

RELAP5/MOD3.1을 이용한 POSRV 단힘에 따른 방출배관 재침수 수위 예비평가

Preliminary Evaluation of Reflooding Height in POSRV Discharge Line Following POSRV Closure

정재식, 라인식, 도규봉, 고희진, 이세원

한국전력기술(주)

경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

요 약

RCS 과압보호를 위해 차세대원전에 채택된 안전감압배기계통(SDVS)은 가압기 상부에 부착된 POSRV 개방을 통해 RCS 증기를 IRWST로 방출함으로써 안전 감압 기능을 수행한다. 밸브를 통해 방출된 증기는 IRWST 물속에 잠겨있는 Sparger를 통해 최종적으로 온도가 낮은 IRWST 물로 방출되어 효과적으로 응축된다. 증기의 방출로 RCS 압력이 밸브 단힘 설정치 이하로 떨어지면 POSRV는 닫히게 되고 RCS 증기의 방출은 종료된다. 이때 방출배관 끝단에 IRWST 물과 접하고 있는 증기는 응축되기 시작하고, 배관내 압력은 IRWST 압력보다 낮아져 IRWST 물이 수직 배관을 역류하는 재침수 현상이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 RELAP5/MOD3.1을 이용하여 증기 방출 및 응축시의 재침수 수위를 계산할 수 있는 분석방법론을 개발하였고 동 수위 변화를 평가하였다. 분석 결과 Vacuum Breaker설치에 의해 증기응축에 의한 수위 증가를 충분히 완화시킬 수 있으며 Vacuum Breaker 유로 면적이 수직 배관 면적에 비해 매우 작더라도 증기응축에 의한 수위 증가를 충분히 감소시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

Abstract

The SDVS adopted in KNGR for overpressure protection of RCS performs its function by discharging RCS steam, which is discharged by means of the opening of POSRVs attached to the upper dome of the Pressurizer, into the IRWST. The steam through the POSRVs is discharged through a sparger into the IRWST water and condensed effectively by cold IRWST water. The POSRVs begin to close and steam discharge is terminated if RCS pressure goes down below the set pressure of POSRV and then the steam contacting with cold IRWST water at the sparger end is condensed. Therefore, the pressure within the sparger end become lower than that of IRWST water and the reflooding phenomena can occur such that the water in the IRWST draws into the pipe. In the paper, the methodology to calculate the reflooding height is developed and the variation of the height is evaluated. As a result of the evaluation, the vacuum breaker can mitigate the increase of the water level sufficiently and, with the flow area of the vacuum breaker much smaller than that of the pipe, it can reduce adequately the reflood height induced by steam condensation.

1. 서론

차세대원전의 경우 가압기 압력방출 밸브인 POSRV (Pilot Operated Safety Relief Valve)가 개방되면 고온, 고압의 증기가 방출배관 계통을 통해 최종적으로 IRWST 물로 방출된다. 방출된 증기는 초기 배관계통에 존재하는 물과 공기에 이어 IRWST로 방출되고 IRWST 물에 의해 응축된다. RCS 압력이 POSRV 설정치 이하로 낮아지면 밸브는 닫히고 증기 방출은 종료되나 밸브가 닫힌 직후의 밸브 후단에서의 압력은 IRWST 압력보다 높기 때문에 배관내 유체의 IRWST 방출은 압력이 동일해 질 때까지 계속된다. 증기 방출이 종료되면 배관계 끝단 IRWST 물과 직접 접촉하고 있는 증기는 온도가 낮은 물에 의해 직접 응축되게 되어 배관내부의 압력은 IRWST 압력보다 낮아지게 된다. 이에 따라 IRWST 물은 중력에 의한 수두를 극복하고 수직 배관을 따라 끌려올라 가게되는데 이 현상을 재침수라 한다. 속도를 가진 물기둥은 배관을 따라 올라 가면서 배관 내부의 더 많은 증기를 응축하고 가속되게 되는데 이 과정에서 유체의 운동량 변화에 의한 하중이 구조물에 작용하게 된다. 구조물에 작용하는 하중은 매우 짧은 시간에 발생하며 그 크기는 구조물에 손상을 줄 수 있으므로 Vacuum Breaker(VB)를 설치하여 동 하중을 완화시킨다. 본 분석에서는 열수력 분석코드인 RELAP5/MOD3.1을 이용하고 차세대원전 POSRV 방출배관을 단순화한 배관 배치를 가정하여 배관내 증기 응축시 나타나는 재침수 현상을 분석할 수 있는 모델을 개발하였으며 VB의 재침수 완화 효과를 검토하였다.

