

Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고시 수위지시계 파손 및 Letdown 유동효과 분석

김원석, 손영석, 정영종, 김경두, 장원표
한국원자력연구소

요약

Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고를 모의 실험한 Bethsy 6.9d에 대해 CATHARE2 코드를 이용하여 해석하였다. 이 실험의 초기조건은 계통수위를 고온관 중간까지 낮추고, 그 윗부분은 비응축 가스로 차 있는 midloop 상태를 유지하는 것이다. 잔열은 원자로 정지 2일 후를 가정한 노심출력을 사용하였으며, 계통내 방출유로는 상부의 Upper head vent와 가압기 vent 및 고온관 1에 연결된 Letdown line과 수위지시계 방출유로가 열려 있다고 가정하였다. 또한 세 개의 loop중 증기발생기 한대만 이용 가능하고, 나머지 두 대는 이차측이 공기로 가득 차 있는 상태를 유지하였다. 이 연구의 주된 목적은 midloop 운전중 RHR 기능 상실사고에 대한 위와같은 상태에서 계통의 열수력적 현상을 실험을 통해 이해하고 코드 예측능력을 평가하는 것이다. CATHARE2 코드 계산결과 대체적으로 실험의 현상을 잘 모의하고 있으나 다음 사항에 대해서는 차이를 보이고 있다. 첫째 노심내 물의 혼합을 적절히 모의하지 못하여, 노심내 국부적 증기 발생 시점이 실험에 비해 약 250초 빨리 나타났다. 둘째 노심에서 고온관으로의 물의 유입이 많아 고온관에서 기포율이 실험에 비해 낮게 나타났다. 마지막으로 밀림관(surge line)에서 물의 유입에 의한 압력차가 실험보다 높게 나타났다.

I. 서론

핵연료 재장전 및 기타 보수유지를 위해 필요시에는 일차냉각계통 냉각수 수위를 고온관 중간까지 낮추고 잔열제거(RHR : Residual Heat Removal) 계통을 운전하게 되는데, 이러한 운전모드를 부분충수(Midloop) 운전이라고 한다. 이때 고온관 윗부분은 비응축성 가스 또는 증기로 차 있게 된다.

Midloop 운전중 RHR 상실사고는 전원상실, 격리밸브 오동작, RHR 계통내 공기유입등으로 발생할 수 있으며, 실제 이러한 사고는 노심에 손상을 줄 수 있다는 것이 여러 발전소의 경험에 의해 알려져 있으며, 이러한 이유로 최근 Midloop시 사고에 대해 많은 관심이 모아지고 있다. Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고시 중요한 열수력 현상에 대해서는 Naff, et. al. (1992)에 의해 발표되었으며, 최적 계산용 열수력 코드를 사용하여 이러한 사고 해석에 많은 연구가 활발히 진행중이다. 특히, RELAP5(Calsan, 1990)와 CATHARE2(Barre, 1990)를 이용한 해석을 활발히 수행하고 있는데(Hassan and Raja, 1993 ; Hassan and Banerjee, 1994 ; Noel and Deruaz, 1994) 이들 두 코드 모두 비응축성 기체에 대한 영향을 평가할 수 있는 코드로 이상유동 모델을 사용하고 있다.

본 연구에서는 Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고를 실험한 Bethsy 6.9d에 대해 CATHARE2 코드를 이용하여 해석하였다. 본 연구의 주된 목적은 계통내 비응축성 기체가 존재할 경우 증기발생기를 통한 열제거 및 계통의 열수력적 현상들의 이해와 코드의 이와같은 현상들에 대한 예측능력 평가에 있다.

