

비대칭 거동에 대한 SMART 다차원 열수력해석

Multi-dimensional Thermalhydraulic Analysis for SMART Asymmetric Behavior

임홍식, 정재준, 심석구

한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150

요약

SMART에서 주냉각재펌프 1대 정지시 혹은 증기발생기 1섹션 격리시 예상되는 비대칭 유동/온도 분포의 영향을 최적 다차원 열수력해석코드인 MARS/SMR를 사용하여 분석하였다. 두가지 경우에 대해 과도후 지속적인 75% 출력운전을 목표로 하기때문에 노심에서의 열적여유도를 평가할 필요가 있다. 특히 증기발생기 1섹션 격리는 이차측 급수관/증기관 누설이나 증기발생기세관 누설시에 유용하다. "주냉각재펌프 1대 정지"의 경우에 정지된 펌프에서의 역류에도 불구하고, 펌프방출구 영역에서의 유동 혼합에 의해 비대칭 거동은 일차측 증기발생기와 하향유로에서 나타나지 않는다. "증기발생기 1섹션 격리"의 경우에도 증기발생기 카세트에서의 비균일 열전달로 하향유로에서 비대칭 거동이 크게 나타났으나, 노심입구 영역에서 유동혼합이 잘 이루어져 비균일분포가 거의 사라진다. 그러므로 두가지 모두에서 비대칭 유동/온도 분포로 인한 다차원영향은 노심의 열적여유도에 거의 영향을 주지 않으므로 75% 출력준위에서 지속적인 출력운전이 가능함을 확인하였다.

Abstract

The effects of the asymmetric flow/temperature distributions which are expected to occur in case of one main coolant pump(MCP) trip or steam generator(SG) one section isolation in SMART are analyzed using the best-estimate multi-dimensional thermalhydraulic system analysis code MARS/SMR. In both cases the assessment of thermal margin in the core is necessary to assure continuous reactor operation at 75% power level following the transient. In particular, SG one section isolation is useful for the leakage at secondary feedwater/steam pipes or steam generator tubes. In the case of one MCP trip, despite of reverse flow at the tripped pump, no asymmetric behavior at the downcomer annulus does appear due to well-mixing at the MCP discharge. In the case of SG one section isolation, the asymmetric behavior by nonhomogeneous heat transfer through the steam generator is predicted significant at the downcomer annulus but most of the asymmetric behavior is diminished by well-mixing at the core inlet. Therefore it is assured that the reactor operation at 75% power level is possible, since the effect of the asymmetric behavior on the core thermal margin is negligible.

1. 서론

SMART [1]에서는 노심과 증기발생기 카세트사이에 4대의 주냉각재펌프를 대칭으로 설치하여 강제순환운전을 위한 수두를 공급한다. 펌프를 통과한 냉각재는 12개의 증기발생기들로 균일하게 분포되어 서로 분리된 유로를 따라 흐른 후, 노심 옆의 하향유로를 거쳐 노심으로 유입된다. 따라서 정상운전 중에는 대칭을 이루어 균일한 유동분포를 가진다.

주냉각재펌프 1대가 정지되는 경우 압력차에 의하여 정지된 펌프에서 역류가 발생한다. 이 역류는 펌프방출구의 환형영역에서의 유동분포를 비대칭하게 일그러트린다. 비대칭유동 정도가 클 경우 12개 증기발생기를 통한 유동과 열전달도 비균일하게 되어 냉각재온도도 비균일하게 된다. 또 다른 경우로, 4개의 독립된 섹션으로 구성된 이차계통에서 특정한 증기발생기 1섹션을 격리시킬 때이다. 이 특성은 이차계통 배관이 손상되어 열제거능력이 저하되거나 증기발생기세관의 누설로 방사능물질이 이차계통으로 유출되는 경우에 유용하다. 이 경우 나머지 섹션들을 사용하여 일차측으로부터의 열을 제거할 수 있으므로 원자로를 정지시키지 않고 지속적인 운전을 할 수 있다. 이때 이차계통으로의 열전달감소가 균일하지 않기 때문에 일차측 증기발생기 및 하향유로에서 비대칭 유동/온도 분포가 형성된다. 이는 일차측의 증기발생기를 통한 유로가 12개의 서로 분리된 경로를 따라 흐르기 때문이다. 이러한 유동/온도 비균일분포가 노심에까지 전파되면 국부적으로 노심의 열적여유도를 저하시킬 수 있다. 따라서 비대칭거동에 대한 노심의 열적여유도 평가는 주냉각재펌프 1대 정지나 증기발생기 1섹션 격리후 75% 출력에서 운전이 가능한지를 평가하는데 중요하다.

2. 해석방법론 및 출력제어 논리

SMART 비대칭 열수력현상 해석코드로는 최적 다차원 열수력해석코드인 MARS [2,3]를 기준코드로 일체형원자로 성능 및 안전해석용으로 개발중인 MARS/SMR를 사용하였다. 이 코드에는 SMART에서 필요한 나선형 증기발생기에 대한 열전달 상관식과 압력강하 관계식 등 SMART 원자로계통 및 기기모델이 고려되어 있다. 또한 다차원분석을 위해 3D 영역과 1D 영역을 연결시켜주는 기능을 보유하고 있다. 첫째로 3D mesh와 1D volume을 연결하기 위해 제공되는 Sub-Domain Boundary Volume(SDBVOL)이 사용되고, 둘째로 1D 열구조물은 1D 영역 뿐만아니라 3D 영역에도 연결될 수 있어 모든 열교환을 고려할 수 있다. 노심 열출력은 점동특성 모델을 사용하여 부(-)의 핵연료 및 감속재 온도계수에 의한 계산을 계산할 수 있다.

