

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

**포화 증기 방출시 열수력 동하중 계산에 대한
RELAP5/MOD3.1 전산코드 평가**

**Assessment of RELAP5/MOD3.1 Computer Code
for Hydrodynamic Loads Calculation Following Saturated Steam Discharge**

이규복, 조인득, 이희도, 지계광

한국전력기술주식회사

경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

김창효

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

가압기 안전밸브 후단 배관으로 포화 증기가 방출되는 경우인 EPRI/CE Test 1411 실험에 대해 RELAP5/MOD3.1 전산코드를 이용하여 열수력 동하중을 계산하였으며, 실험 및 RELAP5/MOD1 코드 결과와 비교를 통해 동하중 계산에 대한 RELAP5/MOD3.1 코드의 적용성을 평가하였다. 실험 설비 자료, 초기 유체 조건, 배관 노드화 및 RELAP5 Option 등 입력 자료로 RELAP5/MOD1 과 동일한 값을 사용한 결과, RELAP5/MOD3.1 은 실험 및 RELAP5/MOD1 과 유사한 열수력 자료 및 동하중을 제공함을 알 수 있었다. 그러나, 열수력 자료 및 동하중의 최대치는 RELAP5/MOD1 보다 다소 적은 값을 예측하였다. 민감도 분석으로부터, 이러한 두 코드 사이의 최대치 차이는 RELAP5/MOD3.1 이 RELAP5/MOD1 보다 약 10% 적은 밸브 임계유량을 예측하기 때문이며, RELAP5/MOD3.1 의 밸브 임계유량이 RELAP5/MOD1 과 동일하도록 모사하는 경우 두 코드는 같은 열수력 결과 및 동하중을 계산할 수 있음을 확인하였다. 결론적으로, 가압기 안전밸브를 통해 포화 증기가 방출되는 경우 밸브 후단 배관 내 열수력 동하중 계산에 RELAP5/MOD3.1 을 사용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 가압기 안전밸브 임계유량은 후단 배관의 열수력 결과 및 동하중에 커다란 영향을 미치는 중요한 요소임을 확인하였다.

Abstract

Hydrodynamic loads are calculated using RELAP5/MOD3.1 computer code for the EPRI/CE Test 1411 which simulated steam discharge into the downstream piping of the pressurizer safety valve. The calculation results are compared with the experimental data as well as the RELAP5/MOD1 calculation to assess the applicability of the RELAP5/MOD3.1 for the hydrodynamic loads calculation. The input data applied to the RELAP5/MOD3.1 calculation, such as the experimental facility data, the initial fluid conditions, the system nodalization and the RELAP5 options, are identical to those used in the RELAP5/MOD1 calculation. It is demonstrated from the comparisons that the RELAP5/MOD3.1 yields similar hydraulic data and hydrodynamic loads with the experiment as well as the RELAP5/MOD1. However, the maximum values of the hydraulic data and hydrodynamic loads are a little bit smaller than those of RELAP5/MOD1. From sensitivity studies, it is shown that those discrepancies results from the fact that the RELAP5/MOD3.1 predicts the smaller critical flow rates through the valve than the RELAP5/MOD1, and the two codes can calculate the same hydraulic results and hydrodynamic loads if the valve critical flow rate of the RELAP5/MOD3.1 is simulated to be identical to that of the RELAP5/MOD1. Therefore, it is concluded that the RELAP5/MOD3.1 computer code can be used to calculate the hydrodynamic loads following the saturated steam discharge through the pressurizer safety valve. In addition, it is confirmed that the critical flow rate through the pressurizer spray valve is an important factor and has a significant effect on the hydraulic results and hydrodynamic loads of the valve downstream piping.

1. 서 론

일반적으로 원자력발전소의 배관 설계에서는 배관 자체의 건전성 뿐 아니라 배관 지지대 및 노즐 등의 건전성이 확보되도록 여러 하중을 설계에 고려한다. 설계에 반영되어야 하는 하중으로는 자중(deadweight), 지진 하중, 열팽창 하중, 과도상태 열수력 동하중 등이 있다. 이 중에서 과도상태 열수력 동하중은 밸브의 빠른 개폐, 배관 파단 등 계통 내 열수력 상태의 변화에 의해 발생된다. 특히 가압기 안전밸브(Pressurizer Safety Valve) 배관 계통의 경우, 밸브 개방시간이 매우 빠르고 고온 고압의 유체가 방출되므로 안전밸브 후단 배관 내의 열수력 과도현상은 매우 급격하고 복잡한 형태를 나타낸다. 따라서, 배관 계통 설계를 위해서는 이와 같은 급격한 과도상태를 적절히 모사하고 그 결과를 동하중으로 변환할 수 있는 전산코드의 확보가 필수적이다.

미국전력연구원(EPRI)이 안전방출밸브 실험 프로그램(Safety and Relief Valve Test Program)^[1]을 통해 RELAP5/MOD1^[2] 전산코드가 가압기 안전밸브 후단배관의 열수력 동하중을 적절히 예측할 수 있음을 입증한 이래 이 코드가 가압기 안전밸브를 비롯한 원전의 이차

계통 배관계 열수력 동하중 분석에 주로 사용되어 왔다. RELAP5 전산코드는 미국원자력규제위원회(USNRC) 주관 하의 국제공동연구를 통해 지속적으로 개발되어 최근에는 RELAP5/MOD3.3Beta 버전까지 배포된 바 있으나, 새로운 RELAP5 버전에는 국제적인 열수력 연구를 통해 개발된 새로운 상관식 및 모델 등이 포함되므로 새로운 버전을 동하중 분석에 적용하기 위해서는 그 적합성이 별도로 평가되어야 한다.