2. 본론

2.1 차세대원전 안전감압배기계통(SDVS)

차세대원전 SDVS는 RCS의 과압보호 및 비응축성기체 배기, 가압기 살수계통 불능시 RCS 감압, 설계기준초과 사고(BDBA)시 취출 및 주입운전을 위한 RCS 급속감압, 중대사고시 RCS 급속감압을 수행할 수 있도록 설계되어 있다. 동 계통은 RCS에서 방출되는 유체를 IRWST로 이송할 수 있는 경로를 제공한다. POSRV가 작동하는 주요 설계기준사고(DBA)로는 주급수관파단사고(FWLB), 복수기진공상실사고(LOCV) 및 POSRV 오작동(IOPOSRV) 등이 있으며, 설계기준초과사고로는 완전급수상실사고(TLOFW)가 있다. 이러한 사고시 POSRV가 작동하여 RCS 압력을 감소시키며, 방출된 RCS 유체는 SDVS를 통해 IRWST로 방출된다.

POSRV 밸브 후단에 연결된 직경 12"의 배관은 가압기 상부 El. 188'-3" 지점에서 시작하여 El. 186'-3"에 위치한 내각이 108°를 이루는 5각형의 폐쇄된 수평배관인 직경 12" Torus에 수직으로 연결된다. 가압기에 방출된 유체를 격납건물 하부 IRWST로 수송하기 위해 Torus에 수직으로 연결된 두 개의 14"배관은 가압기 격실 및 격납건물 환형공간을 통과하면서 각각 직경 6"의 여섯 개의 가지배관으로 각각 분기되어 IRWST 상부에 이른다. 이들 배관은 IRWST 상부를 관통하여 IRWST Water에 잠겨있는 Sparger에 최종적으로 연결된다.

차세대원전에서는 효과적인 증기 응축과 방출된 유체에 의해 수조 벽체 및 침수 구조물에 미치는 하중을 완화시키기 위해 I-형 Sparger를 도입하였다. Sparger는 총 12대로 구성되고 POSRV 방출 배관 끝단에 설치되어 있으며, Sparger의 침수 깊이는 9.0 ft이다. Sparger의 형태는 직선 수직 배관으로서 상부에 Load Reduction Ring(LRR)이 설치되어 있는데 Sparger 측면에 뚫린 8개의 LRR 구멍을 통해 방출된 유체가 IRWST에서 하향류를 형성하도록 되어있으며, Sparger 하부는 그 측면에 직경 10mm 구멍 144개, 그리고 Sparger 끝단에 직경 25mm의 구멍 1개가 뚫려 있다.

POSRV 개방에 의한 RCS 유체의 방출로 RCS 압력이 떨어지면 밸브는 닫히게 되고 RCS 유체의 방출은 종료된다. 증기 방출이 끝난 후 배관계 끝단 즉 Sparger에서 IRWST 물과 직접 접촉하고 있는 증기는 물에 의해 직접 응축되게 되며 배관내부의 압력이 IRWST 내부 압력 보다 낮아지게 된다. 이에 따라 IRWST 물이 Sparger로 유입되고 배관 상부로 끌려올라 간다. 이러한 현상을 완화하기 위해 방출 배관 압력이 낮아지면 공기가 유입되도록 VB가 방출배관에 설치되었다.

2.2 계통 설명

본 분석에서는 RELAP5/MOD3.1을 이용하여 POSRV 방출배관에서 재침수를 평가하기 위해 그림1과 같은 단순화된 POSRV 방출배관 계통을 설정하였다. 동 계통은 가압기, IRWST, VB와 직경 6"의 직선 배관 3개로 구성되어 있으며, POSRV는 전단 압력 2750 psia에서 증기 유량 286.69 lbm/sec를 방출할 수 있는 용량을 갖는다.

POSRV에 연결된 배관은 50.0 ft의 수직 배관으로서 20.0 ft의 수평 배관과 90° 각을 이루면서 연결되고, 수평배관은 다시 배관 끝단이 IRWST 물에 잠겨있는 50.0 ft의 수직 배관에 수직으로 연결된다. VB는 IRWST와 인접한 수직 배관의 20.0 ft 상부 지점에서 격납건물 대기와 연결되어 있으며, 수직 배관 내부 압력이 대기압의 압력 차가 1.0 psi 이상 되면 VB를 통해 배관계로 공기가 들어갈 수 있도록 단일 방향 밸브로 모델링 하였다. 또한 POSRV 후단 배관의 초기 조건은 18.5 psia의 물로 차 있으며 가압기 POSRV가 개방됨에 따라 IRWST로 방출된다.