II. 실험 개요 및 CATHARE2 계산

II-1. Bethsy 실험장치

Bethsy 실험장치는 CEA, EDF 및 FRAMATOME사의 공동 지원으로 3-loop 가압 경수로형 원자로의 과도현상을 연구하기 위한 총체적 실험장치이다. 원자로 냉각재 계통의 비대칭적인 냉각을 고려하기 위하여 실제 원전의 loop과 같은 3-loop을 모의 실험할 수 있는데, Bethsy 실험장치에 대한 상세한 내용은 Bazin(1988)에 의해 정리되었다. Bethsy는 원전의 실제압력을 모의할 수 있는 실험장치로 일차계통의 최고 작동압력은 17.2MPa이고, 이차측은 8MPa까지 유지할 수 있으며, 노심출력은 참조 발전소의 붕괴열 모의에 적합하도록 실험장치 정격출력의 10%인 3MW로 제한되어 있다. Bethsy의 체적은 1/100로 축적된 반면 높이는 1/1로 설계되었다. 높이를 축적하지 않고 실제값을 유지하는 이유는 많은 사고들이 사고초기에 RCP가 정지되기 때문에 수두에 영향을 미치는 중력이 일차계통에 중요한 역할을 하기 때문이다.

II-2. Bethsy 6.9d 실험 개요

실험은 크게 두 단계로 나누어져 수행되었으며, 실험 초기상태는 계통수위를 고온관 중간까지 낮추고 상부는 비응축성 기체로 채웠다. 또한 증기발생기는 1대만 이용 가능하도록 증기발생기 1의 이차측 수위를 정상수위로 유지한 반면 나머지 2대의 증기발생기 이차측은 공기가 들어차 있도록 하였다. 노심출력은 원자로 정지 2일후를 가정하였으며 계통내 방출유로는 Upper head와 가압기 상부에 각각 직경 1.81mm의 관, loop 1에 연결된 Letdown 유로와 수위지시계의 파손으로 인한 유로가 열려있는 것으로 가정하였다. 첫 번째 단계는 1800초까지로 방출유로의 열림과 동시에 노심출력이 상승함으로써 519초에 일차계통이 포화상태에 도달한다. 이때부터 계통은 가압되어 960초에는 가압기로 고온관의 물이 유입되기 시작한다.

두 번째 단계는 1800초부터 시작하여 실험이 끝나는 32450초까지이며, 이때의 주요현상으로는 다음과 같다. 1800초에 Letdown 방출유로가 닫히며, 증기발생기 1의 대기방출밸브가 열리게 된다. 또한 증기발생기 1의 물이 포화온도에 도달하여 증기가 발생하며 동시에 대기방출밸브로 빠져나가 이차측 수위가 낮아지기 시작한다. 이와함께 일차측 압력은 계속 상승하게 되고 이차측 수위가 더 낮아지게 되면 증기발생기 U-튜브를 통한 일차측에서 이차측으로의 열전달이 위협 받게 된다.

II-3. CATHARE2 압력 모델 및 정상상태 계산

CATHARE2 코드는 불란서에서 개발한 원전의 최적 계산용 열수력 코드로 1-D, 2-fluid, 6-equation 모델을 채택하고 있으며, 비응축성 가스는 증기와 열적 평형상태에 있고, 그 속도는 증기의 속도와 같다고 가정한다. 실험과 같이 Letdown과 수위지시계 방출유로는 loop 1에 연결시켰으며, 가압기는 loop 2에 연결하였다. 상부 두 Vent(가압기와 Upper head)와 하부 두 Vent(Letdown과 수위지시계)는 모두 대기압 상태로 열려 있으며 증기발생기 1만 이차측이 정상수위를 유지하는 것으로 모의하였다. 과도기중 가압기 및 밀림관(Surge line)으로의 물의 유입을 보다 정확히 모의하기 위하여 밀림관의 node수를 상세히 나누었으며 전체 node수는 일차계통이 375, 이차계통이 136으로 총 511개의 node가 사용되었다(그림 1). 계통수위를 고온관 중간까지 낮추기 위해 하부공동에서 물을 배출하였으며 압력은 N_2 가스를 이용하여 계통압력을 대기압 상태로 유지하였다. 이때 N_2 가스는 상부공동에서 CATHARE 모듈중 Source를 이용하여 주입하였다. 표 1은 초기조건으로 실험과 계산을 비교한 것이다.

III. 계산결과

본 연구에서는 CATHARE2 코드를 이용하여 실험의 첫 번째 단계인 1800초 까지를 모의하였다. 과도기는 방출유로를 열고 노심출력을 정격출력의 0.5%인 140kW까지 상승시키면서 시작된다.

