

'95 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

영광3,4호기의 부분중수 운전중 정지냉각계통 상실사고시 가압기 Manway 개방에 따른 사고해석

하귀석, 장원표, 류건중

한국원자력연구소

요 약

영광 3,4호기의 부분중수 운전중 정지냉각계통이 상실되고 가압기 Manway가 개방된 사고에 대하여 RELAP5/MOD3.1.2의 열수력 코드를 이용하여 모의하였다. 계산 결과 계통의 압력은 최고 1.74bar 까지 도달하였으며, 사고 발생후 약 1시간 이후부터 계통은 노심이 노출될 때까지 유사 정상상태를 유지한다. 이때 가압기 Manway를 통해 방출되는 증기량은 약 4 kg/s로 붕괴열의 약 80%를 담당하고 증기발생기 2차측에 의해 나머지 20% 가량 제거된다. 또한 비응축성 가스는 계통에 남아 있는한 계통의 압력 상승율을 증가시키며, RELAP5/MOD3.1.2 계산결과는 일차계통 전체 냉각재의 약 26 %의 질량오차를 나타냈다.

1.0 목적

이 계산은 YGN 3&4호기 발전소의 핵연료 재장전 및 보수기간 중 원자로 냉각재 펌프 또는 증기발생기의 보수, 시험을 위해서 냉각재의 수위를 고온관 중간부분까지 감소시킨 부분중수 운전(Mid-loop Operation)상태에서, 일차계통의 냉각을 담당하는 정지냉각계통 (SCS : Shutdown Cooling System)의 기능 상실에 따른 저온 저압의 과도 상태를 모의한 결과이다.

여기에서 사용된 주요가정은 정지냉각계통의 기능상실과 동시에 가압기의 Manway가 개방되고, 노심은 원자로 정지 48시간 후, 정상출력의 0.43%(11.626 MWt)의 열을 발생하고 있다. 이 계산은 이와 같은 상황에서, 최적 계산코드인 RELAP5/MOD3.1.2를 이용하여 노심 노출시간과 노심 노출시 증기주입량을 결정하는 계통의 압력을 계산하기 위함이다.

1.1 Nodalization 및 초기조건

부분충수 운전중 사고에 대한 모의 계산은 일반적으로 저온 저압 상태에서 발생하므로 사고 진행 과정이 매우 길고, 이에 따라 계산시간 또한 훨씬 길어진다. 따라서 시간 절약을 위하여 기존의 영광3&4호기 Input Nodalization에서 노심 및 증기발생기 2차측을 상당히 단순화시켰다. 또한 원자로 냉각재 펌프는 실제로 펌프의 역할을 하지 않기 때문에 "Branch"로 모델하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이, 노심은 12개의 Volume에서 6개로 줄이고, 이차측의 Riser 부분은 3개의 Volume을 갖는 "Pipe"로 모델하였다. 그리고 주증기관은 삭제하고 증기발생기의 출구노즐에 대기 방출 밸브를 부착하였다. 또한 원자로 냉각재 펌프는 형태 손실로 인한 압력 강하에 해당하는 Form loss Coefficient를 입력하였다.

부분충수 운전상태에 대한 초기조건은 원자로 정지 48시간 후의 붕괴열 제거를 위해 고온관의 온도를 333 K, 저온관의 온도를 323 K로 유지하도록 하였다. 일, 이차측의 압력은 대기압을 유지하고, 일차측의 수위는 고온관의 기포율을 0.4 ~ 0.6으로 조정하였다. 증기발생기의 이차측은 1대의 증기발생기를 습식으로 보존하고 다른 1대는 건식으로 하여 질소(N₂)가스를 채웠다. 이를 위해 정지냉각계통을 "Time Dependent volume" 으로 모델하고, 고온관에서 333 K의 물을 278Kg/s 배수하고 저온 관으로 323 K의 물을 주입하였다. 표 1은 초기 조건을 요약하여 나타내고 있다.