2.3 분석코드 개요

본 분석에서는 열수력 분석 코드인 RELAP5/MOD3.1을 사용하였다. 동 전산코드는 일차원 해석, 다상유동(물, 수증기, 비응축기체)해석 코드로 6개의 기본방정식(2개의 질량보존방정식, 2개의 운동량보존방정식, 2개의 에너지보존방정식)을 사용하고 있다. 동 코드는 시간에 따라 변하는 경계 조건, 밸브운전상태 등 배관계통의 운전모드를 충분히 반영할 수 있으며, 복잡한 배관계통이라도 모델링이 가능하다.

2.4 계통 모델링

그림 2는 RELAP5/MOD3.1 코드를 이용한 재침수 현상 모사를 위한 계통 모델링을 보여 주고 있다. 가압기는 2,750 psia 압력을 갖는 Time Dependent Volume (TMDPVOL-001)로, POSRV는 최대 증기방출 유량이 286.69 lbm/sec인 MOV (MTRVLV-095)로 모델링 하였으며, 밸브 완전개방 시간은 0.001초로 설정하였다. 동 밸브에서의 유동을 모사하기 위해 Choking 및 Abrupt Area Change 옵션을 사용하였다. 밸브 후단 배관들은 1.0 ft의 Mesh 크기를 갖는 PIPE로 모델링 하였으며, 초기 조건으로 18.5 psia의 물이 가득 차있는 것으로 가정하였다. 14.7 psia의 압력의 과냉수를 포함하는 IRWST는 TMDPVOL 300으로 모델링 하였다. 방출 배관의 20번째 체적과 연결된 VB는 1.0 psid 압력차에서 개방되고 0.01223 ft²의 orifice 면적을 갖는 밸브와 14.7 psia, 120.0 °F의 순수 공기를 포함하고 있는 TMDPVOL 400으로 모델링 하였다. 가압기 내부 증기의 밸브를 통한 유량은 밸브 개방 면적에 따라 선형적으로 증가하며, 밸브가 완전 개방되면 정상상태, 즉 286.69 lbm/sec에 이르게되고 방출된 증기는 배관내 과냉수를 IRWST로 모두 방출하고 난 후 배관 끝단의 체적에서 증기 체적 분율이 0.99 이상이면 증기 방출에 의한 계통 모사가 종료되며 이 시점에서의 배관 내부의 조건을 재침수 현상 분석의 위한 초기 조건으로 사용하였다.

2.5 분석

증기 응축에 의한 재침수 높이는 배관 내부의 유체 조건, 배관 배치 형태, 배관 온도 분포, Sparger의 형상, 재침수 되는 물의 온도, VB 설계 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다. 본 분석에서는 VB의 재침수 완화 효과를 평가하기 위해서 첫째로 VB가 없는 경우 최대 재침수 높이를 평가하기 위한 모델 개발을 위해 노드 크기, 최대 시간간격에 대한 민감도 분석을 수행하여 노드 크기를 0.5 ft, 시간간격을 0.0001초로 각각 설정하였다. 둘째로 VB가 설치되어 있는 경우는 그 설계 특성에 따른 재침수 수위 완화 효과를 검토해 보기 위해 개방 면적, 개방시간, 그리고 설정 압력 등을 변경하여 분석을 수행하였으며 상세 내용은 표 1과 같다.

2.6 분석 결과

2.6.1 Vacuum Breaker를 개방하지 않았을 경우의 재침수 수위

최대 시간간격과 노드크기를 각각 0.001초와 0.5 ft하여 분석한 시간에 따른 재침수 수위 분석 결과는 그림 4과 같다. 수조내 물과 접촉하고 있는 증기가 응축됨에 따라 배관내 압력이 수조내 압

력 보다 낮아지게 되고 이때 배관내의 수위가 높아지게 됨을 그림을 통해 알 수 있다. 본 분석에서는 밸브는 0.0초에 개방되어 고온 고압의 증기를 방출하다가 배관 끝단의 증기 체적분율이 0.99 이상이 되는 시점, 즉 0.7초에 닫히게 된다. 밸브가 닫힌 후 방출배관내의 압력은 수조내의 압력보다 높기 때문에 증기의 방출은 일정시간 계속되게 되고 결과적으로 배관내 압력은 감소하게 되는 것이다. 이런 압력의 감소는 배관내부에 존재하던 응축수를 증기로 상변화 시킴으로 배관내의 유체는 완전증기 상태로 변하게 된다.