SMART의 다차원 열수력해석은 최적 초기조건 및 가정 그리고 최적 해석방법론을 사용하며, 주로 비대칭 열수력거동을 보이는 사건들에 대해 적용된다. 이러한 비대칭거동은 노심 입구에서의 유량 및 온도 분포를 일그러트려 노심에서의 열적여유도를 저하시키게 된다. 따라서 노심을 포함하여 비대칭거동이 예상되는 영역을 3D로 모델하였으며, 그 외의 영역 모두는 1D로 모델하였다. 그림 1은 SMART 다차원해석을 위한 MARS/SMR의 전체계통 모델을 보여주고, 그림 2는 3D영역에 대한 상세 모델링과 1D영역과의 연결관계를 보여준다.

SMART 개념설계를 위하여 제시된 제어보호계통의 논리[4]는 다음과 같다. 노심출력이 제어봉에 의해 직접 영향을 받는 반면에 냉각재온도는 루프전달시간만큼 지연되어 영향을 받는다. 결국 짧은 시간에 걸쳐 계통에 영향을 미치는 변수와 지연되어 나타나는 변수 모두를 적절히 제어하는 출력제어 방식으로 출력-유량 편차와 온도 편차를 결합한 제어방식이 사용된다. 이때 일차계통의 조건은 정압(constant pressure)기준에 근거하여 도출된 기

준온도(T_{ref}) 프로그램을 따른다. 즉, 고온측 냉각재온도(T_{hot})가 영출력 294°C에서 전출력 310°C까지 출력의 함수로 선형적으로 변하는 값을 가진다. 제어봉 제어논리의 특성은 다음과 같다:

$$U = 0.333 * \Delta T + 0.5 * \Delta N,$$

여기서 $\Delta T = T_{hot} - T_{ref}$, $\Delta N = N - Q_w$

- 측정된 일차계통 고온측 온도(T_{hot})와 온도 설정치(T_{ref})간의 편차 - T-제어기
- 측정된 중성자 출력(N)과 급수 유량(Q_w)간의 편차 - N-제어기

여기서 T-제어기와 N-제어기의 dead band는 각각 $\pm 3^\circ\text{C}$ 와 $\pm 2\%$ 이다. 제어봉은 $|U| > 1$ 일때 이동하여 $|U| = 0$ 일때 정지하는 이력특성을 따른다.

SMART 무봉산 노심에서는 부(-)의 온도계수에 의한 궤환특성의 영향이 크기때문에 과도 초기에는 제어봉에 의한 반응도보다 주로 반응도궤환(reactivity feedback)에 의해 출력이 제어된다.

3. 다차원해석 결과

3.1 주냉각재펌프 1대 정지

주냉각재펌프 1대 정지후 펌프속도가 정격치의 80%이하로 떨어졌을 때 발생하는 긴급출력감발신호에 의해 이차측 급수유량이 75%까지 초당 10%율로 감소한다. 이때 유압식 터빈조절밸브는 급수유량 감소로 인한 동적응답(dynamic response)을 자동으로 추종하여 이차측 증기압력은 터빈전단에서 3MPa로 유지시킨다. 과도발생후 출력-유량 편차와 온도편차가 변하여 설정값을 초과하면 제어봉이 작동하여 노심출력을 조절한다. 제어봉에 의한 반응도와 SMART 노심의 고유특성인 큰 부(-)의 온도계수의 궤환에 의해 이미 설정된 75% 급수유량에 일치하게끔 노심출력은 75%출력으로 안정화된다.

SMART의 주냉각재펌프는 자유휠(freewheel)이 없어 작은 관성모멘트를 가지므로 펌프 감속(coastdown)이 불과 5초만에 완료된다. 비록 역회전 방지장치가 있으나 임펠러들사이로 역류가 발생한다. 정지된 펌프에서의 역류는 130 kg/s이고, 운전중인 펌프의 유량은 다소 증가된 450 kg/s이 된다. 결국 노심유량은 초기 정격값의 76%로 감소한다. 노심유량의 감소로 노심에서 생성된 열이 증기발생기로 이동하여 제거될 때까지 지연시간이 길어진다. 따라서 열의 누적으로 냉각재온도가 증가하고 팽창된 냉각재가 가압기로 유입되면 $PV = nRT$ 이상기체 방정식에 의해 압력이 증가한다(그림 3).

한편 냉각재온도 증가로 인한 부(-)의 감속재온도계수의 궤환으로 노심출력은 급속히 감소한다(그림 4). 이때 노심출력의 감소는 핵연료온도를 낮추므로 핵연료온도계수에 의한 반응도는 감속재온도계수에 의한 반응도와 반대로 작용한다. 핵연료온도계수에 의한 양(+)의 반응도가 감속재온도계수에 의한 음(-)의 반응도를 초과하면 노심출력이 증가한다(그림 4). 처음 10초동안에는 부(-)의 온도계수를 가지는 노심의 고유특성이 지배적이거나, 그 후에는 제어봉에 의해 출력이 제어되어 안정한 출력준위에 도달한다. 이때 이차계통은 작은 체적으로 인해 열관성(thermal inertia)이 작으므로 일차계통의 과도를 즉각적으로 추종한다.

