

'95 추계 학술 발표회 논문집

한국원자력학회

영광 3/4호기 Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고시 CATHARE2 코드를 이용한 열수력 현상
해석 및 증기발생기 열제거 능력 평가

김원석, 하귀석, 정재준, 장원표, 유건중

한국원자력연구소

요약

최적 열수력 전산 코드인 CATHARE2 V1.3u 코드를 이용하여 영광 3/4호기 midloop 운전중 잔열제거(RHR) 기능 상실사고를 해석하였다. 본 연구의 주된 목적은 사고시 계통에서 발생하는 열수력 현상의 이해 향상 및 증기발생기 열제거 능력 평가에 있다. 사고 복구 절차 관점에서 노심 비등, 노출 시점 및 계통압력 등이 중요한 인자이다. 본 계산 수행시 사용한 가정은 다음과 같다. 가) 초기 계통 수위는 고온관 중간에 위치하며 그 윗 부분은 질소 가스로 차 있다. 나) 3/4 인치 크기의 방출 밸브가 원자로 용기 상부 및 가압기 상부에 각각 설치되어 있으며, RHR 흡입구에 수위지시계가 설치되어 있다. 다) 증기발생기의 이차측은 U-튜브가 잠기도록 물로 차 있다. 라) 두 증기발생기의 대기 방출 밸브(ADV)는 항상 열려 있어 사고시 이차측 압력을 대기압으로 유지하기에 충분하다. 사고는 원자로 정지 2일후 발생하였다고 가정한다. 이와같은 조건하에서 사고시 주된 계통 열제거 수단은 증기발생기 U-튜브내의 응축 작용이며 이는 전체 열제거량의 94%로 나타났다. 노심 비등 시점은 사고후 ~300초 이후이며, 계통압력은 10,800초 이후에 최고 압력인 0.25MPa에 도달한 후 그 값을 계속 유지하고 있다. RHR 배관에 연결된 수위지시계를 통해 10,200초 이후부터 냉각수가 방출되었다. 2개의 방출밸브 및 수위지시계를 통하여 방출된 유량에 근거하여 원자로 용기 냉각재 수위가 고온관 바닥까지 낮아지는 시점을 계산하면 사고 약 6.4 시간 이후가 된다.

1. 서론

가압경수로에서 원자로 정지후 노심 잔열 제거는 잔열제거계통에 의해 이루어진다. 핵연료 재장전 및 기타 보수 유지를 위해 필요시에는 일차냉각계통 냉각재 수위를 고온관 중간까지 낮추고 RHR 계통을 운전하게 되는데 이러한 운전 모드를 midloop 운전이라고 한다. 이때 고온관 중간 윗 부분은 비응축 가스로 차 있게 된다.

Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고는 다음과 같은 인자에 의해서 발생할 수 있다. 가) 계통내 공기유입으로 인한 잔열제거펌프 정지, 나) 전원 상실, 다) 잔열제거펌프 자체 고장, 라) 격리 밸브의 오동작. 이와같은 사고로 인해 잔열제거기능이 상실되면 노심 냉각재의 비등과 노심노출을 유발할 수 있다.

사고후 주된 계통 열제거 수단은 증기발생기 U-튜브를 통한 reflux cooling과 밸브 및 수위 지시계를 통한 유량 방출이 될 것이다. Reflux cooling은 노심에서 발생한 증기가 증기발생기 튜브내로 올라가 일차측 열이 이차측으로 전달되면서 응축되어 내려오는 자연순환 현상이다. 이때 이차측은 이러한 열전달이 이루어지도록 물로 가득 차 있어야 한다.

잔열제거기능 상실사고가 발생하게 되면 RCS의 압력은 올라가게 되는데 이러한 압력 상승은 설계압력이 낮은 임시 thimble seal이나 노즐دم 건전성에 영향을 줄 수 있다. 또한 방출유량의 평가는 노심노출 예측의 관점에서 중요한 요소가 된다.

II. 발전소 개요 및 CATHARE2 입력 모델

영광 3/4호기는 2815MWt의 가압경수로로 두개의 loop으로 구성되어 있다. 발전소 정지후 midloop 운전중 RHR 계통은 고온관에서 고온의 냉각재를 취하여 열교환기를 거쳐 낮은 온도의 냉각재를 저온관으로 보내므로써 노심의 잔열을 제거시켜 주고있다. 영광 3/4호기의 계산 초기조건은 표 1에 나타나 있다.