표 1. 계산 초기조건

압 력	일차측 : 대기압	이차측 : 대기압
유체온도	고온관 : 333 K 저온관 : 323 K	이차측 : 323 K
수 위	고온관 중간	정상운전 수위
노심출력	0.43%(원자로 정지 48시간후, 11.626 MW)	
Opening	가압기 Manway (직경 : 16인치)	

2.0 과도기 모의

정상상태의 계산이 끝난 후, 정지냉각계통의 입구 및 출구가 폐쇄되고, 가압기의 Manway가 개방되면서 과도기가 시작된다. 전체 과도기는 약 6,000초를 모의하는 데, 아주 작은 Time Step으로 인하여 CRAY-YMP를 이용하여

200,000초가 소요되었다. Time Step은 0.0015초로 균등하게 적용되었다. 기본 계산에서 질량오차(Mass Error)의 과다 축적으로 민감도 계산에서는 Time Step을 0.001초로 줄여 계산하였으며, 이 계산의 CPU 시간은 300,000초가 소요되었다.

이 계산에서 관심이 있는 주요 변수는 노심 유체의 비등시간과 노심 노출 및 중력주입을 위한 계통의 압력 등이다. 정지냉각계통의 상실후 노심 및 상부공동의 냉각재 온도는 상승하기 시작한다(그림 2). 약 375초에 노심 최상부의 Node에서 비등으로 기포율이 증가하지만, 이외의 냉각재는 여전히 아냉(Subcooled)상태로 존재한다. 이것은 노심에서의 밀도차에 의한 유량증가를 야기시킨다. 이후 노심 냉각재의 팽창(Swelling)으로 Mixture level은 고온관의 상부 및 증기발생기의 Inlet Plenum 까지 도달한다(그림 3). 가압기의 Manway에서는 약 400초부터 소량의 질소가스가 방출된다. 이때부터 약 1,000초까지 계통내의 질소가스의 일부는 가압기의 Manway를 통해 방출되고 또 일부는 증기발생기의 세관과 저온관에서 축적되며 계통의 압력은 급상승한다(그림 4,5).

가압기내의 질소가스의 배출로 노심에서 생성된 증기의 배출이 용이해지면서 일차계통의 압력증가율은 다소 감소하고, 상부공동에서 고온관으로, 고온관에서 Surge Line으로의 Liquid Entrainment에 의해 노심의 수위는 감소하고 가압기내에 Mixture가 쌓이기 시작한다. 이로 인하여 고온관의 기포율은 다시 점차적으로 서서히 증가하여 보다 큰 증기의 배출 통로가 형성된다. 증기가 방출됨에 따라, 원자로 용기의 Lower Plenum 으로부터 노심으로 차가운 냉각재가 유입되고 또한 압력의 계속되는 증가는 냉각재의 포화 온도를 증가시키기 때문에, 노심에서의 증기 발생량은 급격히 감소한다(그림 5).

1,300초경 압력증가율은 더욱 감소하고, 마침내 1500초경 계통의 압력은 감소하여 가압기내에 Hold-up되어 있는 유체를 Surge Line으로 끌어내려 증기의 배출통로를 폐쇄시키는 결과를 초래한다. 그후 계통의 압력은 약 1.35bar에서 1.48까지 급격하게 증가함으로 인하여 가압기 Manway를 통해 다시 증기를 방출한다(그림 6). 이와 같은 현상은 3,000초까지 2회 더 반복되면서 상부공동의 최고 압력은 약 1.63bar까지 증가한다.

이후 3,400초에서 원자로 용기내의 Mixture level이 떨어지면서 고온관의 기포율은 급격히 증가하고, 계통내의 많은 증기가 가압기 Manway로 방출되면서 압력은 다시 크게 감소하지만 계통내의 냉각재 온도가 노심 상부압력의 포화 온도

까지 증가하여 노심에서 증기발생량은 감소하지 않는다. 따라서 가압기내의 유체는 앞의 경우처럼 Surge Line으로 역류하지 않고 가압기 Manway를 통해 방출되는 증기량에 의해 고온관에서 Surge Line으로 Liquid Entrainment가 계속된다(그림 7).