RELAP5/MOD3^[3] 계열에 대한 평가로는 우선 1994년 미국원자력규제위원회에서 발행한 NUREG/IA-0093^[4] 보고서를 들 수 있다. 이 보고서에서는 적합한 RELAP5 Option 을 사용하고 계산 결과에 적절한 여유도를 적용한다면 RELAP5/MOD3/5m5 버전도 동하중 분석에 사용할 수 있음을 보여주고 있다. 이 보고서의 분석 대상은 안전밸브 전단 Loop Seal 내에 고여있던 고온의 물이 밸브 개방과 함께 방출되는 경우인 EPRI/CE Test 917 에 대한 분석만 수행하였으나 RELAP5/MOD3 계열 코드의 열수력 동하중 분석에 적용 가능성을 제시했다는 데 그 의미가 있다.

본 분석에서는 가압기 안전밸브를 통해 포화 증기가 방출되는 경우인 EPRI/CE Test 1411 에 대해 RELAP5/MOD3.1 버전을 이용하여 열수력 동하중을 계산하였으며, 실험 및 RELAP5/MOD1 결과와 비교 분석을 통해 가압기 안전밸브를 통해 포화 증기가 방출되는 경우 동하중 계산에 본 코드의 적용성을 평가하였다. 또한, 민감도 분석을 통해 배관 열전달 및 안전밸브 임계유량이 후단 배관에 미치는 영향을 평가 하였다.

2. 동하중 계산 절차 및 전산코드

2.1 계산 절차

열수력 과도현상 발생시 동적 평가를 통한 배관 계통 설계는 일반적으로 크게 세 단계로 구분되어 수행된다. 먼저, 밸브의 순간적인 개폐, 배관 파단 및 펌프의 오작동 등에 의한 과도상태 열수력 분석이 RELAP5 와 같은 열수력 코드를 통해 수행된다. 열수력 분석을 통해 얻어지는 유체의 압력, 속도, 밀도 등과 같은 열수력 변수들은 REFORC, CALPLOTFIII, R5FORCE 등과 같은 동하중 계산용 전산코드의 입력으로 사용되며, 계산된 동하중은 배관 및 지지대, 노즐 등의 응력 해석시 배관 응력 해석 코드의 입력으로 사용된다.

2.2 RELAP5

RELAP5 전산코드는 기본적으로 원자력발전소 내의 다양한 열수력 과도상태를 모사하기 위해 개발된 열수력 계통 코드이나 미전력연구원이 안전방출밸브 실험 프로그램을 통해 RELAP5/MOD1 전산코드가 가압기 안전밸브 후단 배관의 열수력 동하중을 적절히 예측할 수 있음을 입증한 이래 본 코드가 가압기 안전밸브를 비롯한 원전의 이차계통 배관계 열수

력 동하중 분석에도 사용되어 왔다. 이후 개발된 RELAP5/MOD3.1 코드에는 국제적인 열수력 연구 결과를 반영한 새로운 상관식 및 개선된 모델 등이 다수 포함되어 있다. 특히, 두 코드의 가장 큰 차이점은 기본방정식에서 발견할 수 있는데, RELAP5/MOD1은 5개의 방정식(2개의 질량방정식, 2개의 운동량방정식 및 1개의 에너지방정식)을 사용하는 반면 RELAP5/MOD3.1은 6개의 방정식(2개의 질량방정식, 2개의 운동량방정식 및 2개의 에너지방정식)을 기본방정식으로 사용한다. 즉, 에너지방정식의 경우 RELAP5/MOD1은 기상 및 액상을 구분하지 않고 하나의 방정식만을 사용하는데 반해 RELAP5/MOD3.1 버전에서는 기상 및 액상에 대해 별도의 기본방정식을 사용한다.

2.3 REFORC^[5]

본 분석에서는 동하중 계산용 코드로 REFORC를 사용하였다. REFORC는 RELAP5 결과를 입력으로 사용하여 동하중을 계산하는 후처리전산프로그램(Postprocessor)으로서 운동량평형법^[6]을 사용하여 제어체적 내 동하중을 계산한다. 운동량평형법은 제어체적에서 유체 운동량의 시간변화율로 요소에 작용하는 최종적인 힘을 계산하는 방법이다. 운동량평형법에서 배관에 작용하는 힘은 Newton의 제2법칙으로부터 유도되며 파동하중(Wave Force) 또는 가속도하중(Acceleration Force), 취출하중(Blowdown Force), 중력하중(Gravity Force) 등 세 개의 항으로 구성된다. 중력하중은 다른 두 항에 비해 상대적으로 작은 값을 갖는 항이므로 일반적으로 무시되는 항이다.

파동하중(F_w)은 운동량의 변화량을 나타내는 것으로서 유체의 흐름 방향을 양의 방향으로 정의 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$F_w = - \int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho v) dV \quad (1)$$

취출하중(F_B)은 배관계에서 외부로 방출되는 끝단 배관에서만 나타나는 하중으로서 다음과 같이 배관 끝단에서 대기와 압력차 및 방출 속도로 표현된다.

$$F_B = -A \{ (P - P_\infty) + \rho v^2 \} \quad (2)$$

REFORC에서는 이러한 운동량평형법에 기초하여 각 노드 체적에 대해 하중을 계산하며, 직관배관 전체에 작용하는 동하중(F)은 다음과 같이 각 노드에서 계산된 하중을 합하여 근사한다.

$$F = F_W + F_B \quad (3)$$

$$F_W = -\sum_j \frac{\partial}{\partial t} [(\alpha_{gj} \rho_{gj} v_j + \alpha_{ff} \rho_{ff} v_{ff}) V_j] \quad (4)$$

$$F_B = -A[(P - P_\infty) + \alpha_g \rho_g v_g^2 + \alpha_f \rho_f v_f^2] \quad (5)$$

한편, EPRI 에서 수행한 RELAP5/MOD1 을 이용한 동하중 계산시에는 RELAP5/MOD1 전산코드 자체를 수정하여 동하중이 계산되도록 하였으며, 별도의 후처리프로그램을 사용하지는 않았다. 사용한 동하중 계산 이론은 REFORC 와 동일한 운동량평형법이다.