배관 끝단에서의 질량유량은 그림 3에서 보는 바와 같이 밸브가 개방됨에 따라 급격히 증가하며 0.5초에서 최대 유량을 기록하였다. 이는 밸브 개방 전에 배관에 존재하던 물이 방출되기 때문이며 이때 최대 유량은 배관 끝단에서의 물 방출이 종료됨을 의미한다. 따라서 0.5초 이후에는 물보다 밀도가 훨씬 작은 증기가 방출되므로 유량이 급속하게 감소하고 있음을 알 수 있다. POSRV는 배관 끝단에서 증기 체적 분율이 0.99 이상이 되는 시점 즉 0.7초에 닫혔지만 배관내의 압력이 수조내 압력보다 높기 때문에 증기 방출은 1.7초까지 계속되었다. 1.7초 이후 유량은 음(-)의 값을 갖는데 이는 증기응축에 의한 재침수가 시작되었음을 의미하며 그림 4의 수위 증가 시점과 잘 일치하고 있다.

재침수 수위는 1.7초부터 계속 증가하다가 6.6초에 최대 29 ft에 도달한 후 증가 및 감소를 반복하고 있다. 이러한 반복된 수위 증가 및 감소는 수조와 증기로 차있는 배관의 압력 차와 물의 수두에 의한 압력 사이에 평형을 이루는 과정에서 나타난다. 배관내 수위 증가는 증기 응축이 시작되는 0.7초에서 2.0초까지 22.0 ft/sec 속도로 증가하는데 이 값은 6.6초까지의 평균 수위 증가 속도 6.2 ft/sec에 비해 훨씬 급속함을 알 수 있다. 이는 증기응축에 의해 생성되는 배관과 수조 사이의 압력 차가 재침수가 시작되는 시점에서 크기가 작은 물기둥에 작용함으로 인해 물기둥이 그만큼 가속되기 쉽기 때문이다.

증기 응축에 의한 정상 상태의 최대 재침수 수위는 대기압과 온도 120 °F인 물의 포화 압력 1.6927 psia의 차에 상응하는 수위를 초과할 수 없다. 따라서 이론적인 정상상태의 최대 수위는 13 psid 압력차의 상응되는 수위인 29.74 ft 이하로 유지되어야 한다. 물론 증기응축이 진행중인 과도 상태에서는 수위 29.74 ft를 최대 2배까지 초과 할 수 있다. 정상상태의 수위를 15초와 18초 수위의 평균값 28 ft로 예상 할 수 있으며 이는 이론적인 최대수위 29.74 ft 보다 낮은 값이다.

그림 5는 시간간격에 대한 민감도 분석 결과로서 2개의 서로 다른 최대 시간간격 0.001초, 0.0001초에 대한 재침수 수위 분석 결과를 보여준다. 최대 재침수 수위는 7.0초에 27.3 ft로 최대 시간간격을 0.001초 분석한 결과와 약간의 차이를 보여주고 있지만 시간간격에 따른 수위의 전반적인 경향은 서로 일치된다.

그림 6는 4개의 서로 다른 노드 크기 0.25 ft, 0.5 ft, 1.0 ft 그리고 2.0 ft에 대한 재침수 결과 시간 이력을 보여주고 있다. 최대 재침수 수위는 노드 크기가 작아짐에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보여주고 노드 크기가 0.5 ft 이하가 되면 분석 결과가 노드 크기에 민감하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 분석의 노드 크기는 0.5 ft 정도가 적절할 것으로 판단된다.

그림 11은 최대 시간간격과 노드크기를 각각 0.001초와 0.5 ft로 하여 분석한 열수력 분석 결과로서 수직 배관에서의 거리에 따른 압력 분포를 보여주고 있다. 재침수가 시작되기 전 시각 1.0초에 배관 상부의 압력이 13.8 psia 이지만 재침수가 진행되어 과도 상태가 거의 끝난 시점 20초에서는 대략 3 psia의 압력을 보이고 있다. 이러한 압력 감소는 증기 응축에 의해 배관내 물의 수위가 증가했음을 입증하고 있다. 또 다른 특징은 재침수가 진행되는 과정에서 거리에 따른 압력 기울기가 다르다는 점이다. 이 경향은 시각 3.0초와 5.0초에서 거리 36 ft 이상에서의 배관내부 압력 기울기를 비교해보면 알 수 있으며 압력 기울기가 크다는 것은 단위 시간당 유체의 속도 증가가 크다는 것을 의미한다.