이어서 약 3,800초경 Mixture Level은 고온관 밑으로 떨어져서 더이상의 Liquid Entrainment는 이루어지지 않고, 계통의 증기는 약 4kg/s의 유량으로 Manway를 통하여 방출된다. 또한 노심이 노출되기전까지 계통의 압력은 1.48bar로서 전반적인 유사 정상상태를 유지하게 된다. 가압기 Manway에서 계속되는 증기배출은 결국 4800초경 노심 노출을 야기한다. 이로 인해 노심에서의 증기 생성량 감소로 계통의 압력 및 증기방출량은 감소하게 된다(그림 8). 노심 노출까지 가압기 Manway에서의 계통 열제거능력은 약 80% 정도이며, 증기발생기에서의 열제거는 20% 가량 이루어지고 있다.

2.1 민감도 계산

위의 결과에서 약 6000초 계산에 대한 코드의 질량오차는 일차계통 전체 냉각재량의 약 26%에 이른다. 이 양은 Manway를 통해 방출되는 양의 거의 2배이다. 따라서 질량오차의 영향을 평가하기 위해 0.001 초의 Time step으로 계산을 다시 수행하였다.

민감도 계산 결과, 가압기에서의 Liquid 하강은 기본계산의 3회에 비해 1회밖에 발생하지 않으며, 질량오차 또한 약 10%로 감소하였다. 질량오차는 증기발생기 U-tube와 원자로 상부공동에서 주로 발생하였으며, 민감도 계산의 경우 질량오차 차이에 해당하는 냉각재가 계통내에 존재하기 때문에, 가압기의 수두가 더 상승하여 계통 압력은 기본경우보다 상승하였다. 민감도 계산에서 계통의 유사 정상상태 압력은 약 1.6bar로서 0.12bar 정도 상승하였으며, 최고 압력은 약 1.74bar까지 도달하였다. Mass error의 감소는 계통내에 존재하는 냉각재가 질량오차만큼 증가하기 때문에 노심노출 시간에도 많은 영향을 미친다. 첫 번째 경우의 계산에서는 4800초에 발생한 노심 노출이 민감도 계산 결과에서는 약 5800초에 발생하여 1000초 정도의 차이를 보이고 있다.

또 하나의 큰 차이는 가압기의 Mixture Level에 큰 차이를 보인다. Time Step 1.5ms의 경우, 그림 1의 가압기를 나타내고 있는 510 Component에서 10개 Node중 6번째 Node까지 Mixture Level이 상승하지 못한 반면에 Time Step

lms의 경우는 8번째 Node까지 도달하였다. 이 차이는 고온 관에서 Liquid Entrainment의 차이보다 계통내의 압력 변화로 인한 가압기에서의 Liquid Hold-up 변화로 발생하였다.

2.2 결론

정지냉각 계통의 상실로 인해 유체의 비등은 사고후 10분 이내에 발생하고 계통의 압력 상승 또한 매우 빨리 진행된다. 노심에서의 비등후 고온관이 완전히 증기로 가득할 때까지의 계통의 압력거동은 급격하게 변하기 때문에 이때의 중력주입은 그 효과를 예측하기 힘들다.

두 계산 결과에서 Mixture Level이 고온관 아래에 위치할 때, 즉, 안정상태의 압력이 각각 1.5 및 1.6bar에서 중력 주입이 이루어질 경우, 핵연료 재장전수 탱크의 수위는 주입위치에 비해 최소 6m 이상일 경우에 중력주입이 가능하며, 이때 Manway로 방출되는 유량이 약 4kg/s이기 때문에, 노심 노출을 방지하기 위해서는 주입유량이 이보다 더 많아야 한다. 따라서 핵연료 재장전수 탱크의 수위는 더욱 높아야 할 것이다.

또한 RELAP5/MOD3를 이용하여 정지냉각계통 상실사고를 모의할 경우 질량오차를 감소시키기 위해서는 매우 작은 Time Step을 사용하여야 할 것으로 생각된다.