그림 2은 상부공동(Upper plenum)에서의 압력을 나타낸 것이다. 실험과 계산 모두 약 500초까지는 계통의 물이 포화상태로 가열되는 단계로 계통압력에는 영향을 미치지 않으며, 이후 부터는 노심내부에서 증기가 발생하여 계통압력이 급격히 상승하고 있다. 계산결과 약 750초에서 일시적으로 압력이 하락하다가 850초에서 다시 상승하는데 이 원인은 500초 이후 노심 내에서의 Swelling 현상이 과다하여 실험에 비해 많은 물이 고온관으로 유입되어 밀림관(Surge line)을 막음으로써 계통압력을 급격히 증가시켜 고온관 1에 연결되어 있는 Letdown과 수위지시계를 통하여 다량의 물이 방출하게 된다. 이때 Upper head와 연결된 Upper head bypass를 통해 Upper head 및 상부공동내 증기가 빠져나감으로써 일시적으로 계통압력이 떨어졌으나, Upper head bypass를 통해 Downcomer로 내려온 증기중 일부는 응축하면서 Downcomer 수두를 높여 노심입구를 통해 찬 물이 유입됨으로써 그림 3에서 보듯이 노심입구 온도가 갑자기 떨어지는 현상을 보이고 있다. 이렇듯 상부공동과 Downcomer 사이에 bypass를 통한 압력의 진동 현상으로 이 기간에 노심입구 온도도 진동하는 모습을 볼 수 있다. 그러나 실제 실험에서는 Upper head bypass를 통한 유량이 계산보다 적어 이와같은 현상은 나타나지 않았다. 계산결과 1100초 부근에서 다시 계통압력이 떨어지는 현상은 증기발생기 1의 Reflux cooling 영향에 의해 이차측으로 열전달이 시작되면서 이루어진 현상이다. 그러나 증기발생기 1대 만으로는 잔열이 충분히 제거되지 않아 다시 압력은 상승하게 된다. 이와같은 현상을 실험에서는 그림 2 및 표 2에서 보듯이 약 960초에서 발생하고 있다. 이후 실험에 비해 계산이 계통압력면에서 계속 높게 나타난 원인은 계산이 실험에 비해 노심내 많은 물이 고온관으로 유입됨에 따라 노심내 증기량이 많아져 발생한 현상이다.

그림 3는 노심 입구와 출구에서의 온도를 나타낸 것이다. 노심 입구온도는 실험값과 비슷하나 노심내에서 실제 발생하는 자연순환 현상 즉, 3차원적 유동형태를 1차원 코드가 잘 예측하지 못하여, 출구온도는 실험과 비교할 때 초반부에 높게 예측하였다. 그러나 서서히 노심내부가 포화온도에 도달하면서 실험값에 근접함을 볼 수 있다.

그림 4는 고온관 1에서의 기포율을 나타낸 것이다. 노심출력의 증가로 서서히 Swelling 현상이 발생하다가 계산에서는 약 250초에 노심내 국부적 포화온도 도달로 인한 증기발생으로 다량의 물이 고온관으로 유입되고 있다. 이로 인해 Letdown 방출유로로 일시적인 방출량이 많아져 고온관내 기포율이 다소 상승하나 계속되는 노심내 증기발생과 Swelling으로 고온관에 많은 물이 존재하게 된다. 실험은 포화온도에 도달하는 약 500초에서부터 고온관으로 물이 유입되어 기포율이 낮아지며, 그 량에 있어서도 계산보다 작아 고온관 기포율 면에서 계산과 차이가 많이 난다. 이는 계면마찰력에 있어서 계산이 실험에 비해 크게 예측하고 있는 것으로 추측된다.

그림 5은 노심 압력차를 나타낸 것이다. 초기량은 같지만 노심내 국부적 증기발생이 일어나면서 실험에 비해 많은 물이 고온관으로 Swelling되어 올라갔음을 볼 수 있다. 약 750초와 1100초에서 일시적으로 압력이 진동함으로써 Downcomer에서 밀려 내려온 찬 물이 노심하부를 통해 들어와 노심압력차를 상승시켰다. 1800초에서 실험과 비교해 볼 때 계산이 노심압력차를 약0.007bar 정도 낮게 예측하고 있다.