2.6.2 Vacuum Breaker를 개방하였을 경우의 재침수 수위

재침수 수위에 대한 VB의 영향을 검토하기 위해 표 1과 같은 VB 설계특성에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 분석 1의 경우 VB는 0.01223 ft²의 면적을 갖고 1.0 psid 압력 차에서 개방되도록 설정되었으며, VB가 개방되는 시점부터 완전 개방될 때까지의 시간은 1.0초이다. 분석 1에 대한

재침수 수위 분석 결과는 그림 7과 같다. 본 분석 결과에서 0.0초 부터 1.7초까지는 재침수에 의한 수위 변화는 그림 4의 결과와 동일하다.

재침수에 의한 수위는 1.7초에 시작하여 계속 증가하다가 2.9 초에 최대 6.5 ft에 이른 후 점차 감소한다. 최대 수위가 그림 4의 최대수위 29 ft 보다 현저히 낮은 이유는 증기응축에 의한 재침수가 되는 과정에서 배관내의 압력이 VB의 개방압력 이하로 떨어져 공기가 배관 내로 유입되기 때문이다. 이때 공기의 총 유입량은 0.32 lbm 이다. VB의 개방면적을 보여주는 그림 12에 따르면 VB 밸브는 재침수가 시작되는 시점과 거의 동시에 작동되고 그 면적은 시간에 따라 선형적인 증가하다가 배관 내부의 압력이 VB 작동으로 증가하여 배관내부와 VB의 압력 차가 1.0 psid 이하가 되는 시점 2.9초부터 닫히기 시작하여 3.9초에 VB의 작동은 종료된다. VB의 작동 종료 시점인 3.9초에 재침수에 의한 수위는 1.2 ft로 2.9초의 최대 수위 6.5 ft보다 현저히 떨어져 있으며, 이러한 수위 감소는 VB의 작동에 의한 결과이다. 본 분석의 두드러진 특징은 VB의 작동으로 1.2 ft까지 감소했던 수위가 4.8초에 1.9 ft로 이전 최저 수위에 비해 0.7 ft 증가되었다는 점이다. 이러한 수위 증가는 VB 작동으로 배관 끝단을 통해 방출되던 물의 배관내 수위가 1.2 ft에 달하는 시점에서 배관 끝단의 2번째 체적에서 짧은 시간동안 증기 응축이 발생되기 때문이다. 위와 같이 증기 응축에 의해 상승된 수위는 점차적으로 감소하여 8.0초 이후에는 0.0 ft를 유지한다. 그림 8은 VB의 밸브 개방시간을 0.5초로 하였을 경우 재침수 수위 변화를 보여주고 있다. 이 경우에 증기 응축은 개방시간을 1.0초로 설정한 분석 1의 결과와 유사함을 볼 수 있다. 하지만 최대 수위는 2.8초에 3.8 ft로 분석 1의 수위 6.5 ft와 2.7 ft의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 VB의 밸브 완전 개방시간이 0.5초로 분석 1의 경우보다 짧아 VB 밸브를 통해 공기가 많이 유입될 수 있기 때문이다. 분석 3은 VB 밸브 개방 압력을 0.5 psid로 설정하여 분석된 경우이며 재침수에 의한 수위 변화 결과는 그림 9에 나타나 있다. 최대 수위는 분석 1의 경우 보다 2.0 ft 낮은 수위를 보이는데 이러한 경향은 VB의 개방 설정압력이 0.5 psid로 분석 1의 경우보다 작은 압력차에서 VB가 작동되기 때문이다.

그림 10은 VB 밸브 개방 면적을 제외하고는 분석 1과 동일한 조건에서 분석된 재침수 수위 변화 결과를 보여준다. 분석 1의 밸브 개방면적보다 2배 큰 면적을 가정하여 분석된 동 경우의 결과는 밸브 개방 면적에 따라 재침수에 의한 최대 수위가 감소됨을 보여주고 있다. 동 분석의 경우 최대 수위는 분석 1 경우보다 2.0 ft 낮은 값을 가지며 발생시점은 분석 1 경우 보다 0.3초 빠른 2.5초이다.

3. 결론

본 분석에서는 차세대원전 안전감압계통의 POSRV 방출배관에서의 재침수 수위를 평가하기 위해 단순화된 배관 배치를 기준으로 방출 배관에 존재하는 증기와 IRWST 물과의 접촉 계면에서의 증기응축에 의한 재침수 수위를 VB를 개방하지 않을 경우와 개방할 경우로 나누어 계산하였다.

