

영광 3/4호기의 정지냉각계통 기능상실사고시 가압기 Manway 및 증기발생기 역할분석

하귀석, 정재준, 김정두, 장원표
한국원자력연구소

요 약

RELAP5/MOD3.1.2을 이용하여 영광 3/4호기의 부분충수운전중 정지냉각계통 기능상실사고를 모의하였다. 이 해석은 노심에서 발생하는 증기를 가압기 Manway로 배출시켜 노심을 냉각할 경우, 증기발생기 2차측의 냉각재 유무에 따르는 계통기능을 분석한 것이다. 해석결과, 노심에서의 비등은 사고후 약 6분 경에 발생하였으며, 증기발생기 2차측에 냉각재가 없는 경우는, 냉각재가 채워져 있는 경우보다 0.16 bar 더 높은 1.8 bar의 계통 압력을 나타내어, 현재의 운전절차서에서 제시한 RWST의 수위(70%)로는 중력주입이 불가능한 것으로 밝혀졌다. 이런 해석결과를 토대로 할 때, 부분충수 운전중 증기발생기 2차측 냉각재는 최소한 한대에는 충수하고, RWST 수위 제한치도 84% 이상으로 증가시키는 운전 절차서의 개정이 필요한 것으로 판단된다.

1. 서 론

부분충수 운전(Midloop Operation)중 정지냉각계통(Shutdown Cooling System)은 교류전원 상실이나, 격리 밸브(Isolation Valve)의 오동작, 혹은 정지냉각계통의 고온관 흡입부에서 와류(Vortex Flow) 형성으로 공기가 유입되어 그 기능을 상실하는 경우가 있다. 실제 1987년 4월 Diablo Canyon에서의 공기 흡입으로 인한 정지냉각계통 기능상실사고는 그 계통이 복구되기 이전에 노심에서 비등이 일어났다. 비록 이 사고가 중대사고로 진행되지는 않았지만, 노심 손상 가능성을 충분히 입증하였다[1].

본 연구는 최적 계통 분석코드인 RELAP5 코드[2]를 이용하여, 국내 발전소에서 일반적으로 채택하고 있는 부분충수 운전중 가압기 Manway를 개방한 상태에서 정지냉각계통의 기능상실을 가정한 사고에 대해 해석 방법론을 제공하고, 현재 완전히 확립되어 있지 않은 “영광 3/4호기의 RCS 배수 및 노즐 부분충수 운전에 대한 운영절차서”를 보완하는 데 도움을 주고자 한다.

2. 영광 3/4호기의 부분충수운전중 SCS 기능상실사고 해석

2.1 RELAP5 입력 모델

영광 3/4호기는 2-Loop, 2815 MWt의 열출력을 내는 가압경수로로서, 부분충수 운전조건에 대한 RELAP5 입력모델은 그림 1에 나타난 바와 같이 총 159개의 제어체적과 170개의 Junction으로 구성되어 있다.

원자로 정지후 일차냉각계통 냉각재의 온도는 거의 대기온도와 같으므로 대기로의 열손실이 극히 적다. 따라서 코드입력을 위한 발전소의 Nodalization시, Heat Structure는 핵연료봉과 증기발생기의 전열관에 대해서만 모의하였다. 그림 9에서 Pipe Component 170과 180은 각각 노심과 노심우회 유로를 나타낸다. 노심의 입구 및 출구는 다수의 Junction을 표현할 수 있는 Branch Component 190과 160으로 나타내었으며, Branch Component 110과 200은 각각 원자로 용기의 입구 및 출구를 모델하고 있다. 여기서 두 Component간의 Junction은 고온관 노출과 하향유로(Down comer) 사이의 틈(Gap)을 모델한 것이다. 원자로 용기의 하향유로는 240, 220, 110, 120, 130 등으로 구성되어 있으며, 240과 130-04는 각각 원자로 용기의 상부 Head와 하부 공동(Lower Plenum)에 연결되어 있다.