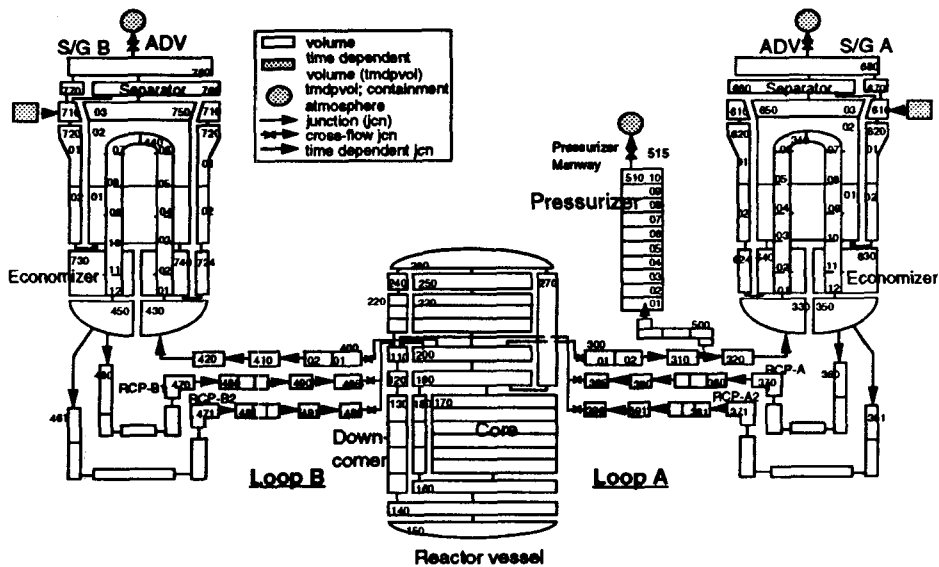


그림 1. 영광 3&4호기의 RELAP5 Nodalization

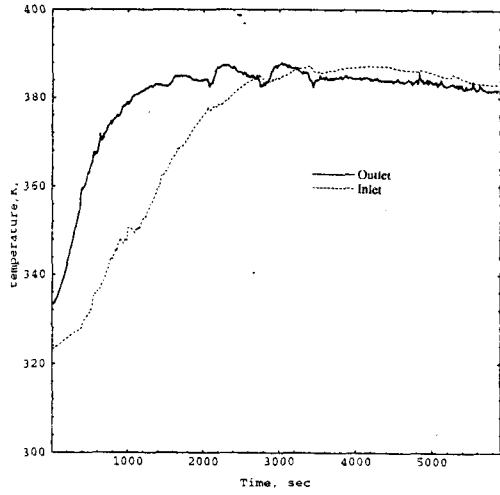


그림 2. 노심 입.출구에서의 냉각재 온도

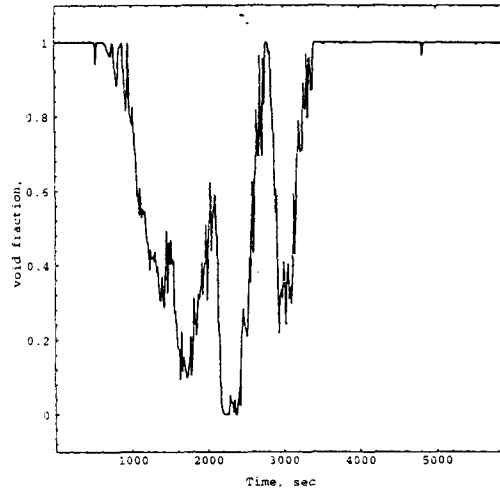


그림 3. 증기발생기 Inlet Plenum의 기포율

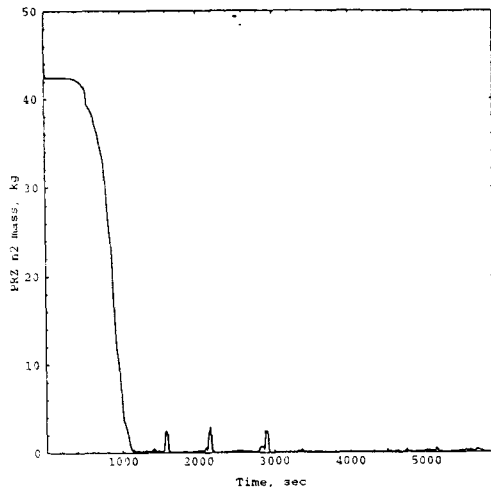


그림 4. 가압기내의 비응축성 가스 질량

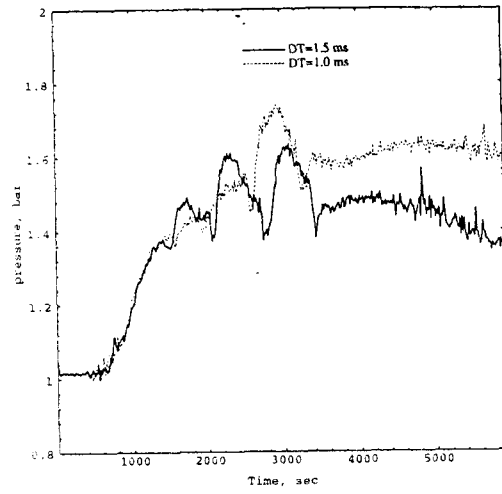