첫째, VB가 개방되지 않은 경우, 그림 4의 분석 결과를 통하여 증기응축에 의한 재침수 수위가 29.0 ft까지 증가함을 알 수 있었다. 이 최대 수위는 배관계에서의 Water Hammer 현상 및 대처 설계에 관해 기술하고 있는 EPRI 보고서의 내용 중 VB가 설치되어 있지 않은 배관계의 경우 증기응축에 의한 Water의 재침수 최대 수위 50.0 ft를 초과하지 않고 있지만 상당히 높은 수위임을 알 수 있다.

둘째, 재침수 현상 완화를 위해 배관계에 설치된 VB는 증기응축에 의한 재침수 수위증가를 효과적으로 줄일 수 있음을 본 분석을 통해 알 수 있었다. 그리고 VB의 유로 면적에 대한 재침수 수위 분석 결과로부터 그 유로 면적이 배관 면적보다 현저히 작더라도 재침수에 의한 수위를 적절하게 완화할 수 있음을 분석 1 과 4의 분석 결과를 통해 알 수 있었다. VB의 유로 면적은 배관 면적의 대략 1/12 및 1/6에 해당한다. 또한 VB가 개방될 경우 수위 증가 속도가 그렇지 않은 경우보다 작기 때문에 재침수 과정에서 유체의 운동량 변화에 의해 배관계에 작용하는 하중을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

본 분석에서는 배관 내부의 유체와 벽체와의 열전달 효과와 VB의 위치 변경에 따른 영향을 고려하지 않았다. 또한 방출배관 끝단이 수조내 물에 잠겨 있지 않고 물과 접촉해 있고, 배관 끝단도

단순한 직선 배관으로 가정하여 재침수 수위를 평가하였다. 차세대원전 POSRV 방출배관의 경우 배관 끝단의 Sparger가 IRWST 물에 9.0 ft 잠겨있으며 Sparger 형태도 본 분석에서 고려된 직선 배관과는 상당한 형태의 차이를 보이고 있다. 따라서 향후 차세대원전 POSRV 방출배관의 재침수에 의한 수위를 정확히 평가하고, 배관계통에 설계에 반영하기 위해서 이러한 설계인자를 고려할 수 있는 상세 평가 모델을 개발하여야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] "MARK 1 Containment Program Analytical Model for Computing Water Rise in A Safety/Relief Valve Discharge Line Following Valve Closure" NEDO-23898, August 1979.
- [2] "Experimental Investigation of Steam Vent Clearing Phenomena at System Relief into A Condensation Pool of Water" AE-RL-1630, September 1975.
- [3] EPRI, "BWR Supression Pool Pressures During Safety Relief Valve Discharge" EPRI NP-4008, Final Report, April 1985.
- [4] "RELAP5/MOD3 Code Manual" NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol. 1, 2, 3.
- [5] "Water Hammer Handbook for Nuclear Plant Engineers and Operators" EPRI TR-106438, Final Report, May 1996.
- [6] "Water Hammer Prevention, Mitigation, and Accommodation" EPRI NP-6766, Final Report, July 1992.
- [7] "RELAP5/MOD3 Simulation of Water Cannon Phenomenon" Nuclear Technology, Vol. 101, February 1993.
- [8] "RELAP5/MOD3 Simulation of Water Column Rejoining and A Water Slug Propelled by Noncondensable Gas" Nuclear Technology, Vol. 108, December 1994.
- [9] "Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe", CRANE, July 2000.

표 1. Vacuum Breaker 작동 압력, 개방시간 및 면적

분석	Vacuum Breaker				노드크기(ft)	최대 시간간격(sec)
	개폐	개방시간(sec)	개방압력(psid)	면적(ft ²)		
1	개방	1.0	1.0	0.01223	0.5	1.0e-4
2	개방	0.5	1.0	0.01223	0.5	1.0e-4
3	개방	1.0	0.5	0.01223	0.5	1.0e-4
4	개방	1.0	1.0	0.02446	0.5	1.0e-4