고온관, 저온관, 펌프 흡입관 등의 유로는 Branch와 Pipe Component를 이용하여 적절하게 모델하였다. 원자로 냉각재 펌프는 저온정지 모드에서 가동하지 않기 때문에 적절한 형태 손실 계수만을 입력한 Branch로 나타냈다. 가압기는 사고시 냉각재의 방출유로로서, 보다 정확한 냉각재 방출 유량 계산을 위해 Pipe Component를 이용하여 세부적으로 나누었다. Surge Line은 고온관 A의 310 Branch Component의 출구에 연결되어 있으며, 수평 층류 모델을 적용하였다.

증기발생기의 전열관은 12개의 Volume을 갖는 Pipe Component로 모델하였다. 이들은 증기발생기의 Inlet Plenum과 Outlet Plenum을 통해 고온관 및 펌프 흡입관에 연결되어 있으며, 2차측의 Riser부분과 전열관 열 구조물을 통해서 열전달이 이루어진다. 2차측은 총 20개의 Component로 모델하였다.

또한 RELAP5 코드는 비응축성 기체가 존재할 때, 음속을 비정상적으로 낮게 예측하기 때문에, 모든 Junction에서의 Choking Option은 이용하지 않았다.

2.2 초기조건 및 정상상태 계산

가압기 Manway 개방시 비응축성 기체 및 증기발생기의 역할을 분석하기 위해 다음과 같이 두 경우로 나누어 계산하였다.

- 계산 1, 증기발생기 A : 습식보관, 증기발생기 B : 건식보관
- 계산 2, 증기발생기 A, B : 건식보관

표 1. 영광 3/4호기의 정지냉각계통 기능상실사고 계산을 위한 초기조건

| 압 력 | 일차측 : 대기압 | | 증기발생기 : 대기압 |
|------|--|-----------|-------------------------------------|
| 유체온도 | 고온관:60 °C | 저온관:50 °C | 이차측 : 50 °C |
| 수 위 | 계산 1 | 고온관 중간 | 증기발생기 A : 정상운전수위 증기발생기 B : 완전 배수 |
| | 계산 2 | 고온관 중간 | 증기발생기 A,B : 완전배수 |
| 노심출력 | 정상출력의 0.413 %(원자로 정지 48시간 후 : 11.6 MWt) | | |
| 배출유로 | 가압기 Manway (0.13 m ²) | | |

두 계산에 이용된 발전소의 초기배열(Configuration)은 표 1과 같다. 초기조건 계산을 용이하게 하기 위해 정지냉각계통은 Time Dependent Volume 및 Time Dependent Junction을 이용하여 모델하였으며, 이 계통은 Loop A,B의 고온관 하단부에서 280

kg/s씩 배수하고, 50 °C의 냉각재를 70 kg/s씩 4개의 저온관에 주입한다. 계산 결과, 약 150초부터 정지냉각계통의 유량과 고온관 및 저온관의 기포율은 작은 진폭을 갖고 계속 진동하기 때문에, 1000초에서의 결과를 초기 조건으로 채택하였다.

2.3 RELAP5 계산 결과

정지냉각계통을 모델한 Time Dependent Volume 및 Time Dependent Junction을 제거함으로써 정지냉각계통의 기능상실을 모의하여 과도기를 시작하였다. 실제 과도기 시간은 6000초이며, Time Step은 질량오차(Mass Error)를 줄이기 위해 0.001 초를 사용하였다. 계산 결과는 두 경우를 비교하여 나타내었으며, 표 2는 사고해석에 나타난 주요 사건을 비교한 것이다.

그림 2은 고온관 A의 기포율을 보이고 있다. 노심의 냉각재는 유동정체로 가열되어 375초에 노심상부에서 기포가 발생되기 시작한다. 이후 약 600초까지, 생성된 기포의 상승과 함께 원자로 용기내 냉각재의 팽창(Swelling)으로 원자로 냉각재 수위는 상승한다. 이와 같이 계통의 냉각재 팽창은 상부 공동(Upper Plenum)의 냉각재를 고온관으로 유입시켜 고온관의 기포율이 감소한다.

가압기 Manway의 개방은 Loop A에서의 압력강하를 Loop B보다 크게하기 때문에, Loop A, B가 압력 균형을 이룰 때까지 계통내의 물은 고온관 A로 이동한다. 이로 인해 고온관 A의 기포율이 보다 빨리 감소하여 600초 이후 고온관 A의 기포율은 거의 0에 가깝게 감소하는 반면에, 고온관 B의 기포율은 증가한다. Loop A와 B의 압력이 평형상태가 된 후(사고발생후 800초), 원자로 용기의 냉각재는 Loop B에도 유입되어 고온관 B의 기포율은 약 1100초까지 다시 감소한다.