3. CE 설비 및 실험

3.1 CE 실험 설비^[1]

EPRI 의 안전밸브 후단 배관 열수력 동하중 실험은 CE 실험 설비를 이용하여 수행되었으며, 본 실험 설비는 실제 발전소와 유사한 유체 조건 및 밸브 유량에 대해 실험을 수행할 수 있도록 설계 제작되었다. 설비는 탱크, 밸브 및 관련 배관들로 구성되어 있으며 순환 펌프 및 가열기가 탱크의 유체 조건을 일정하게 유지하는데 사용되었다. 밸브 전단 배관에는 U자 형태 Loop Seal 이 있어 Loop Seal 내 물 방출에 이은 증기 방출을 실험할 수 있다. 실험 설비의 배관 길이 및 크기는 표 1 에 제시되어 있으며, 그림 1 은 CE 실험 설비의 개략도를 나타내고 있다.

3.2 증기방출 실험(Test 1411)^[1]

EPRI/CE Test 1411 은 가압기 안전밸브를 통하여 포화 증기가 지속적으로 방출되는 경우를 모사하기 위하여 수행되었다. 밸브가 개방되기 시작하는 시점에 탱크 압력은 2410 psia 이며 0.5 초 이후에 2540 psia 까지 도달하였다. 온도 측정 결과 증기 누설로 인해 과도상태가 시작되기 전 밸브 후단 배관의 온도는 약 212 °F 로 유지되고 있었으며, 따라서 밸브가 개방되기 전에 이미 후단 배관에는 증기가 일정량 존재한다는 것을 알 수 있다. 실험에서는 이러한 증기의 양은 측정되지 않았으며 RELAP5 분석에서는 초기 건도(quality)로 0.9 를 사용하여 증기의 존재를 모사하였다. 그러나 증기로부터 배관 벽으로 열이 전달됨으로 인해 밸브 후단 배관 내 건도는 배관의 위치에 따라 상당한 편차가 있을 것으로 추정된다. 특히, 세번째 배관의 경우 대기에 노출된 수평 배관이므로 응축수가 모여 공기와 성층을 이루고 있을 가능성이 높다. 밸브는 Crosby 6M6 를 사용하였으며 밸브의 유로 면적은 0.0232 ft² 이다.

4. RELAP5 모델링

EPRI에서 수행한 RELAP5/MOD1 모델링은^[1] 실제 실험과 약간의 차이를 보인다. 먼저, 밸브를 통한 유량을 실험치와 일치시키기 위해 공급자가 제공하는 밸브면적의 0.88 배 즉 0.0204 ft²을 밸브의 면적으로 사용하였다. 이 면적은 실제 밸브 Stem 위치가 0.48 inch 인 경우의 면적에 해당한다. 일반적으로 밸브의 개방 특성은 후단 배관 동하중에 커다란 영향을 미치는 요소 중의 하나이므로 코드 분석에서 이를 실험과 유사하게 모사하는 것은 매우 중요하다. RELAP5 모델링에서 밸브 개방은 면적 기준으로 0.005 초까지 10%, 0.01 초까지 80%, 0.015 초에 완전 개방되는 것으로 모사하였으며, 각각의 시간 구간 사이에서는 선형 개방되는 것으로 가정하였다. 그림 2에는 밸브 Stem 위치 기준으로 실제 실험에서의 밸브개방 형태와 RELAP5에서 모사한 밸브 개방 형태를 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 실제 밸브의 개방 비율과 RELAP5 모델링에서의 개방비율이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

밸브 전단의 탱크는 과도상태 전 기간 동안 포화 증기 상태를 유지하며, 압력은 밸브 개방 시점의 2410 psia 에서 2540 psia 까지 0.5 초 동안 선형으로 증가하는 것으로 모사하였다.

또한, 배관 노드 크기, 시간 간격, 각종 RELAP5 Option 및 배관을 통한 열전달 등에 대한 EPRI의 RELAP5/MOD1 모델링은 다음과 같으며, 계통 Nodalization Diagram 은 그림 3에 나타내었다.

- ① 밸브 후단 배관의 제어체적의 길이는 0.5 ft-1.0ft 사이의 값으로 제한
- ② 시간 간격은 Courant Limit 이내로 제한
- ③ 밸브 후단 배관의 'Choking' option 은 마지막 직관의 대기 방출 부위에만 적용
- ④ 배관 벽으로 열전달을 고려하기 위해 'heat slab' 모델링

RELAP5/MOD3.1 계산을 위한 모델링에서는 밸브 면적 및 개방 특성, 밸브 전단 탱크 내 유체 조건, 밸브 후단 배관 내 초기 유체 조건, 계통 노드화, 시간 간격, RELAP5 Option 및 배관 열전달 등 대부분의 입력은 EPRI의 RELAP5/MOD1 모델링과 동일한 값을 사용하였다.

5. 계산 결과

그림 4 및 5에는 안전밸브 후단 배관 내 두 지점의 압력을 비교하였다. 그림으로부터 밸브 직후단 배관(PT09) 및 두 번째 직관 하단부(PT10)에 대한 MOD3.1 압력 계산 결과는 실험과 비교적 잘 일치하나 MOD1 계산 결과 보다는 다소 적은 값을 예측함을 알 수 있다.