그림 6은 밀림관과 가압기에서의 압력차를 나타낸 것이다. 실험과 계산 모두 약 500초까지는 계통온도가 올라가는 기간이다. 이 때는 노심내 증기발생도 미미하여 고온관에서 밀림관으로 물을 유입시킬 만큼 증기속도가 높지않으나, 상부공동이 포화상태에 도달하는 500초 이후 부터는 증기속도가 증가하여 밀림관으로 물을 유입시키고 있다. 실험에서는 약 930초까지 밀림관으로 물의 유입이 계속되다가 이후에는 밀림관의 물이 가압기로 밀려 올라가면서 밀림관에서는

압력차가 줄어드는 현상을 보이고 있다. 계산인 경우 750초에 상부우회유량이 일시적으로 증가 하면서 밀림관으로 유입되던 물이 다시 고온관으로 떨어지는 현상이 나타나고 있다. 다시 계통이 가압되면서 약 1100초까지 계속 밀림관으로 물의 유입이 진행되다가 이후 가압기로 물이 밀려 올라가는 현상을 보이고 있다. 이후 증기발생기를 통한 열전달과 함께 계속적으로 Letdown vent를 통해 물이 빠져나감으로써 압력차에 변화를 가져온다. 이 경우 물이 밀림관과 가압기 사이를 올라갔다 내려갔다 하면서 점차 고온관으로 물이 빠지기 시작하여 가압기로의 증기통로가 다시 형성되면서 그림 7에서 보듯이 가압기 방출구로 방출유량이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 실험에서는 960초에 가압기로 물이 올라가면서 방출유로를 통한 유량이 급증하나 이후 가압기 및 밀림관에서 물이 빠지는 현상이 서서히 진행됨에 따라 방출유량도 조금씩 증가하고 있다. 1800초에서의 방출유량을 비교해 보면 코드가 계통압력을 높게 예측하고 있으므로, 실험에 비해 0.2 g/s정도 많이 방출되고 있는 것으로 나타났다. 다만 밀림관에 물이 많이 차 있던 1000초에서 1500초 사이에서는 계산이 실험에 비해 다소 적은양이 가압기 방출유로를 통해 빠져나가고 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

부분충수 운전중 잔열제거 기능 상실사고를 실험한 Bethsy 6.9d에 대해 CATHARE2를 이용하여 계산하였다. 일반적인 현상에 대해서 계산은 실험을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 다만 다음과 같은 부분에 있어서는 실험과 차이를 보이고 있다.

(1) 약 750초에 Upper head bypass량 유동에 있어서 계산이 실험에 비해 많아 이로인한 Downcomer와 상부공동 사이의 압력진동으로 계통압력이 하락되고 노심입구 온도도 실험에 비해 일시적으로 낮게 예측하였다.

(2) 노심내에서 다차원 유동현상은 코드의 한계 때문에 노심내 국부적 증기발생 시점이 실험에 비해 약 250초 빨리 나타났다.

(3) 노심 Swelling 현상에 의한 노심에서 고온관으로 유입되는 유동량이 실험에 비해 계산이 많아 고온관에서의 기포올면에서 계산이 실험보다 낮게 예측하였다. 즉, 노심에서의 액적화 모델 개선이 필요하다.

(4) 밀림관에서의 압력차가 실험보다 크다. 이는 실험에 비해 많은 물이 고온관으로 부터 밀림관으로 유입된 결과이며, 가압기를 통한 방출유량도 이런 영향으로 인해 실험과 차이를 보이고 있다.

(5) 향후 여러 현상에 원인이 되고 있는 계면마찰력과 Branch 모듈에 대한 민감도 분석을 수행할 필요가 있다.

(6) 계산은 HP 9000에서 수행되었으며 1800초 실험을 모의 계산하는데 CPU 시간으로 75,000초 사용되었다. 계산시간 절약을 위해 Nodalization의 최적화가 필요하다.