약 1000초 이후부터, 계통의 압력이 상승하여 증기는 가압기 Manway를 통해 방출되기 시작한 후, 노심과 고온관 B의 냉각재는 다시 고온관 A로 이동한다. 따라서 저온관 측의 수위는 약 1200초경 4개의 저온관 아래에 위치한 하향유로(Component 120)로 내려오며, 약 1400초경 고온관 B는 거의 증기로 채워진다. 고온관 B의 기포율 증가는 고온관 A로 유입되는 액체의 양을 감소시켜 결국, 고온관 A의 기포율도 서서히 증가하여 전열관 A로의 증기유로가 형성된다.

약 1400초 이후의 고온관 기포율 증가는 계산 1, 2에서 다소 다르다. 계산 1의 경우, 전열관 A에서 증기의 응축으로 인해 Loop B에서의 냉각재 양은 계산 2에 비해 상대적으로 작다. 따라서 계산 2의 경우가 고온관 B의 냉각재를 더 늦게 배수하기 때문에 고온관 A의 기포율은 느리게 상승한다. 그럼에도 불구하고, 계산 1의 경우는 그림 3, 4의 "A", "B", "C", "D"로 인해 약 4000초 경에 수위가 고온관 하단부에 도달하여 계산 2와는 약 1000초 정도 차이를 보이고 있다.

노심 냉각재의 팽창은 노심 하부의 유량을 하향유로로 밀어내고, 노심과 하향유로 사이의 수부차를 발생시키며(그림 5), 계통의 압력증가로 가압기 Manway 방출량과 전열관에서의 응축양이 크게 증가한다. 이에 따라 노심 하부 및 하향유로의 아냉 액체가 노심 상부로 유입되어 증기 생성량과 계통 압력을 다시 감소시킨다. 이러한 계통내의 압력변화로 인해, 펌프 흡입관내의 차가운 액체가 진동하고, 결국 원자로 하향유로 입구로 유입된다. 따라서 하향 유로 입구 및 전열관에서의 증기 응축량과 가압기 Manway를 통한 증기의 방출량은 노심에서 발생되는 증기의 양을 초과한다. 이

와 같은 원자로 용기 내에서의 Manometric 기동[3][4] 때문에, 그림 2와 3의 "A", "B", "C", "D"와 같은 온도 및 압력 강하가 발생하였다.

계산 1에서 "C"의 경우, 펌프 흡입관의 냉각수가 약 300초간 계속해서 하향유로의 입구로 유입되어 일차냉각계통 압력은 급격하게 떨어진다. 결국, 가압기에 정체(Hold-up)되어 있던 액체가 Surge Line을 거쳐 고온관으로 하강하면서, Surge Line과 고온관에서 Liquid Plugging을 형성한다. 이 때문에 전열관에서의 증기 응축량이 감소하여, 계통의 압력은 Surge Line과 고온관에서 증기방출 통로가 다시 형성될 때까지 급격하게 상승하고, 약 2900초경 1.74 bar의 최고치에 이른다. 3200초경, "D"의 압력강하는 노심 하부의 냉각재 온도가 노심상부 압력의 포화 온도에 근접하여, 노심에서 증기가 거의 최대로 생성되기 때문에 Surge Line에서의 증기유량이 증가하게 된다. 따라서 이때는 가압기에서의 액체 하강을 유발하지 않는다.

노심 비등후 고온관 A의 Plugging 현상으로 시작된 계통의 가압은 약 900초경 증기발생기 B의 2차측을 채우고 있는 질소 기체의 온도가 1차측 증기와 평형상태에 도달하여 전열관 B에서의 응축이 크게 감소한 결과, 약 1000초까지 급격하게 증가한다.