주냉각재펌프 정지로 증기발생기로 유입되는 유량이 감소하므로 열용량이 작은 냉각재가 증기발생기를 흐르게 된다. 따라서 일차측 증기발생기 출구의 냉각재온도는 감소하는 반면 노심에서는 감소된 유량에 가해지는 노심열로 냉각재온도가 증가한다(그림 3). 노심 출구에서의 냉각재온도 증가는 루프전달시간만큼 지연되어 증기발생기 입구의 냉각재온도를 증가시킨다. 이 때의 노심의 열적여유도는 그림 4에서 고온 핵연료봉에서의 핵비등이탈율(DNBR)로 알 수 있다. 노심유량의 감소로 인한 열전달감소보다 노심출력 감소율이 지배적이어서, DNBR은 거의 감소되지 않고 오히려 출력감소로 인하여 증가하는 거동을 보인다.

그림 5의 다차원 해석결과에서 유동분포는 펌프방출구 영역에서만 비균일하고 그 외의 영역에서는 균일하다. 그러므로 균일한 온도분포가 예상되므로 노심은 비대칭거동에 의해 영향을 받지않는 것이 확인되었다.

3.2 증기발생기 1섹션 격리

증기발생기 1섹션 격리가 요구되는 경우로 이차계통의 증기관이나 급수관에서 누설과 일차계통내에 설치된 급수관과 증기관 혹은 증기발생기 세관에서 누설이 있다. 누설의 정도가 작을 경우 증기발생기 1섹션 격리전의 계통거동은 매우 완만하고 서서히 진행되므로 과도에 미치는 영향이 작다. 따라서 본 해석에서는 증기발생기 1섹션 격리를 과도시발단으로 가정하였다. 증기발생기 1섹션 격리신호와 동시에 발생하는 긴급출력감발신호에 의해 이차측 급수유량이 75%까지 초당 10%율로 감소하고, 제어봉이 작동하여 노심출력을 조절한다. 제어봉에 의한 반응도와 SMART 노심의 고유 특성인 큰 부(-)의 온도계수의 궤환에 의해 노심출력은 75% 출력으로 안정화된다.

증기발생기 1섹션 격리시 영향을 받는 증기발생기 카세트는 6개로 각 카세트에서 열전달면적이 50%씩 감소한다. 그림 6은 MARS/SMR 다차원모델에서 열전달면적이 감소되는 증기발생기 카세트와 다차원 채널을 보여준다. 섹션격리에 따른 이차측으로의 열전달감소로 인해 축적된 열로 냉각재온도가 증가되어 냉각재의 체적이 팽창한다. 팽창된 냉각재가 가압기로 유입되면 가스체적 감소로 가압기의 압력이 증가한다. 이 때의 압력 증가는 급속하나 고압 원자로트립신호 설정치인 16.7MPa에는 못 미친다(그림 7). 한편 급수유량이 급속히 변하는 반면 냉각재온도 증가로 인한 부(-)의 감속재온도계수의 궤환효과는 루프전달시간동안 지연되어 나타나므로, 약 8초이후에 노심출력은 급속히 감소한다(그림 8). 처음 수초동안에는 부(-)의 온도계수를 가지는 노심의 고유 특성이 지배적이거나, 그 후에는 제어봉에 의해 출력이 제어되어 안정한 출력준위에 도달한다.

증기발생기 1섹션 격리후 증기발생기를 통과하는 일차측 냉각재는 덜 냉각되어 노심으로 유입된다. 그림 7에서 보듯이 노심입구의 냉각재온도는 초기에는 루프전달시간동안 지연된 후 덜 냉각된 냉각재의 유입으로 상승하는 거동을 보인다. 이 때의 노심의 열적여유도는 그림 8에서 보여지는 고온 핵연료봉에서의 DNBR로 알 수 있다. 증기발생기에서 열전달감소 효과가 노심에까지 지연되는동안 노심출력이 여전히 높아서 DNBR이 초기에는 다소 감소한다. 그러나 최소 DNBR 설계제한치보다는 높게 유지되며, 출력이 감소함에 따라 증가하여 보다 높은 값을 가지게 된다.

그림 9와 10은 다차원영역에서의 유동 및 온도 분포를 보여주고 있다. 하향유로 상부에서의 냉각재온도 차이는 20°C이나 하부에 이르면 5°C로 혼합에 의해 감소한다. 반면 유

량차이는 점점 증가하여 하향유로 하부에서 그 차이가 156 kg/s로 큰 차이를 보인다. 그림들에서 혼합은 난류혼합보다는 저온측과 고온측사이의 경계에서의 질량전달에 의한 혼합이 지배적이다. 질량전달에 동반한 운동량전달에 의해 저온측 냉각재 흐름이 가속되는 경향을 보인다. 이는 하향유로에서 냉각재 혼합이 잘 이루어지지 않음을 의미한다. 그러나 하향유로 하부에서 노심입구에 이르는 영역에서 잘 혼합되어 유량 및 온도 분포가 균일해지므로 비대칭거동이 노심에 미치는 영향은 작게 된다.