CATHARE 2 코드의 입력모델은 소형 냉각재 상실사고시 사용된 입력을 수정하여 본 계산에 사용하였다. CATHARE 2 코드는 불란서 CEA, FRAMATOME, 그리고 EDF가 공동으로 개발한 원전의 최적 계산용 열수력 코드로 일차원 이상유체 모델을 채택하고 있으며 비응축성 가스는 증기와 열적, 기계적 평형상태에 있다고 가정한다.

영광 3/4호기 계산을 위하여 일차측은 250개, 이차계통은 76개의 node로 총 326개의 node를 사용하였다(그림 1). 원자로 용기 상부와 가압기상부에 설치된 방출 밸브는 대기압 상태로 압력 경계를 이루고 있으며, RHR 방출 배관에 연결된 수위지시계는 보다 정확한 방출유량을 계산하기 위해 입구 및 출구의 node를 세분화 하였다(Min. $\Delta Z = 8\text{cm}$).

III. 계산 결과

계산은 고온관과 저온관에 설치된 RHR 계통 입구와 출구를 닫으므로써 시작되며, 사고후 4시간을 모의하였다. 그림 2는 일차 및 이차 계통 압력을 나타낸 것이다. 일차계통 압력중 초기 500초까지는 계통내 물이 포화상태로 가열되는 단계로 계통압력에는 영향을 미치지 않으며, 이후 노심내 증기가 발생하여 급격한 압력 상승을 이루고 있다. 1000초에서 부터 두 증기발생기를 통한 reflux cooling이 이루어져 압력은 일시적으로 안정된 단계를 형성하였다. 그러나 2000초에 압력은 다시 상승하기 시작하여 이차측 온도가 포화 온도에 도달할 때까지 계속 증가한 다음, 안정화 된다. 이차측 steam dome에서의 압력은 대기방출밸브(ADV)가 항상 열려 있기때문에 이차

측에 증기가 발생해도 압력은 대기압으로 유지된다.

그림 3은 계통내 방출유량을 보여준다. 두 상부 방출 밸브를 통한 증기량은 일차측 압력이 최고점에 도달하면 각각 0.1kg/s로 일정한 유량이 형성되며, 수위지시계 배관으로의 유량은 10,200초 이후 계통압력이 물을 밀고 올라갈 상태에 도달하면 고온관으로 부터 물이 빠져나가기 시작한다. 이때의 유량은 ~2.2kg/s가 된다.

그림 4는 고온관의 증기율을 나타낸다. RHR 기능 상실사고 후 노심내 증기발생량의 증가와 함께 물이 밀려 올라가 초기 고온관의 증기율은 감소한다. 2,000초 이후부터는 reflux cooling 작용으로 인해 증기율에 변화가 있지만 평균 0.3으로 모의 끝까지 유지되고 있음을 볼 수 있다. 두 고온관에서의 증기율은 거의 같지만 6,000초에서 부터 11,000초 사이에서는 약간의 차이를 보이는데 이는 고온관 A에서 그 기간 동안에 증기발생기 입구공동에 물이 고였다 빠졌다 하면서 고온관 냉각재 흐름에 영향을 주기 때문이다. 이는 노심 아래부분까지 점차 포화온도에 도달하여 증기량이 많아지면서 원자로 용기 상부공동 출구에서 가압기 방출밸브가 있는 고온관 A로의 증기속도가 빨라져 reflux cooling에 의해 노심으로 역류하는 냉각재 흐름에 저항을 주고 따라서 이에 대한 효과가 증기발생기 입구공동에서의 냉각재 정체와 흐름을 반복하도록 영향을 주고있다. 그림 5는 이러한 현상을 증기발생기 입구공동의 압력차로 보여 주고 있다. 10,000초 이후 수위지시계 배관을 통해 방출이 이루어지면서 물의 정체는 사라지게 된다.

다음 그림 6은 계통내 질소 질량을 나타낸 것으로 초기 일차측 전체에 존재하는 질소의 질량은 160kg으로 사고후 바로 방출밸브를 통해서 33%가 빠져나가고 일부는 증기발생기 U-튜브에 축적된다. 1 시간 이후 부터는 계통내 대부분의 질소가스는 두 증기발생기 U-튜브 안에 존재하게 된다.