V. 참고문헌

- [1] Barre, F. and Bernard, M., 1990, "CATHARE Code Strategy and Assessment", Nucl. Eng. Des. 124, pp. 257-284.
- [2] Bazin, P., "Bethsy Data Base", SETh/LES/87-38, France
- [3] Carlson, K. E. et al., 1990, RELAP5/MOD3 Code Manual(Draft), NUREG/CR-5535, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [4] Hassan, Y. A. and Banerjee, S. S., 1994, "RELAP5/MOD3 Simulation of the Loss of the Residual Heat Removal System during a Midloop Operation Experiment Conducted at the ROSA-IV Large-Scale Test Facility", Nucl. Tech. 108, pp. 191-206.
- [5] Hassan, Y. A. and Raja, L. L., 1993, "Analysis of Experiments for Steam Condensation in

the Presence of Noncondensable Gases Using the RELAP5/MOD3 Code", Nucl. Tech. 104, pp. 76-88.

[6] Naff, S. A., et al., 1992, Thermal-Hydraulic Processes during Reduced Inventory Operation with Loss of Residual Heat Removal, NUREG/CR-5855, U.S. Nuclear Regulatory Commission.

[7] Noel, B. and Deruaz, R., 1994, "Reflux condensation with Nitrogen in Steam Generator U-tubes; Analysis of BETHSY Test 7.2c Using CATHARE Code", Proc. Intl. Symp. on Multiphase Flow and Heat Transfer, Sep. 19-21, 1994, Xi'an, China.

표 1. 초기조건

| Parameter | Bethsy | Cathare2 |
|--------------------------------|----------------|----------------|
| Upper plenum pressure (Bar) | 1.+/- 0.08 | 1.02 |
| SG secondary pressure (Bar) | 1.22/1.0/1.0 | 1.22/102/1.02 |
| Coolant temperature (C) +/-2 C | | |
| Core inlet/outlet | 63.6/63.6 | 65.0/63.0 |
| Hot legs | 62.8/63.3/61.4 | 62.7/62.7/60.7 |
| Cold legs | 52.4/53.0/53.0 | 52.2/52.3/52.1 |
| SG 1 riser (avg.) | 65.0 | 64.5 |
| Total primary mass (kg) | 1135+/-30 | 1106 |
| Total secondary mass (kg) | 1155+/-50 | 1135 |

표 2. 주요사건 발생시간

| Event observed in experiment | Bethsy (Exp.) | CATHARE (Cal.) |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| Upper plenum saturates, s | 519 | 500 |
| Entrainment in pressurizer | 960 | 1100 |
| Upper head in vapor | 1120 | after 1800 |
| Exchange pri / sec | 1207 | 1100 |
| pressuriser in vapor | 1792 | after 1800 |

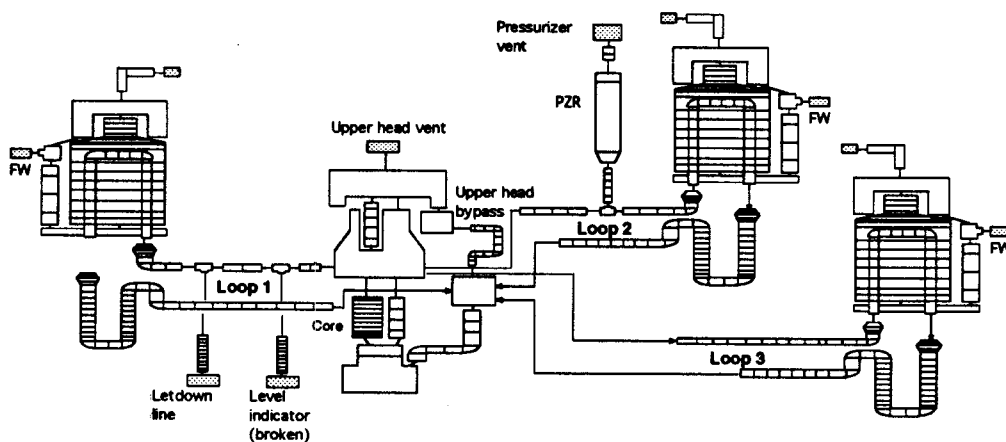


그림 1 CATHARE2 nodalization for Bethsy 6.9d test.