RELAP5의 열수력 자료를 사용하여 계산한 각 직관의 동하중은 그림 6부터 그림 9에 나타내었다. 그림 6 및 7은 각각 첫 번째 및 두 번째 직관의 동하중을 비교한 것으로서,

MOD3.1 및 MOD1 모두 실험 결과를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다. 밸브 개방 직후 첫 번째 최대 하중 이후 나타나는 실험 결과의 진동현상은 열수력 하중에 대한 실험설비의 동적 구조응답(dynamic structural response)에 의한 하중으로서 순수한 열수력 하중과는 구분된다. 일반적으로, 실험설비에서 측정되는 하중은 두 가지 종류의 하중이 조합된 결과이다^[1]. 첫째는 계통의 열수력 과도상태로부터 발생하는 순수한 열수력 하중이 그것이며, 둘째는 이러한 열수력 하중에 대한 배관 및 지지대 등 구조물의 동적 구조응답에 의한 하중이 그것이다. 실험설비의 강성도(stiffness)를 크게 설계할수록 구조응답에 의한 하중은 작아지게 되며 측정된 하중은 순수한 열수력 하중에 근접하게 된다.

그림 8은 세 번째 직관의 동하중을 비교한 것으로서 RELAP5/MOD3.1 및 RELAP5/MOD1 분석 결과가 실험치와 비교적 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 RELAP5 분석에서 사용한 밸브 후단 배관 내의 초기조건이 실제 실험의 값과 차이가 크기 때문인 것으로 판단된다^[1]. 즉, 밸브 개방 이전에 이미 후단 배관 내에는 밸브로부터 누설된 증기가 존재하게 되는데 증기로부터 배관 벽으로 열이 전달됨으로 인해 밸브 후단 배관 내 건도는 배관의 위치에 따라 상당한 편차가 있을 것으로 추정된다. 특히, 세 번째 배관은 대기에 노출된 수평 배관이므로 증기 응축수가 모여 공기와 성층을 이루고 있을 것으로 판단된다. 따라서, 세 번째 배관 내 RELAP5 동하중이 실험과 차이를 보이는 이유는 후단 배관 내의 건도 및 응축수의 성층화 현상 등이 RELAP5 초기조건에 적절히 반영되지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 실험 결과와 차이는 MOD3.1 및 MOD1 에서 동일하게 발생하고 있으며 두 코드 버전은 동하중의 최대치 및 경향 관점에서 서로 유사한 결과를 제공함을 알 수 있다.

그림 9에는 네 번째 직관의 동하중을 비교하였다. 그림에서 보면, 0.2 초 근처의 차이를 제외하고는 전반적으로 두 코드 버전 모두 실험 결과를 잘 모사하는 것을 알 수 있다. 0.2 초 근처에서 보이는 실험치의 침투 현상은 세 번째 직관의 불일치 원인이 네 번째 직관에도 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

전반적으로 볼 때 세 번째 직관의 경우를 제외하면 RELAP5/MOD3.1은 안전밸브 후단 배관에 작용하는 동하중을 적절히 예측할 수 있으며 RELAP5/MOD1과도 유사한 결과를 제공함을 확인할 수 있다. 그러나, 동하중의 최대치는 압력 계산 결과와 마찬가지로 MOD3.1이 MOD1보다 다소 적은 값을 예측함을 알 수 있다.

6. 민감도 분석

6.1 배관 열전달

Loop Seal 내 고온의 물이 방출되는 경우인 EPRI/CE Test 917에 대해 RELAP5/MOD3/5m5를 이용하여 분석한 NUREG/IA-0093 보고서에서는 배관으로의 열전달 영향이 미미하므로

'heat slab'은 모델링할 필요가 없음을 제안하였다. 이는 'heat slab'을 모델링할 것을 제안했던 EPRI의 RELAP5/MOD1 분석과 가장 큰 차이 중의 하나이다. 본 민감도 분석에서는 포화 증기가 방출되는 Test 1411의 경우에도 이러한 제안이 타당한지 여부를 검증하기 위하여 배관의 'heat slab'을 제거하고 분석을 수행하였으며 결과를 그림 10 및 11에 제시하였다.

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 'heat slab' 모델링 여부에 따라 MOD3.1 결과는 별다른 차이를 보이지 않았다. 따라서, 포화 증기 방출의 경우에도 배관 벽을 통한 열전달 현상이 후단 배관 내 열수력 현상 및 동하중에 미치는 영향은 미미하며, RELAP5/MOD3.1 분석시 'heat slab'은 모델링할 필요가 없음을 알 수 있다.

6.2 밸브 임계유량

그림 4부터 그림 9에서 확인한 바와 같이 RELAP5/MOD1과 동일한 입력을 사용하여 RELAP5/MOD3.1로 분석한 결과, 압력 및 동하중 모두 MOD3.1이 MOD1보다 다소 적은 값을 예측하였다. 이는 두 코드에서 계산한 밸브 임계유량이 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다. 두 코드를 비교한 이전 경험^[7]에 의하면 2500 psia의 포화증기 방출시 밸브 임계유량은 MOD3.1이 MOD1보다 약 10% 적은 값을 예측함을 알 수 있었다. EPRI/CE Test 1411의 경우도 이와 유사한 조건의 유체를 방출하므로 밸브 임계유량은 MOD3.1이 MOD1보다 약 10% 적게 예측되었을 것으로 예상된다. 따라서, 본 민감도 분석에서는 밸브 임계 유량이 후단 배관에 미치는 영향을 평가하기 위하여 MOD3.1의 밸브 임계유량을 10% 증가시킨 후 후단 배관의 열수력 및 동하중 결과를 비교하였다. MOD3.1의 밸브 임계유량은 밸브 면적을 10% 증가시킴으로써 증가하도록 하였으며, 이는 MOD3.1 임계유량이 MOD1과 같아짐을 의미한다.