4 결론

주냉각재펌프 1대 정지시 정지된 펌프를 통한 역류에도 불구하고, 펌프방출구에서 유동 혼합이 잘 되기때문에 일차측 증기발생기를 통한 유동은 균일하다. 따라서 온도분포도 균일하게 되어 노심은 비대칭거동에 의해 영향을 받지 않는다.

증기발생기 1섹션 격리시 이차측으로의 열전달감소로 일차측 하향유로에서 유동/온도 비대칭거동이 상당히 크게 나타났다. 그러나 하향유로에서 노심입구에 이르는 영역에서 혼합이 잘 이루어져 유동 및 온도 비균일분포가 거의 사라지므로 증기발생기 1섹션 격리시에도 비대칭거동이 노심에 미치는 영향은 작다.

두 경우 모두에서 과도동안 어떤 계통변수도 원자로트립신호를 발생하지 않으며, 초기 수 초동안을 제외하고는 안정한 거동을 보인다. 75% 정상운전모드와 비교해 노심 및 계통의 열적 특성의 차이가 크지 않으므로 75% 출력운전이 가능한 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

참고 문헌

- [1] H-Y. Kim, et. al, "SMART 계통 설명서", SMART-FS-SD210,Rev.00, 일체형원자로 계통설계 기술개발분야/동력로계통기술개발팀, KAERI, November 1998.
- [2] W.J. Lee, et. al, "Development of a Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS1.3 and Its Verification", KAERI/TR-1108/98, KAERI, July 1998.
- [3] W.J. Lee, et. al, "Improvement of a Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS1.3", KAERI/TR-1141/98, KAERI, September 1998.
- [4] H-S. Lim & K-H. Lee, "SMART 출력제어 개념개발을 위한 출력감발 해석", KAERI/TR-1073/98, 한국원자력연구소, June 1998.