1000초 이후부터 고온관에서 액체 건인이 일어나지 않을때까지 계통의 압력은 가압기에 정체된 액체(Liquid Hold-up)의 양에 따라 계속해서 증가한다. 액체의 건인은 고온관의 기포율이 대략 0.3이하여야 가능하다. 계산 2는 계산 1에 비해 전열관에서의 역류 응축이 아주 미약하기 때문에 노심에서 발생된 증기는 거의 Manway로 방출되어 가압기로의 액체 건인을 증가시킨다. 결국 1500초 이후의 압력은 보다 크게 증가하고, 유사평형상태의 압력도 계산 1보다 크게 예측된다.

계산 1의 경우, 3400초 경부터 4850초까지 하향유로 입구와 2차측의 냉각재 온도 상승으로 고온관 노즐 Gap Junction 및 전열관으로 유입되는 증기유량은 감소하는 반면에, 계통의 압력 및 Manway 방출유량은 증가한다(그림 6). 이후 하향유로의 냉각재가 노심 출구의 온도와 거의 같아지고, 이때부터 약 5400초까지 계통의 압력과 Manway 방출량은 거의 평형상태를 유지한다. 이것은 고온관의 기포율이 0.3이상일 경우, 즉, 3400초부터 노심에서 생성된 증기의 약 75 %는 고온관에서 액체를 건인하지 않고 Manway를 통해 방출되고, 25 % 정도가 증기발생기의 전열관에서 역류응축이 일어나는 상태이다. 계산 2의 경우는 전열관에서의 응축이 발생하지 않기 때문에 유사 평형상태 이후 일차계통의 압력은 0.184 MPa(1.84 bar)까지 증가한다. 하향유로 입구 냉각재가 거의 포화상태에 도달하고 난후(약 4600초)부터 5000초까지는 노심 증기발생량과 방출량이 평형을 이루어 거의 일정한 압력을 나타낸다.

그림 7에 나타난 바와 같이, 가압기내의 비응축성 기체는 600초부터 약 1100초까지 계통의 압력증가로 완전히 방출된다. 반면에 원자로 용기와 고온관의 질소 기체 중 일부는 가압기를 통해 방출되지만, 그 외의 기체는 전열관에 축적된다. 계산 2의 경우, 1200초 이후 전열관으로 증기가 흐르지 않는다. 따라서 전열관 A, B의 질소기체는 감소하지만, 계산 1에서는 전열관 A는 계속 증기가 유입되어 응축되기 때문에 계통내에 잔존하는 질소기체가 축적된다. 또한 저온관의 질소기체는 고온관 노즐 Gap Junction을 통해 증기가 유입되기 때문에 상당량이 그대로 남아 있다.

계산 1의 경우, 증기발생기 A의 2차측 냉각재는 700초 부터 약 850초까지, 계통 압력 상승으로 전열관의 질소기체가 압축되어 열전달이 이루어지므로써 2차측 냉각재

의 순환이 급격히 증가한다. 그림 1에서 640 체적의 냉각수는 원자로측의 340-01 체적으로부터 열을 전달받아 밀도가 감소한다. 따라서 이 물은 650-01 및 624의 체적으로 이동하고, 이어서 624의 체적내에 있는 냉각수가 640 체적으로 유입된다. 이와 같이 증기발생기의 고온측 Riser의 일부에서만 순환이 이루어지는 것은 증기발생기의 수위가 증기발생기의 습분분리기 하단까지 채워져 있어 증기발생기의 하향유로 상부와 Riser 상부에서의 냉각재 순환이 이루어지지 않기 때문이다(그림 8,9).

고온관 A가 냉각재 팽창에 의해 막히므로써 900초 이후 전열관 A에 도달하는 증기유량도 감소한다. 따라서 2차측의 자연순환 유량과 전열관에서 1,2차측 사이의 온도차는 감소한다. 사고 후 1000초경, 노심 상부 Node의 거의 모든 냉각재가 포화 온도에 근접하기 때문에, 노심내의 증기 생성량이 더욱 증가한다. 이로 인하여 1차측은 가압과 함께 포화온도가 상승하고, 따라서 1,2차측의 온도차와 자연순환 유량은 다시 증가한다.

계산 1은 약 5000초 이후 전열관 A와 고온관 사이에서 증기유동의 진동에 의해 전열관의 질소 기체량이 Manway쪽으로 이동함에 따라 전열관의 증기 응축량은 5400초 이후 급격하게 늘어난다. 이로 인하여 다시 Manway로의 방출량이 감소하고, 5800초경 노심 노출이 발생하면서 더욱 감소한다. 반면 계산 2는 5000초에 노심 상부의 핵연료봉이 노출되면서 계통의 압력은 급강하한다. 약 5900초에 두 번째의 핵연료봉이 노출되어 다시 한번 압력은 크게 떨어진다.