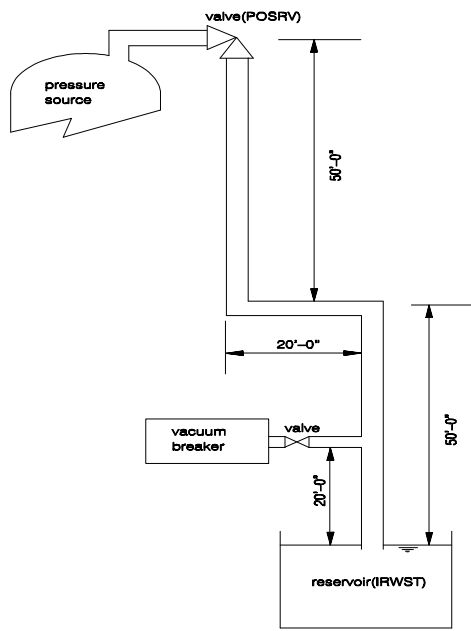


그림 1. 방출배관 계통 배치도

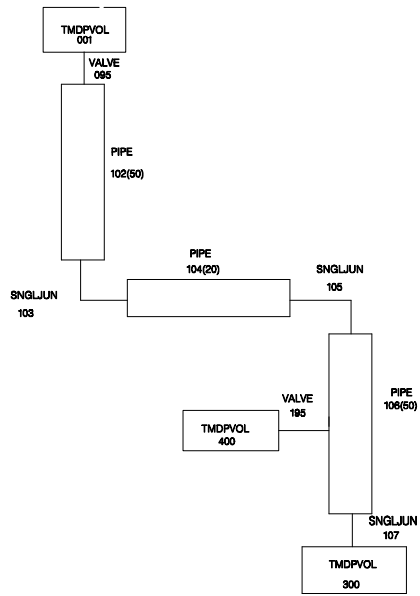


그림 2. 방출배관 계통 모델링

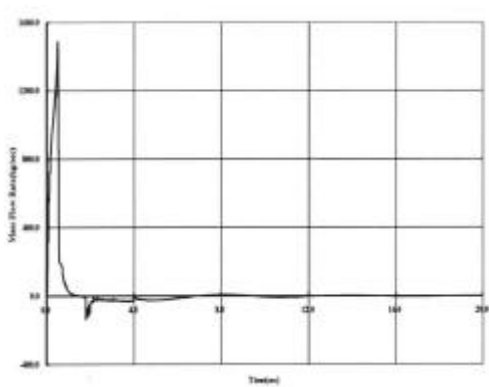


그림 3. VB가 없는 경우 질량 유량

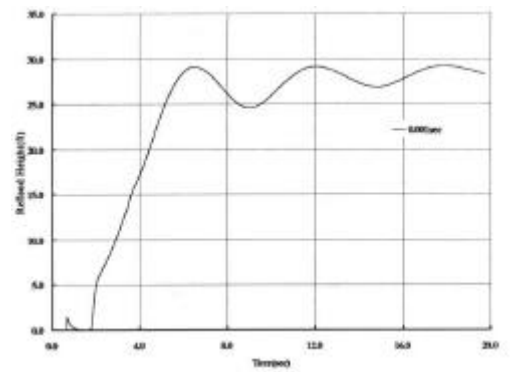


그림 4. VB가 없는 경우 재침수 수위

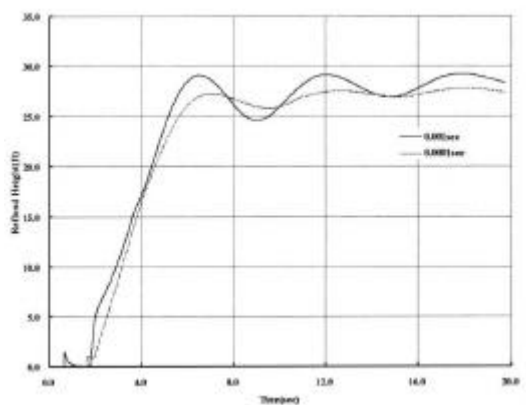


그림 5. 시간간격에 대한 민감도 분석

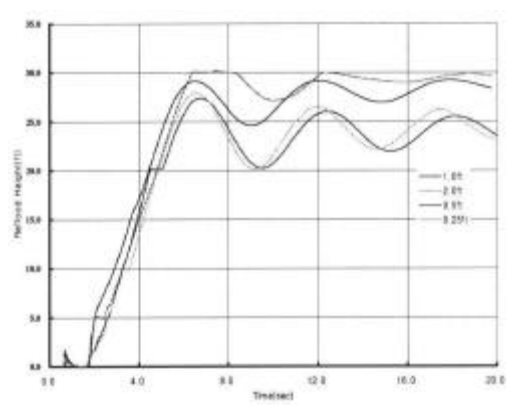


그림 6. 노드 크기에 대한 민감도 분석