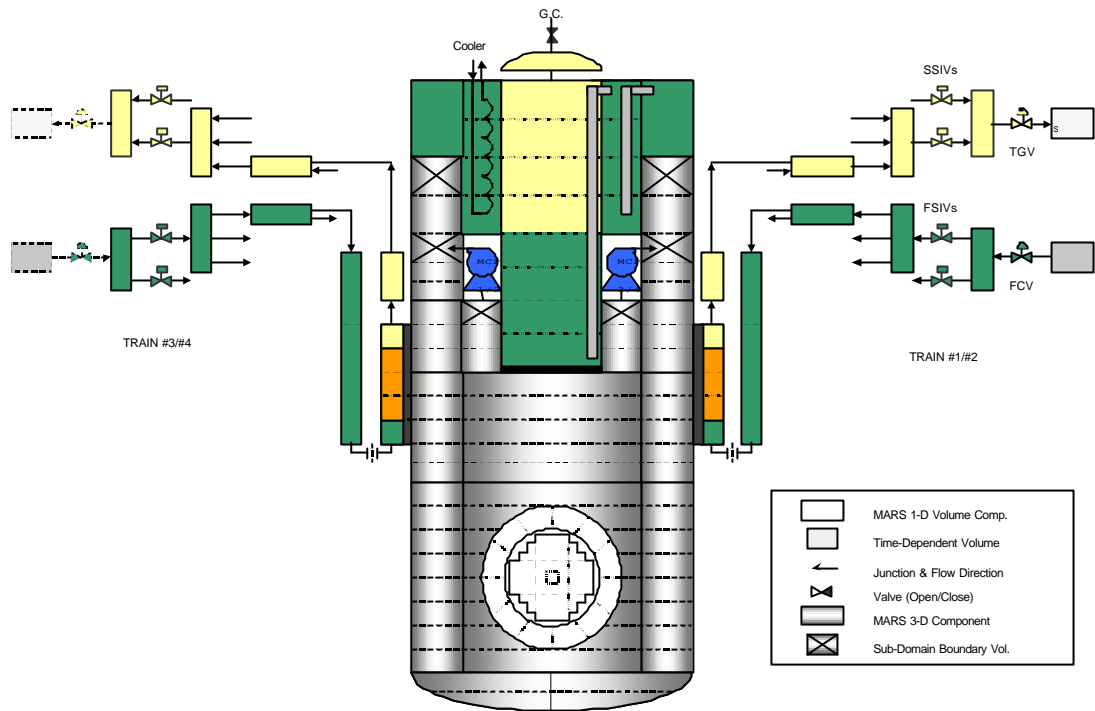


그림 1. SMART 다차원해석 모델

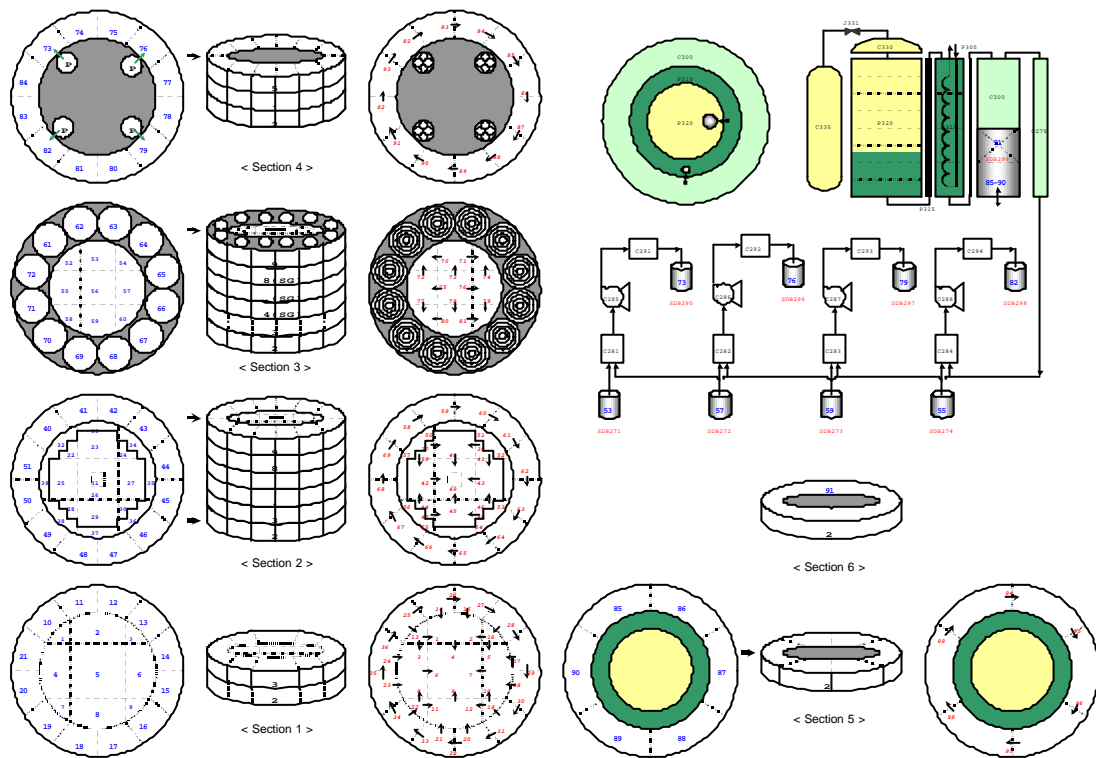


그림 2. SMART 다차원영역 모델

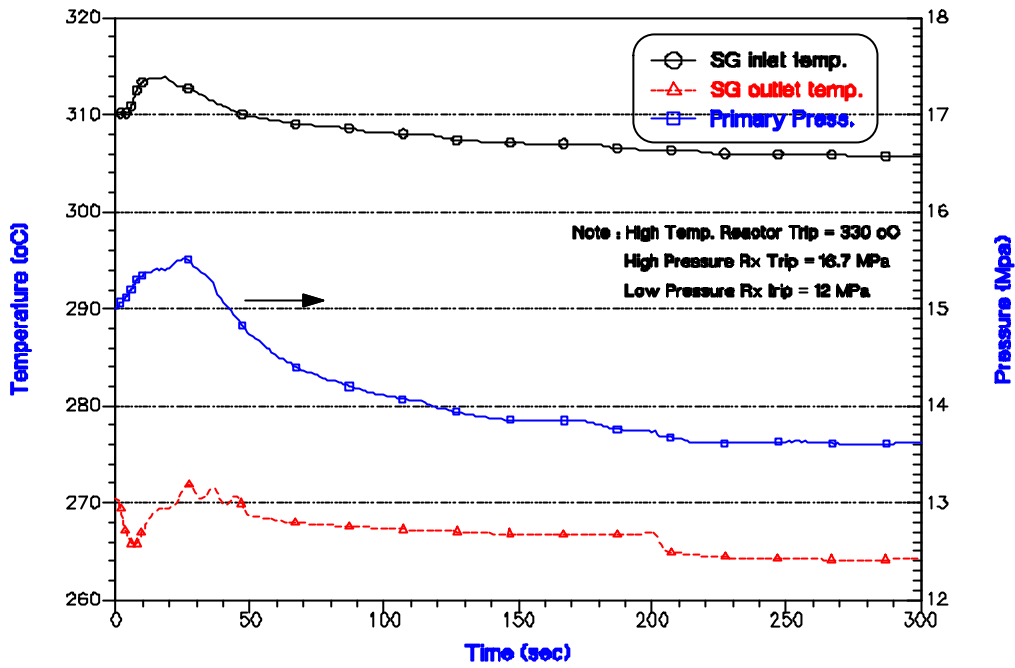


그림 3. 일차측 압력과 냉각재온도 과도(주냉각재펌프 1대 정지)