표 2. 주요 현상의 발생시간 비교

| 사건 | 계산 시간(s) | |
|---------------|------------------|-----------------|
| | 계산 1 | 계산 2 |
| 정지냉각계통 기능 상실 | 0.0 | 0.0 |
| 노심 비등 | ~375 | ~375 |
| 액체 건인 시작 | ~600 | ~600 |
| 유사 평형상태 도달 | ~3400 | ~2650 |
| 수위 고온관 하단부 도달 | ~3920 | ~3100 |
| 최고 압력 도달 | ~2930(0.174 MPa) | ~4700(0.18 MPa) |
| 노심 노출 | ~5800 | ~5000 |

이상에서 살펴본 바와 같이, 유사 정상상태에서 계통 압력은 계산 2의 경우가 계산 1의 경우에 비해 약 16 kPa(0.16 bar) 정도 더 높게 계산하며, 격납용기로의 냉각재 방출량은 6000초까지 계산에서 약 4600 kg 정도 더 많다(그림 10). 이로 인해 핵연료봉은 약 800초 빨리 노출되었으며(그림 11), 가압기 Manway를 통해 비록 적은 양이지만 이상유체가 방출되었다. 따라서 계산 2와 같은 원자로 배열은 현재의 영광 3/4호기의 부분중수 운전 절차서에 따르면 사고 발생후 약 45 분 이후에는 중력급수가 불가능하다.

3. 결론

본 연구는 부분중수 운전중 정지냉각계통의 기능상실사고시에 일차냉각계통의 열수력 거동에 대한 이해를 높이고, 또한 현재 추진중인 영광 3/4호기의 부분중수 운전 절차서 개정에 참고가 되는 근거를 마련하기 위해 수행되었다.

두 경우에 대한 사고해석 결과, 사고 발생후 약 6분 경에 노심에서 비등이 발생하였으며, 노심 노출은 계산 1에서 5800초경, 계산 2에서 5000초경에 발생하였다. 계산 1의 경우, 유사 정상상태에서의 최고압력이 1.64 bar로서 현재의 부분충수 운전절차서에 명시되어 있는 RWST의 수위(70%)에 의해 충분히 중력급수가 가능하다. 그러나 계산 2의 경우는 1.84 bar로 계산되었으며, 보다 많은 냉각재가 방출되고 또한 중력급수가 불가능하다. 따라서, 이러한 원자로 배열하에서는 최소한 1대 이상의 증기발생기에 충수를 하거나, RWST의 수위를 84% 이상으로 증가시키도록 운전절차서의 개정이 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] S.A. Naff, G.W. Johnsen, D.E. Palmrose, et al, Thermal-hydraulic Processes During Reduced Inventory Operation with Loss of Residual Heat Removal, NUREG/CR-5855, EGG-2671, April, 1992
- [2] K.E. Carlson, R.A. Riemke, S.Z. Rouhani, and W.L. Weaver, RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG-5535, EGG Idaho, 1990
- [3] Y. A. Hassan, L. L. Raja, Simulation of Loss of the RHR During a Mid-loop Operations and the Role of Steam Generators in Decay Heat Removal Using the RELAP5/MOD3 Code, Nuclear Technology Vol. 103, 1993
- [4] Nobuyuki Fusita and David A. Rice, Core Boiling During Mid-Loop Operation, Nuclear Technology, Vol. 93, 1991