그림 7은 잔열 및 증기발생기를 통한 열제거를 보여주고 있다. 10,000초 이후로는 밸브 및 수위지시계를 통한 열제거 이외에는 모두 증기발생기를 통해 열제거가 이루어 지고있음을 알 수 있다. 그 량은 전체 잔열의 94%가 된다. 이와같은 결과에 비추어 계통압력이 안정화 되면 2개의 밸브 및 수위지시계를 통한 유출 유량은 총 2.4kg/s가 되고 이를 이용해 수위가 고온관 바닥까지 도달하는 시간을 계산하면 사고후 6.46 시간 이후가 되는 것으로 나타났다.

IV. 민감도 분석

기본 경우로 증기발생기 2대 모두 이용 가능한 사고를 모의 하였으나 이번에는 1대만 이용할 경우에 계통내 열수력 현상을 살펴 보았다. 그림 8에서 나타난 바와같이 1대인 경우는 2대에 비해 압력 증가가 빨리 일어나고 있으며 수위지시계 배관으로의 냉각재 방출시점도 빨라져 6,000초에서부터 시작하게 된다. 이는 1대 만으로 열전달이 이루어져 이차측 온도가 빨리 포화에 도달하면서 발생하게 되며, 이때의 최고 압력은 2대인 경우보다 약간 높은 0.27MPa이다. 그림 9는 증기발생기 열제거현상을 비교한 것으로 1대인 경우가 2대인 경우보다 계통압력이 빨리 최고점에 도달하고, 이는 2대의 경우에 비해 먼저 일차측과의 에너지 균형을 이루고 있음을 볼 수 있다.

V. 결론

영광 3/4호기 midloop 운전중 잔열제거 기능이 상실되는 사고가 발생하였을 경우 계통의 열 수력 현상을 CATHARE2 코드로 4 시간 모의하였다. 이때 잔열은 11.626MW로 정지후 2일 후 출력을 사용하였다. 계통내 3/4인치의 방출밸브가 열려 있어 이를 통한 초기 질소가스의 방출로 최고 압력은 이차측 온도가 포화상태에 도달하는 10,000초 이후에 0.25MPa에 도달한 후 안정화 된다. 노심 비등은 300초에 발생하며 증기발생기를 통한 열제거는 94%로 나머지는 밸브 및 수위지시계를 통해 제거된다. 2개의 방출밸브와 수위지시계로 빠져나가는 유량은 압력이 안정화된 시점에서 총 2.4kg/s이다. 이와같은 방출유량을 이용하여 고온관 바닥까지 원자로 용기 냉각재 수위가 낮아지는 시간을 계산하면 사고후 6.46 시간이 된다. 본 계산은 Cray-YMP에서 수행되었으며 4시간 모의시 Cray-YMP CPU time으로 71 시간 소요되었다. 이와같이 막대한 CPU time은 앞으로의 이와 유사한 모의 계산에서 작업수행 효율을 제한하는 요인이 될 수도 있다.

VI. 참고문헌

1. S.A.Naff, et al., "Thermal-hydraulic processes during reduced inventory operation with loss of residual heat removal", 1992, NUREG/CR-5855, U. S. NRC
2. Yassin A. Hassan, "Simulation of loss of RHR during midloop operations and the role of steam generators in decay heat removal using the RELAP5/MOD3 code", 1992, Nucl. Tech. 104, pp.76-88
3. B.Noel, R.deruaz, "Reflux condensation with nitrogen present in a U-tube steam generator: Bethsy results and cathare calculation", proc. of int'l conf. on New Trends in Nuclear System Thermohydraulics, may 30th-june 2nd 1994.
4. 장원표 외, "증기발생기 U-튜브내 비응축성 가스존재시 열전달 현상 해석", 1995, 원자력학회, 춘계학술발표회

표 1. Initial conditions of YGN 3/4 calculation

Parameter	Conditions
RCS	
Pressure	0.101325 MPa
Temperature	
Hot leg	333 K
Cold leg	323 K
Level	Centerline of hot leg
Decay heat (two days after shutdown)	11.626 MW (0.413% of full power)
Nitrogen humidity	100%
Number of RCS vents	3
Size of RCS vents	0.01905 m (dia.)
Total mass of N ₂ in primary side	160 kg
SG	
Pressure	0.101325 MPa
Temperature in SG dome	333 K
Level	Wet layup condition
Auxiliary FW temperature	293 K
Number of available SGs	2
Number of ADV in SG	2/SG
Area of ADV	0.079 m ²
Total mass of N ₂ in secondary side	280 kg