그림 10에서 보면 밸브를 통한 임계유량이 같아짐으로써 MOD3.1의 밸브 후단 압력이 MOD1과 일치함을 알 수 있으며, 그림 11의 동하중 최대치도 MOD1과 같아짐을 알 수 있다. 따라서, 그림 4부터 그림 9에 보이는 두 코드 결과의 차이는 MOD3.1이 MOD1보다 약 10% 적은 밸브 임계유량을 예측하기 때문임을 알 수 있으며, 안전밸브를 통한 밸브 임계유량이 같아지도록 모사하는 경우 MOD3.1은 MOD1과 동일한 열수력 결과 및 동하중을 계산할 수 있음을 확인할 수 있다. 이러한 민감도 분석 결과는, 포화 증기 방출시 밸브 임계유량은 후단 배관의 열수력 결과 및 동하중에 커다란 영향을 미치는 중요한 요소임을 의미한다.

7. 결 론

RELAP5/MOD3.1 전산코드를 이용하여 가압기 안전밸브를 통해 포화 증기가 방출되는 경우인 EPRI/CE Test 1411에 대해 열수력 동하중을 계산하였으며, 실험 및 RELAP5/MOD1 결과와 비교 분석을 통해 동하중 계산에 RELAP5/MOD3.1 코드의 적용성을 평가하였다.

실험 설비 자료, 초기 유체 조건, 배관 노드화 및 RELAP5 Option 등 입력 자료로 RELAP5/MOD1 과 동일한 값을 사용한 계산 결과, 세 번째 직관의 경우 실험과 차이를 보이는 하나 전반적으로 볼 때 가압기 안전밸브를 통해 포화 증기가 방출되는 경우 RELAP5/MOD3.1 은 실험 및 RELAP5/MOD1 과 유사한 결과를 제공함을 알 수 있었다. 그러나, RELAP5/MOD3.1 전산코드가 예측한 열수력 자료 및 동하중의 최대치는 RELAP5/MOD1 보다 다소 적은 값을 예측하였다. 민감도 분석으로부터, 그림 4 에서 그림 9 에 보이는 이러한 두 코드 사이의 최대치 차이는 RELAP5/MOD3.1 이 RELAP5/MOD1 보다 약 10% 적은 밸브 임계유량을 예측하기 때문이며, RELAP5/MOD3.1 의 밸브 임계유량이 RELAP5/MOD1 과 동일하도록 모사하는 경우 두 코드는 같은 열수력 결과 및 동하중을 계산할 수 있음을 확인하였다. 또한 민감도 분석에서는 배관을 통한 열전달 현상이 후단 배관 내 열수력 현상 및 동하중에 미치는 영향은 미미하므로 RELAP5/MOD3.1 분석시 'heat slab'은 모델링할 필요가 없음을 확인하였다.

결론적으로, 가압기 안전밸브를 통해 포화 증기가 방출되는 경우 밸브 후단 배관 내 열수력 동하중 계산에 RELAP5/MOD3.1 을 사용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 가압기 안전밸브 임계유량은 후단 배관의 열수력 결과 및 동하중에 커다란 영향을 미치는 중요한 요소임을 확인하였다.

8. 참고문헌

- [1] Langerman, M. A., et al., "Application of RELAP5/MOD1 for Calculation of Safety and Relief Valve Discharge Piping Hydrodynamic Loads," EPRI NP-2479, EPRI, 1982.
- [2] Victor H. Ransom, et al., "RELAP5/MOD1 Code Manual Volume 1: System Models and Numerical Methods (Draft)," NUREG/CR-1826, EGG-2070, NRC, November 1980.
- [3] K. E. Carlson, et al., "RELAP5/MOD3 Code Manual Volume 1: Code Structure, System Models, and Solution Methods (Draft)," EG&G Idaho, June 1990.
- [4] Stubbe, E. J., et al., "RELAP5/MOD3 Assessment for Calculation of Safety and Relief Valve Discharge Piping Hydrodynamic Loads," NUREG/IA-0093, NRC, 1994.
- [5] Pichurski D. J., REFORC-DEC: A Computer Program for Calculating Fluid Forces Based on RELAP5 Results, S&L Program Number REF 03.7.483-1.0, Sargent & Lundy, January 1994.
- [6] Lahey, Jr., R. T., and Moody, F. J., "The Thermal-Hydraulics of A Boiling Water Nuclear Reactor," American Nuclear Society, 1979.
- [7] Kyubok Lee, Heedo Lee, Inchul Ryu, and G.C. Park, "Thermo-hydraulic Transient Load Analysis for the Safety Depressurization System Discharge Line Using RELAP5/MOD1 and RELAP5/MOD3.1," Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, ASME, July 1999.

표 1 CE 실험설비 배관 길이 및 크기

Segment	Schedule	Area(ft ²)	Length(ft)	Inclination
1	6" Sch. 40	0.2006	5.5	Horizontal
2	6" Sch. 40	0.2006	6	Vertical Down
2	12" Sch. 80	0.7058	15	Vertical Down
3	12" Sch. 80	0.7058	43.4	Horizontal
4	12" Sch. 80	0.7058	1.5	Vertical Up