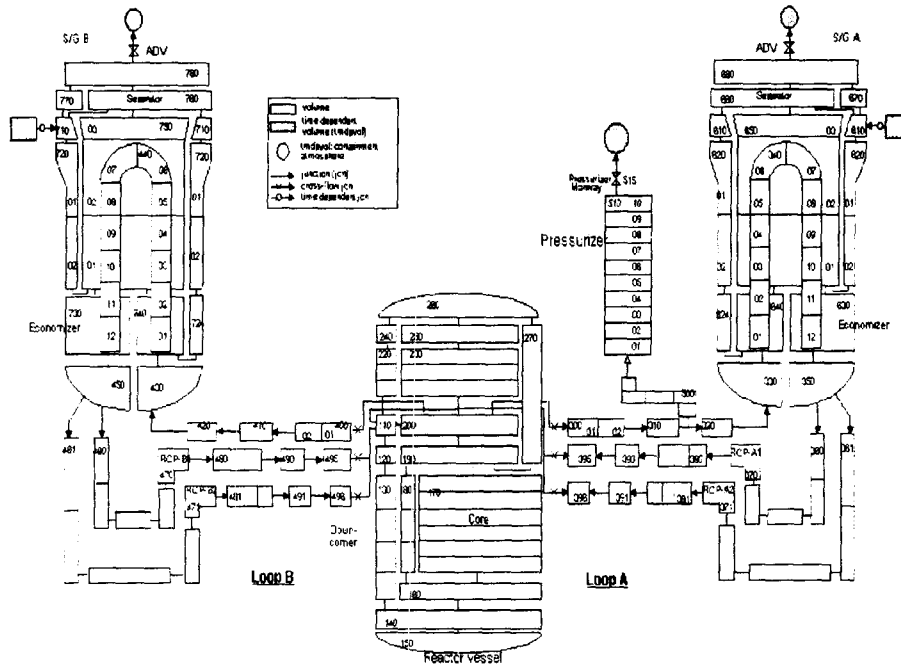


그림 1. 영광 3/4호기의 정지냉각계통 상실사고에 대한 코드 입력모델

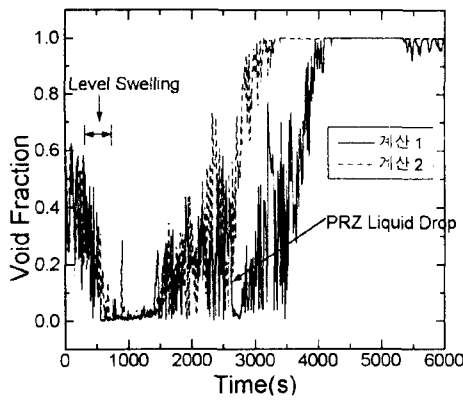


그림 2. 고온관 기포율

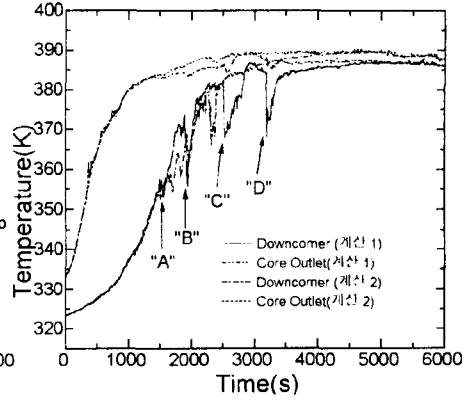


그림 3. 하향유로 입구 및 노심출구의 온도

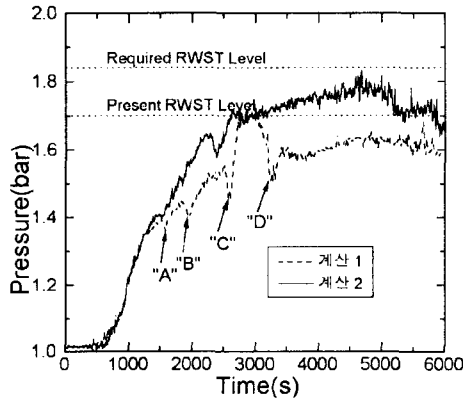


그림 4. 상부공동 압력

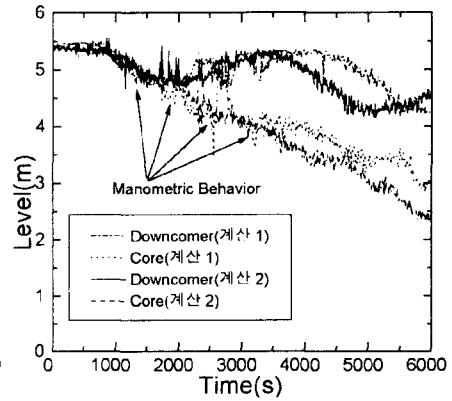


그림 5. 하향유로 및 노심 수위

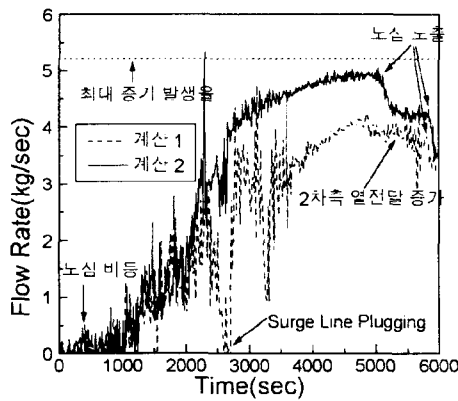