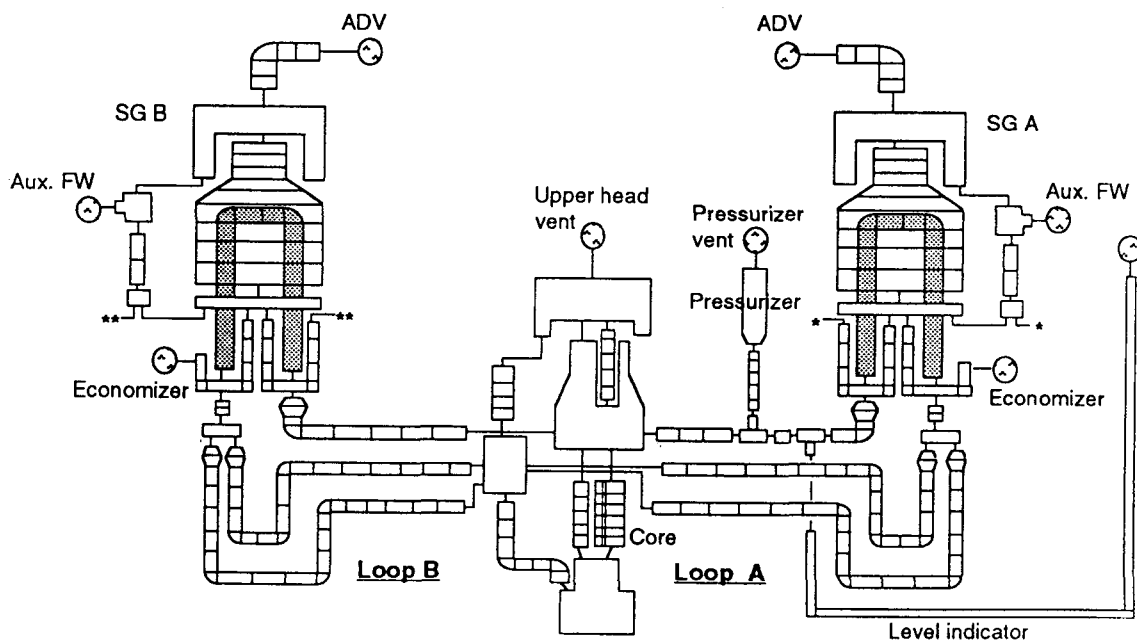


그림 1. 영광 3/4호기 CATHARE2 nodalization

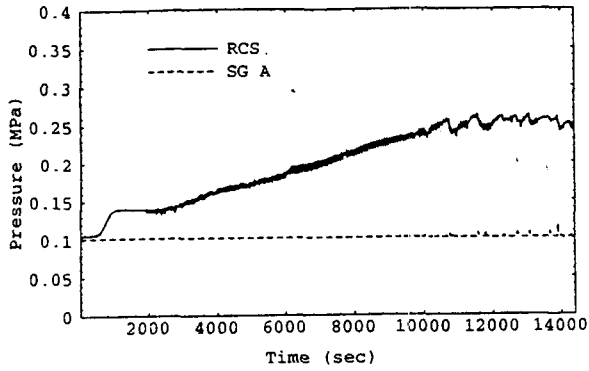


그림 2. 가압기 및 증기발생기 압력

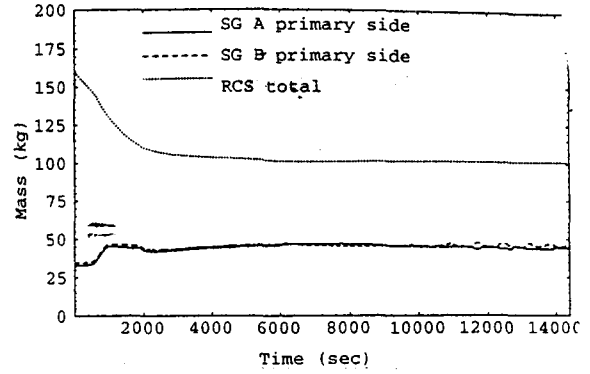


그림 6. 질소 가스 질량

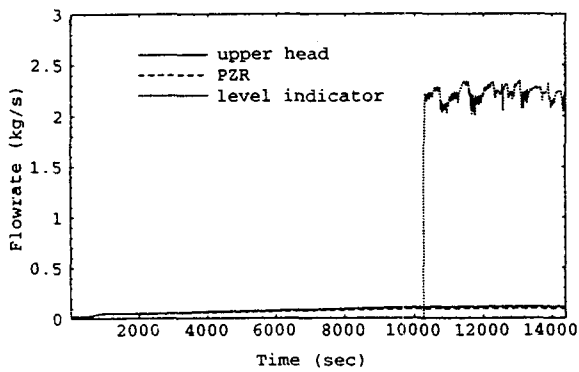


그림 3. 방출 유량

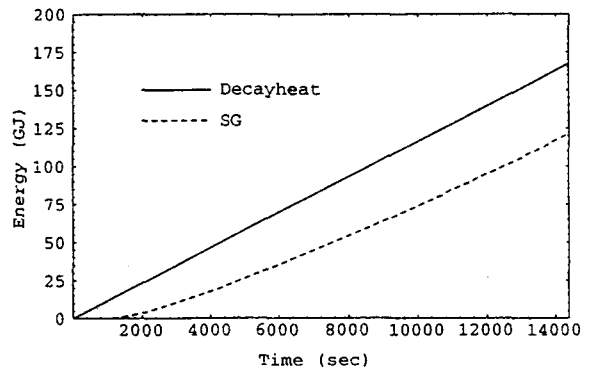