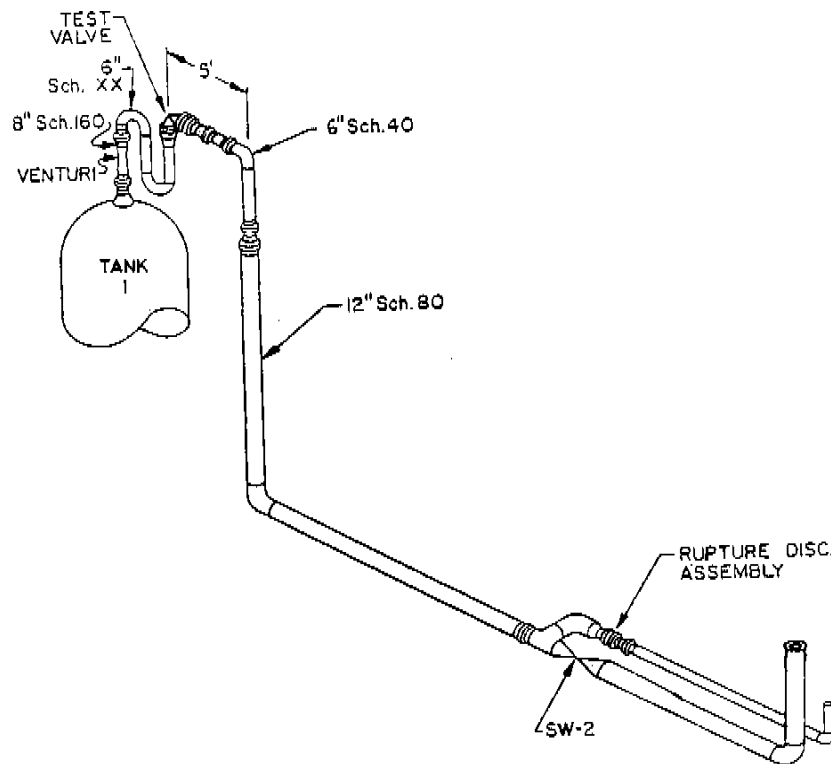


그림 1 CE 실험 설비 개략도

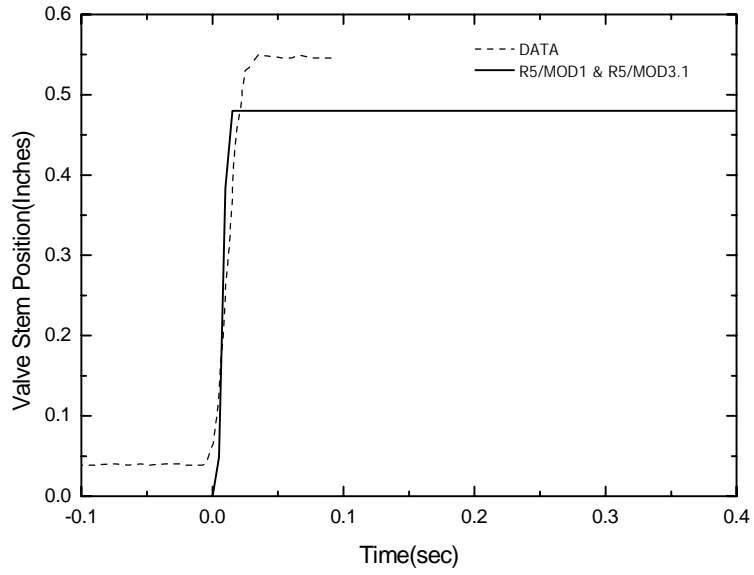


그림 2 실제 안전밸브 개방 및 RELAP5 모델링 비교

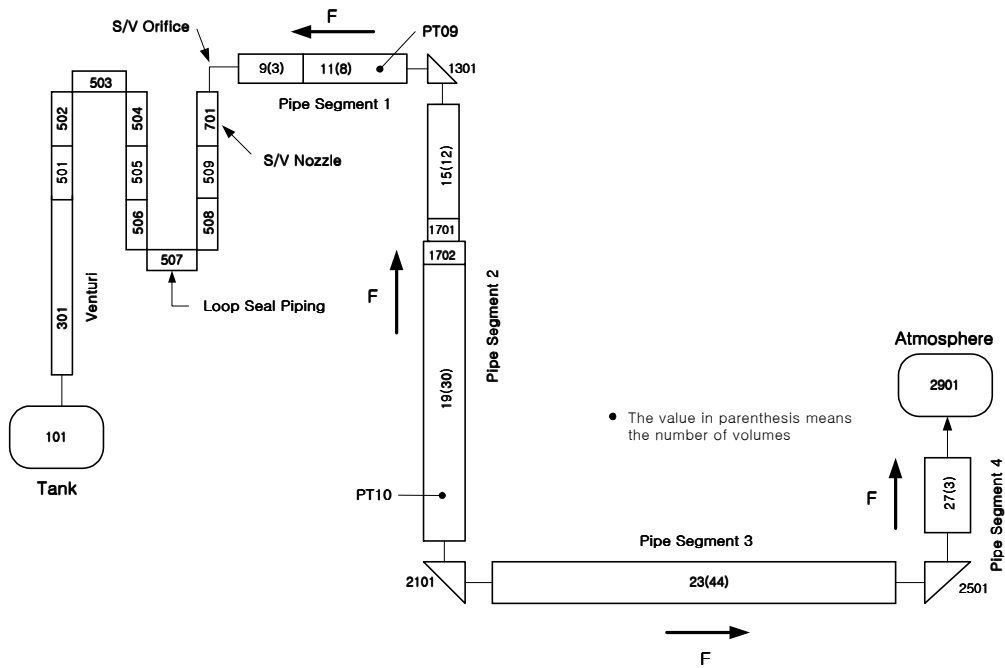


그림 3 CE 실험설비에 대한 RELAP5 Nodalization Diagram

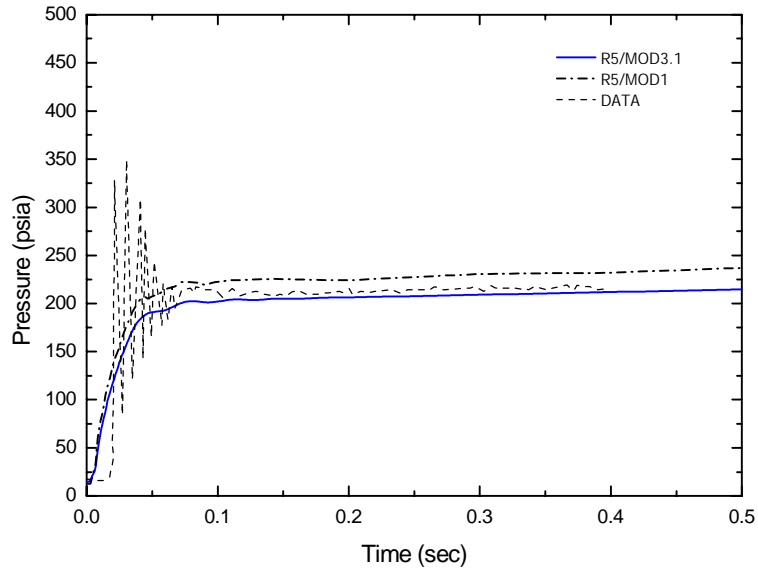