그림 6. 가압기 Manway 방출량

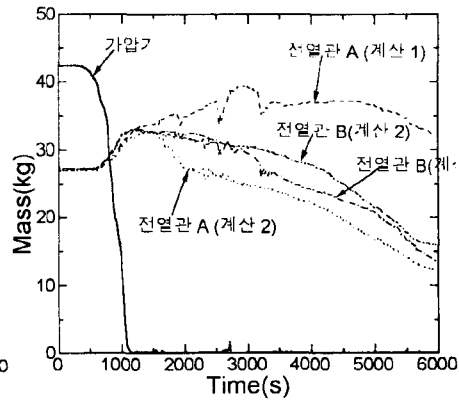


그림 7. 계통내의 비응축성 기체 질량

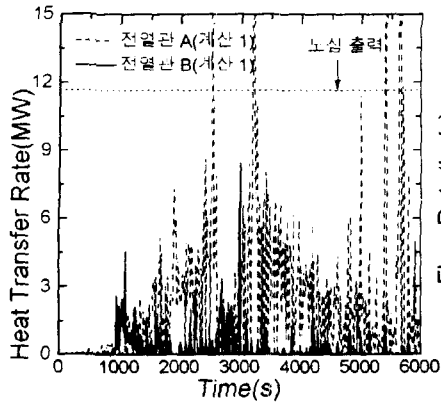


그림 8. 전열관 열제거율

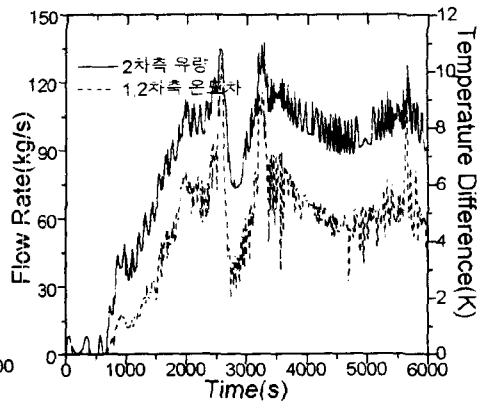


그림 9. 2차측 유량 및 1/2차측 온도차

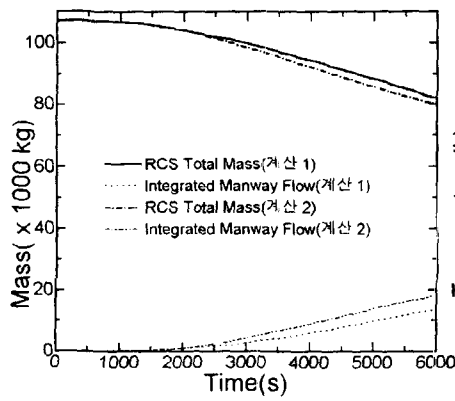


그림 10. 1차계통 냉각제 감소량

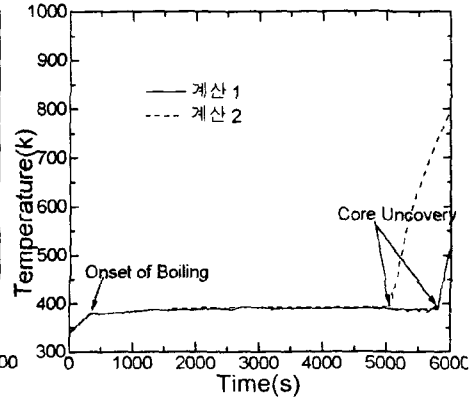


그림 11. 핵연료봉 온도