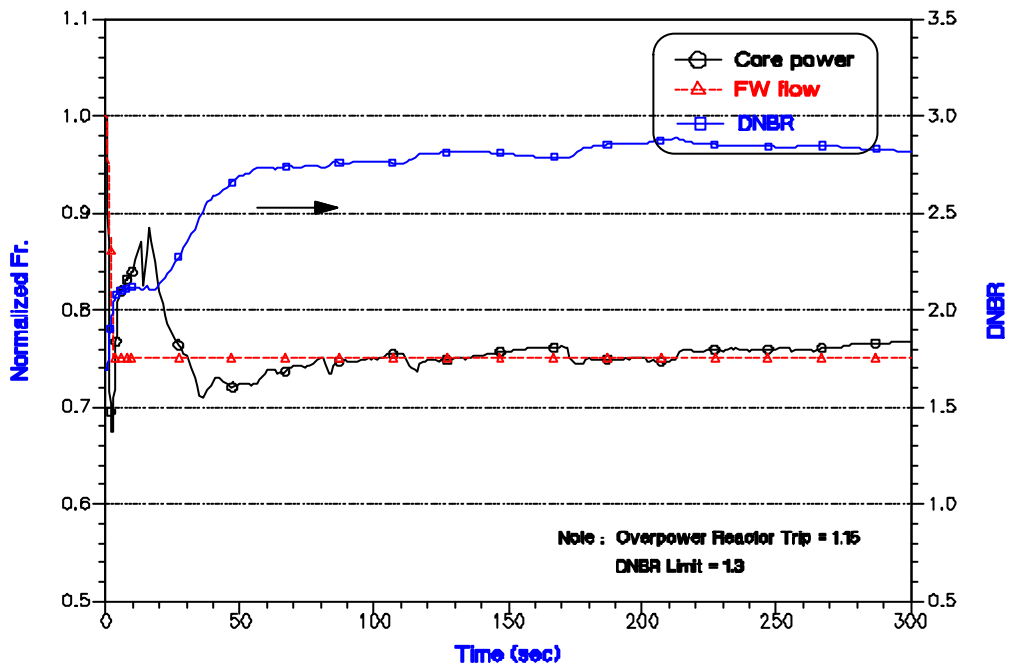


그림 4. 노심출력과 급수유량과 DNBR 과도(주냉각재펌프 1대 정지)

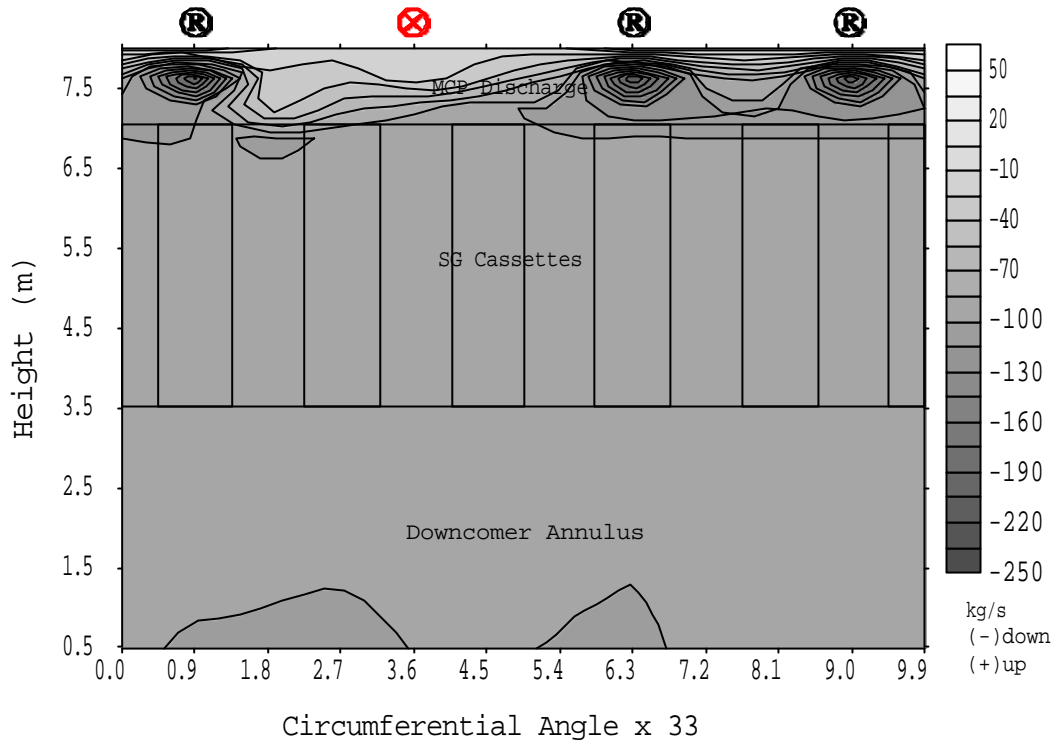


그림 5. 증기발생기와 하향유로의 유량 분포(주냉각재펌프 1대 정지)