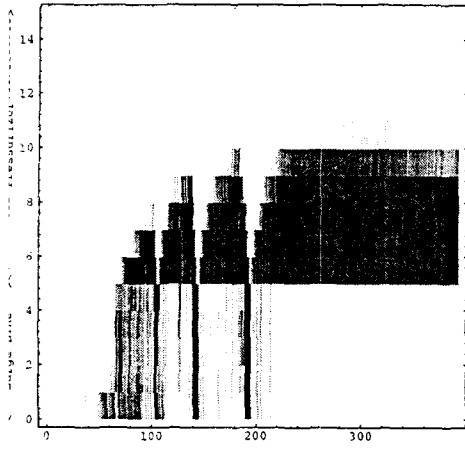
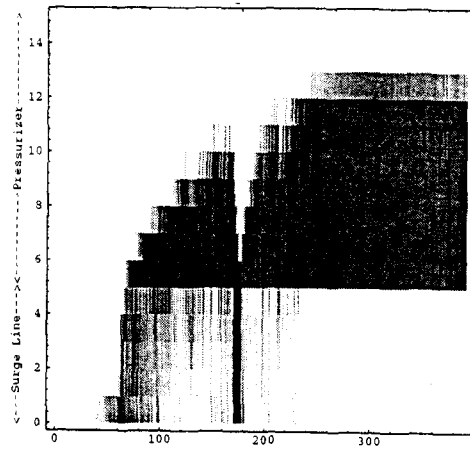


그림 5. Upper Plenum 압력



(a) DT = 1.5 ms



(b) DT = 1.0 ms

그림 6. Surge Line 및 가압기에서의 기포율 분포도

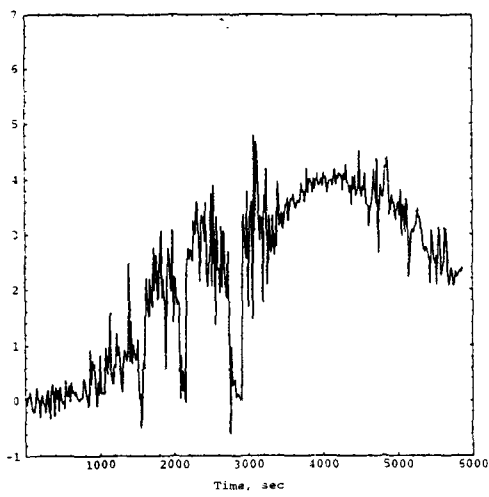


그림 7. 가압기 Manway 유량

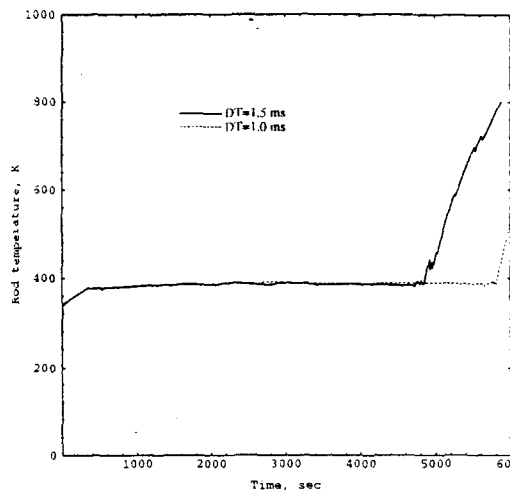


그림 8. 핵연료봉 온도