그림 4 PT09 지점의 압력 비교

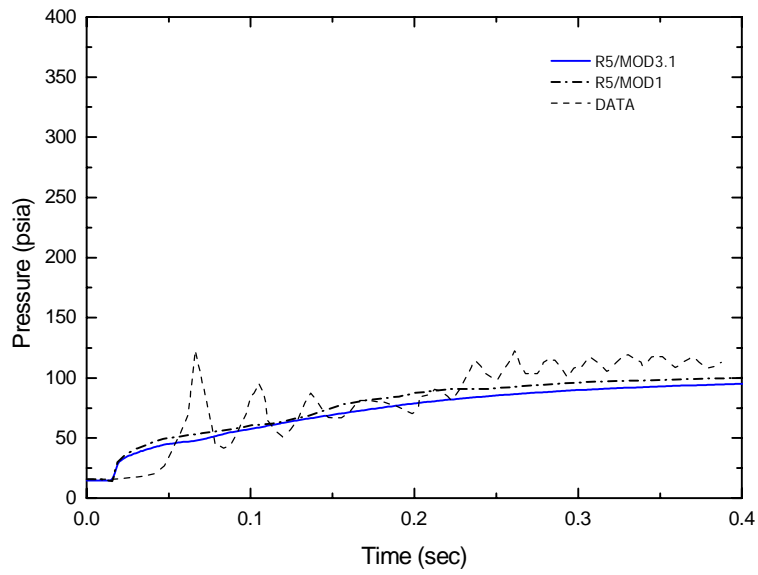


그림 5 PT10 지점의 압력 비교

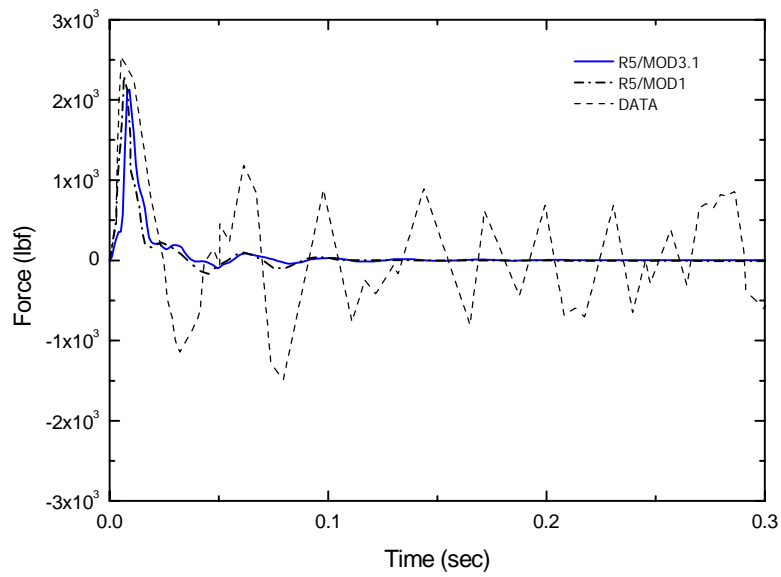


그림 6 첫 번째 직관의 동하중 비교

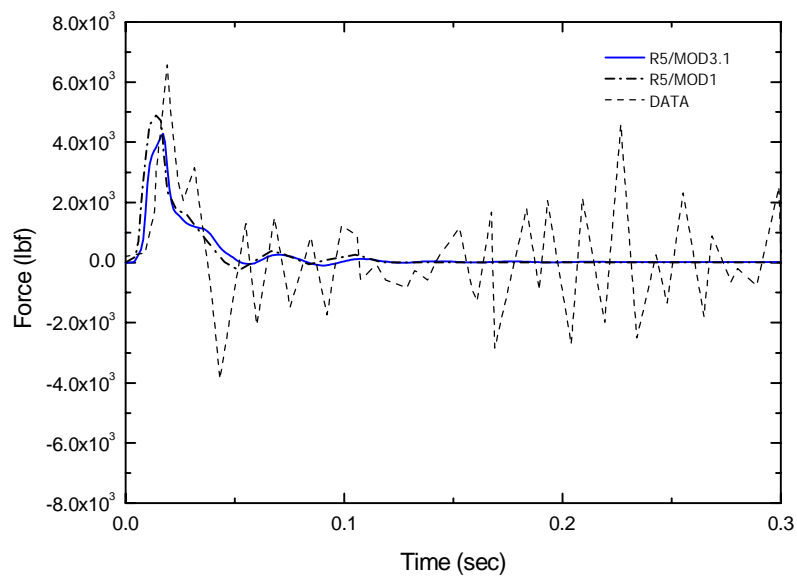


그림 7 두 번째 직관의 동하중 비교

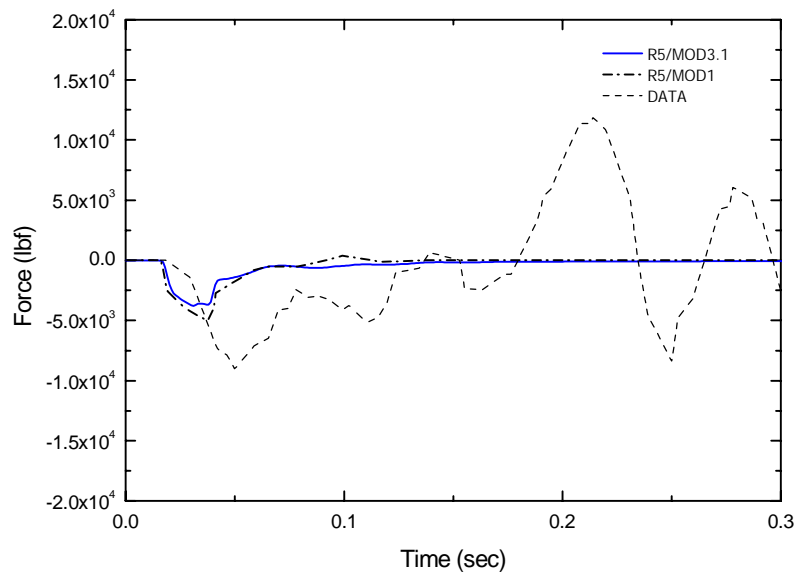


