등 주요 밸브 요건에 대한 허용 기준을 만족하는 지 평가하기 위해 필요한 시험 방법을 제시하고 이 시험 설비의 유동 조건에 따른 밸브 거동을 예측했다. 상부링의 위치는 Blowdown 변화에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있는 데 모사 결과에서 이를 확인할 수 있었다.

1차원 열수력 코드를 이용하여 밸브 거동을 평가하고 해석 범위를 축소한 후 2차원 또는 3차원 상세 전산 코드를 이용하는 것이 안전 및 방출 밸브 설계시 효과적이라 판단되며 RELAP5/MOD3 코드는 가장 적합한 1차원 코드라고 판단된다. RELAP5/MOD3의 밸브 모델을 이용하면 밸브 설계 변수의 적절성을 평가할 수 있고 Parametric Study를 통한 설계 최적화도 가능하다. 또한, 이 코드는 단상 및 이상 유체 해석이 모두 가능하도록 개발되었으므로 물에 적용되는 방출 밸브 (Relief Valve) 설계와 안전 및 방출 밸브 시험 설비 설계에 활용될 수 있다.

후기

RELAP5/MOD3 코드 운용과 안전밸브 해석 방법에 도움을 준 원자력연구소 정해용박사에게 감사한다.

참고문헌

1. A. Singh "On the Stability of a Coupled Safety Valve-Piping System", in Testing and Analysis of Safety/Relief Valve Performance, ASME, 1983
2. A. Singh and D. Shak "A Correlation for Safety valve Blowdown and Ring Settings", in Testing and Analysis of Safety/Relief Valve Performance, ASME, 1983
3. A. Singh, A. M. Hecht and M. E. Teske "A Model for Predicting the Performance of Spring-Loaded Safety Valves ", in Testing and Analysis of Safety/Relief Valve Performance, ASME, 1983
4. M. A. Langerman "An Analytical Model of a Spring-Loaded Safety Valve", in Testing and Analysis of Safety/Relief Valve Performance, ASME, 1983
5. "Crosby® Pressure Relief Valve Engineering Handbook", Technical Document No. TP-V300, Crosby Valve Inc, 1997
6. "RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume I: Code Structure and System Models, and Solution Methods", Information Systems Laboratories, Inc., 2001