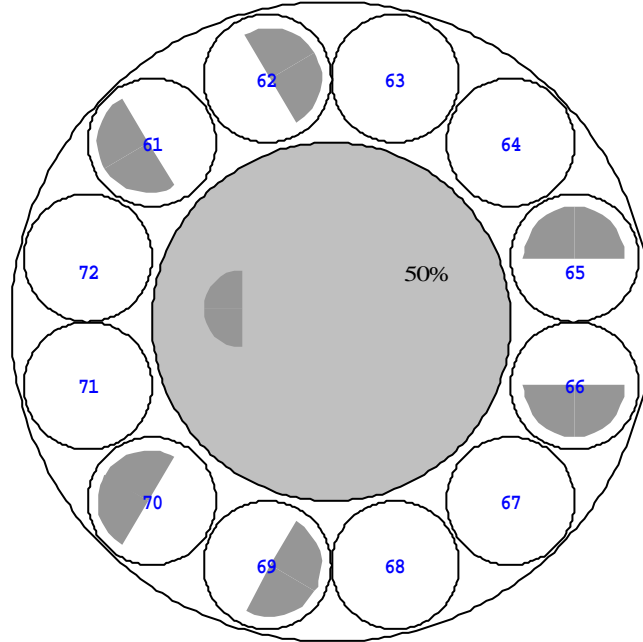


그림 6. 증기발생기 1섹션 격리에 의한 열전달면적 감소

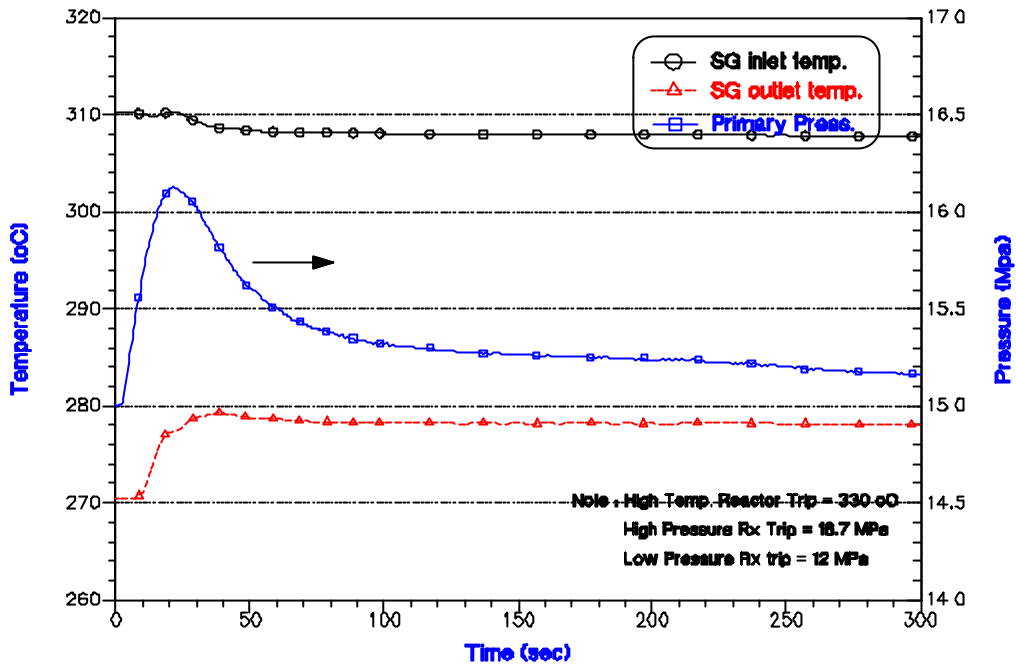


그림 7. 일차측 압력과 냉각재온도 과도(증기발생기 1섹션 격리)

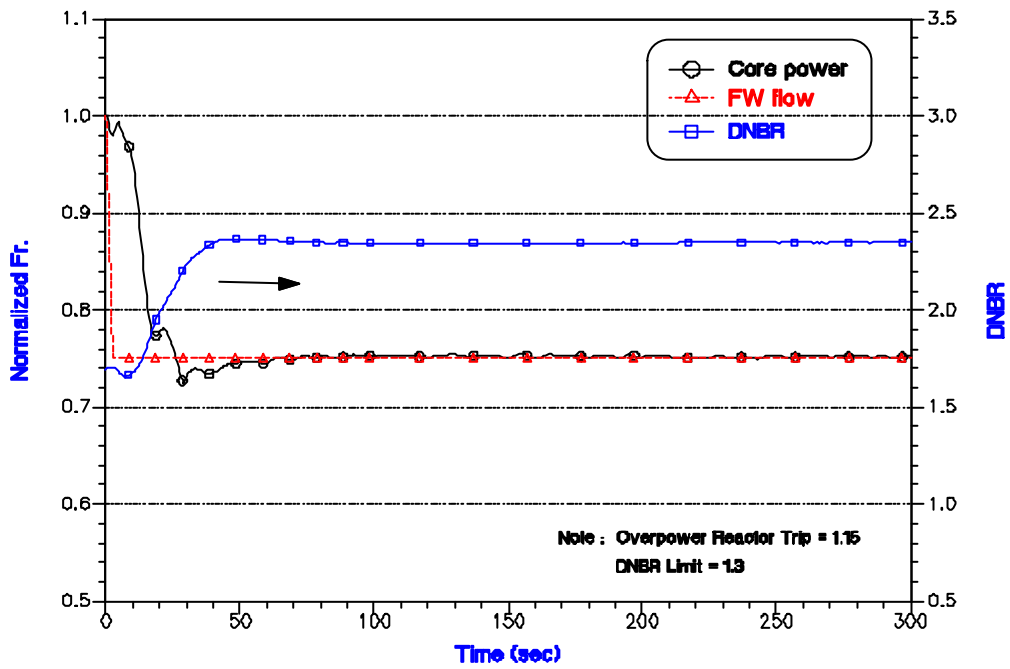


그림 8. 노심출력과 급수유량과 DNBR 과도(증기발생기 1섹션 격리)