그림 8 세 번째 직관의 동하중 비교

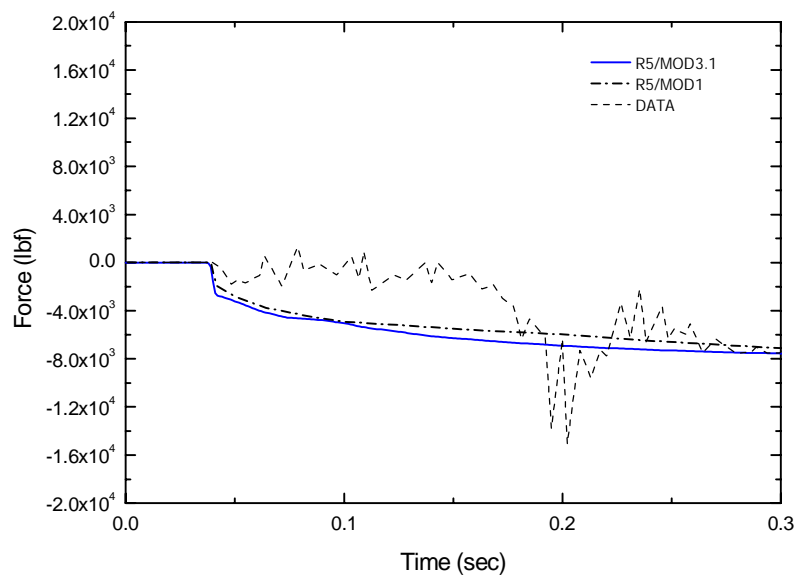


그림 9 네 번째 직관의 동하중 비교

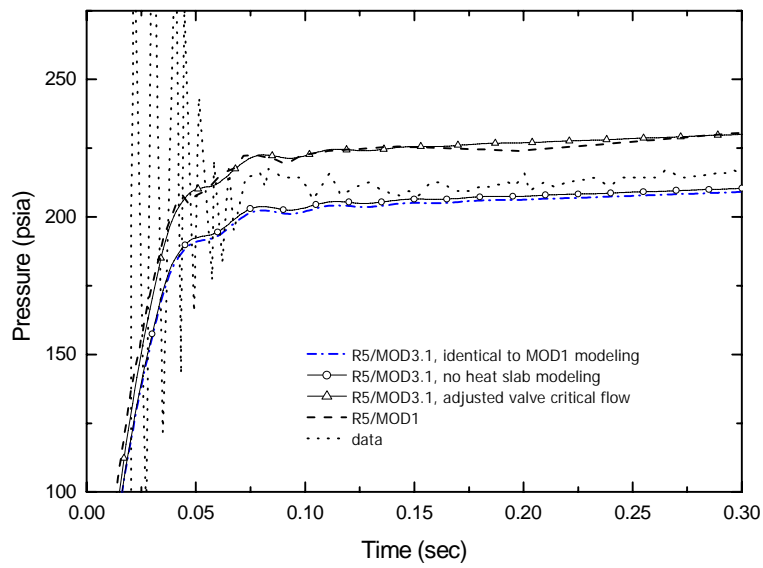


그림 10 민감도 분석 결과 (PT09 지점 압력 비교)

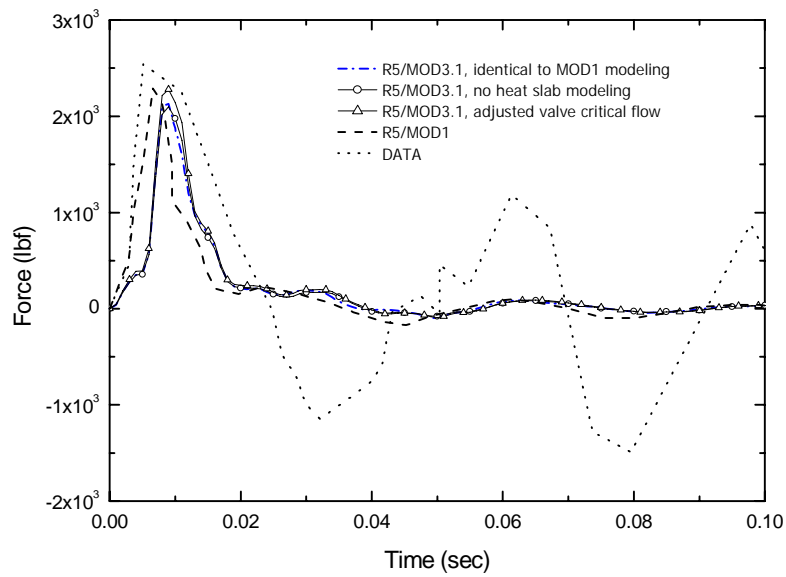


그림 11 민감도 분석 결과 (첫 번째 직관 동하중 비교)