그림 7. 잔열 및 증기발생기 열제거

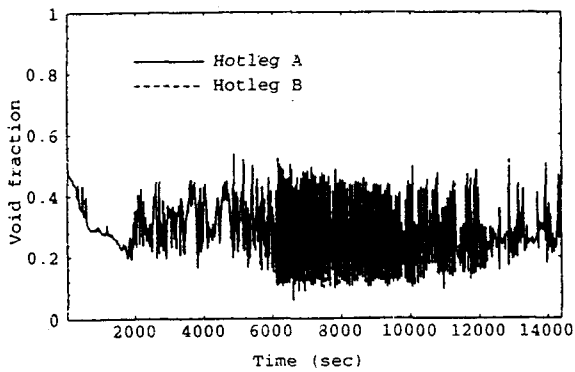


그림 4. 고온관 기포율

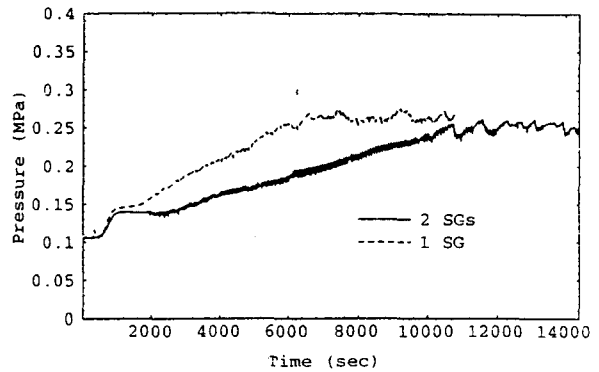


그림 8. 민감도 분석: 가압기 압력

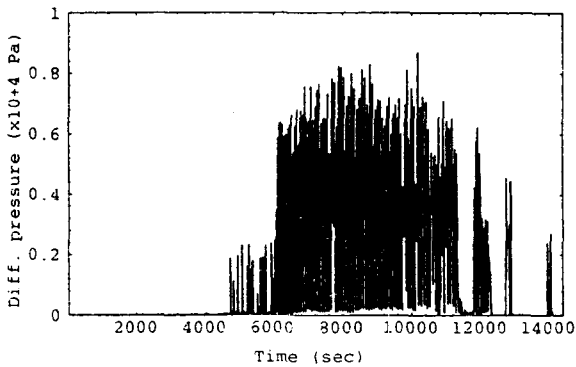


그림 5. 증기발생기 입구공동에서의 압력차

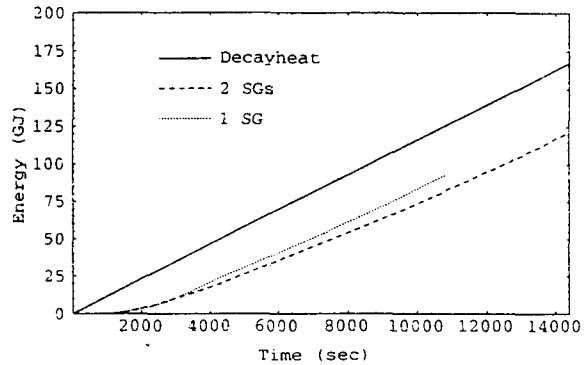


그림 9. 민감도 분석: 잔열 및 증기발생기 열제거