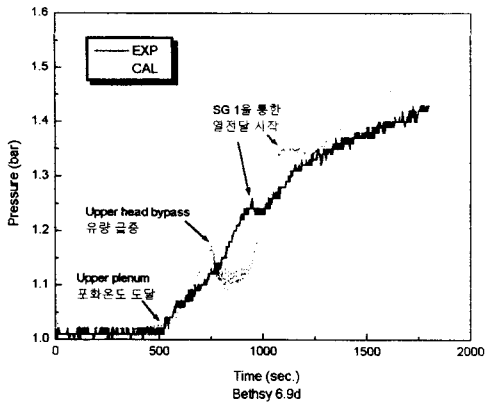


그림 2. 일차계통 압력 (상부공동)

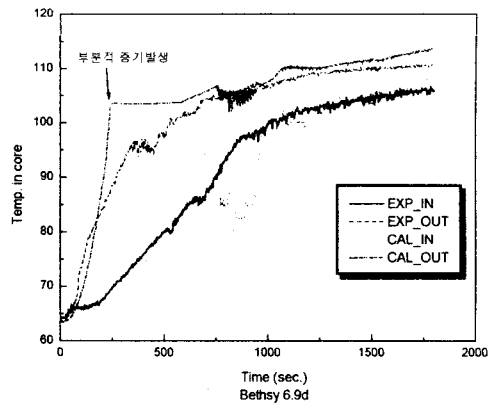


그림 3. 노심온도

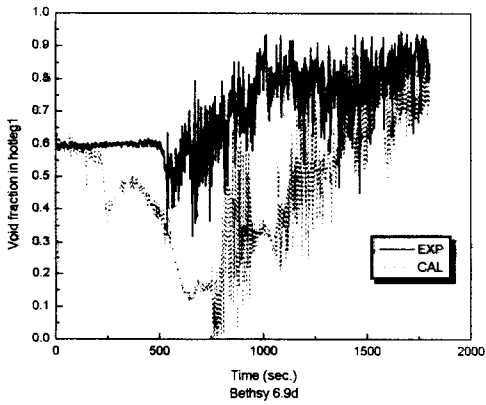


그림 4. 고온관 1에서의 기포율

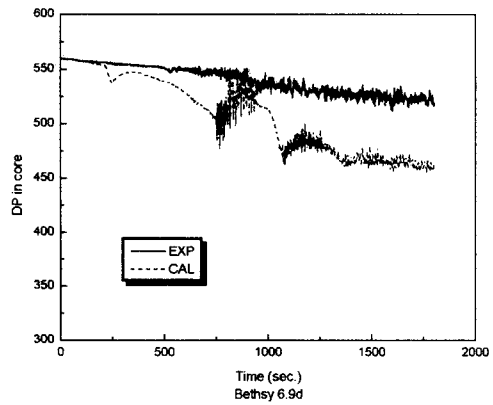


그림 5. 노심 압력차

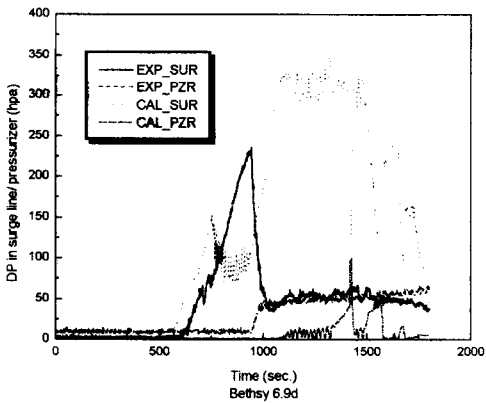


그림 6. 밀리관/가압기 압력차

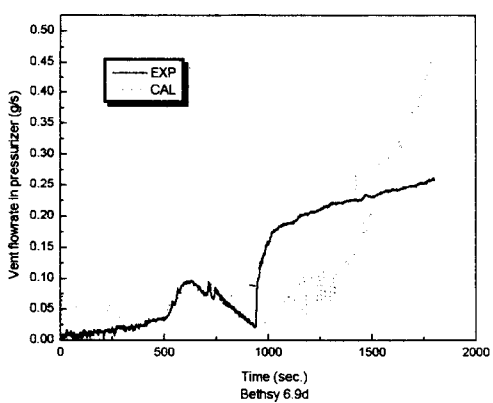


그림 7. 가압기에서의 방출유량