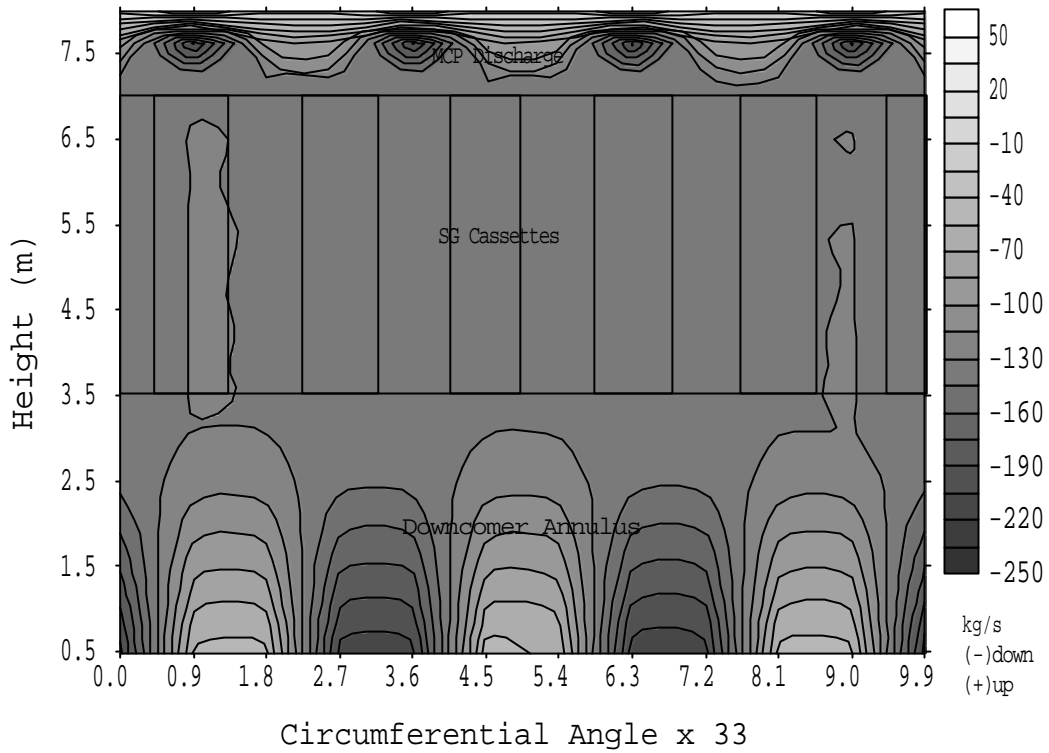


그림 9. 증기발생기와 하향유로의 유량 분포(증기발생기 1섹션 격리)

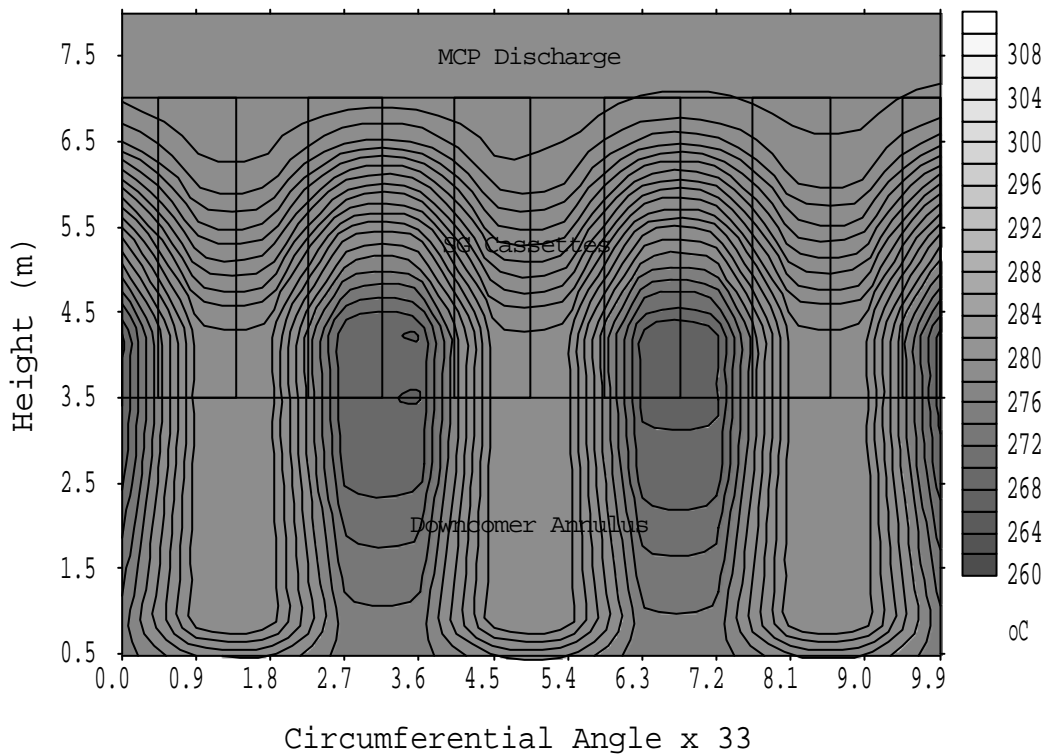


그림 10. 증기발생기와 하향유로의 온도 분포(증기발생기 1섹션 격리)