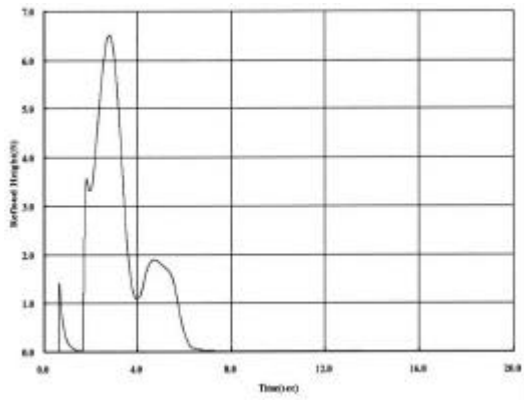


그림 7. VB를 고려한 재침수 수위

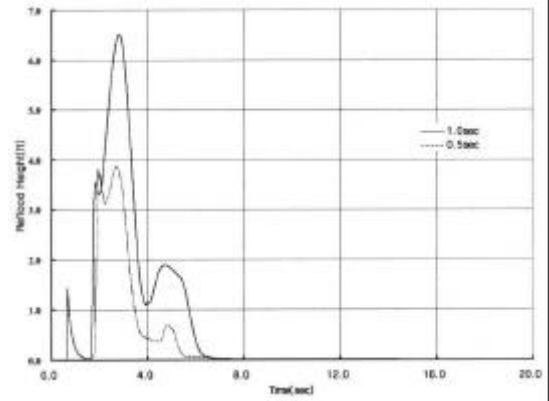


그림 8. VB 개방시간에 따른 재침수 수위

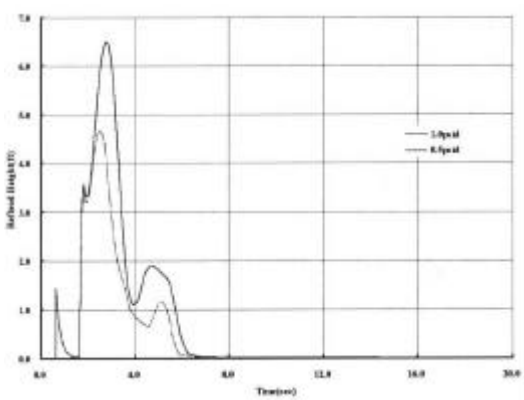


그림 9. VB 개방압력에 따른 재침수 수위

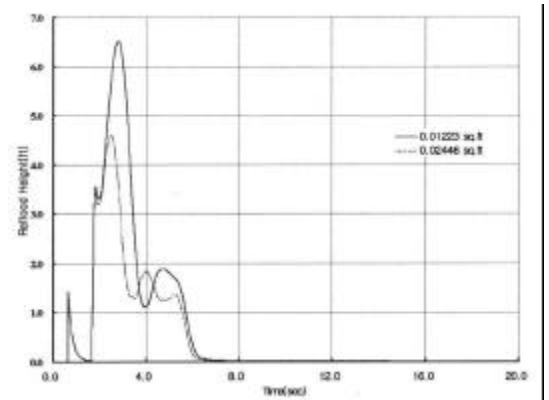


그림 10. VB 개방면적에 따른 재침수 수위

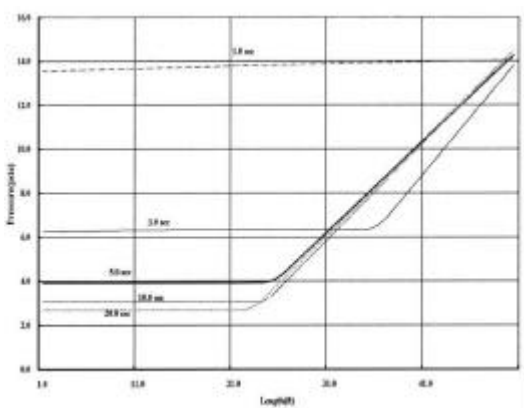


그림 11. 끝단 배관에서 압력 분포

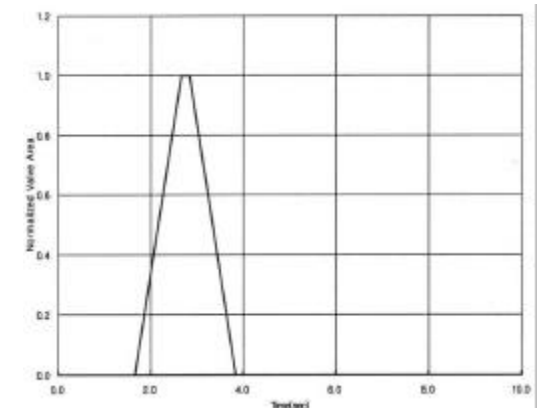


그림 12. 정규화된 VB의 개방면적