KR9700135

KAERI/TR-863/97

Mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통내 방출유로가 있는 경우 중력주입을 이용한 사고완화에 관한 연구

A study on the potential to delay core damage using gravity drain under loss of RHR during midloop operation with RCS opening

한 국 원 자 력 연 구 소

VOL 21 No 22

KAERI/TR-863/97

기술보고서

Mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통내 방출유로가 있는 경우 중력주입을 이용한 사고완화에 관한 연구

A study on the potential to delay core damage using gravity drain under loss of RHR during midloop operation with RCS opening

한 국 원 자 력 연 구 소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

이 보고서를 기술보고서로 제출합니다.

제목 : Mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통내 방출유로가 있는 경우 중력주입을 이용한 사고완화에 관한 연구

1997 년 6 월

참여 연구원

주저자 : 김 원 석

공동저자 : 장 원 표

감수위원 : 송 철 화

요 약

본 연구는 Mid-loop 운전중 잔열제거(RHR) 기능 상실사고시 계통내 가압기 Manway 및 증기발생기 입구공동(Intet plenum) Manway가 열려있는 경우를 실험한 불란서 대형실험 BETHSY 6.9b에 대해 최적 열수력 전산코드인 CATHARE2를 사용하여 모의 분석하였다. 본 연구의 목적은 이러한 사고발생시 계통내 열수력 현상을 이해하고 CATHARE2 코드의 예측능력을 평가 하는데 있다.

이 실험에서 사용된 가정은 다음과 같다. 노심잔열은 정격출력의 1.3%(370kW)로서, 실험 전 기간 일정하며, 이차측은 3 Loop이 모두 공기로 가득차 열전달이 이루어지지 않는 것으로 가정하였다. 초기 계통압력은 1.12bar이며, 과도기 시작과 동시에 가압기 및 증기발생기 Manway는 열리는 것으로 가정하였다. Rod 온도 상승에 따라 실험 도중 중력주입과 강제주입이 저온관 3에 연결된 주입노즐을 통해 공급된다.

이상과 같은 가정을 사용하여 CATHARE2 코드를 이용한 계산결과는 다음과 같다. (가) 초기에 증기발생기 Manway를 통해 빠져나가는 증기량에 있어서 계산결과가 실험에 비해 높게 예측하므로서 계통압력을 일시적으로 낮게 예측하였으나, 곧이어 주입되는 중력주입의 영향으로 1600초에 발생하는 Loop seal clearing 시점 및 이로인한 압력 증가는 실험과 잘 일치한다. (나) Rod 온도에 따라 주입되는 중력주입은 계산이 실험보다 13초 빨리 주입되었으며, 또한 강제주입도 Rod 온도 상승을 과대예측한 계산의 경우가 100초 빨리 주입되었다. (다) 노심노출은 실험이 848초, 계산은 830초에 시작하여 계산이 실험에 비해 18초 빨리 발생하였다. 이 실험과 코드의 모의 결과를 통하여 노심노출 방지를 위해서는 중력주입에 의한 냉각수 보충만으로는 부족하고 강제주입이 필요함을 확인하였다.

결론적으로 실험과 계산을 비교할 때에 국부적으로 약간의 차이가 조금씩 발생하고 있으나 전반적인 경향이나 흐름은 계산이 실험을 비교적 잘 모의하고 있으며, 특히 계통압력, 중력주입 시점 및 노심노출 시점에 있어서 CATHARE2 코드는 실험을 타당하게 예측하는 것으로 나타났다.

SUMMARY

The present study is to analyze an integral test, BETHSY test 6.9b, which represents the loss of RHRS accident during mid-loop operation with pressurizer and SG inlet manway open using the best estimate code CATHARE2. The main purposes are to gain insights into the physical phenomena involved and to assess the capability of CATHARE2 prediction.

In this work the following assumptions are used. The constant core power was maintained at 1.3% of nominal power(370kW) throughout the transient. None of the three steam generators was used as heat sink for this test since they were filled with air and isolated. Initially the pressure in the vessel was 1.12bar. The pressurizer and SG manway discharges were opened to the atmosphere. Gravity and forced feed injections were started when the temperature of the heater rods exceeded the setpoints.

Most of important physical phenomena in the experiment have been predicted by the CATHARE2 code. The pressure in the upper plenum is predicted lower until 300s after loss of RHR because the SG manway flowrate is overestimated than that in the test. But the time for loop seal clearing and pressure incresing after then are predicted well. The times of the gravity and forced injections are calculated earlier by 13sec and 100sec. The core uncovery time in CATHARE2 calculation is estimated at 830sec, which is earlier by 18sec compared with 848sec in experiment. It is demonstrated that not only gravity drain but forced feed injection are required to prevent the core uncovery.

Although some of disagreements between measurements and predictions are found in the detailed phenomena, the code predicts reasonably well the overall system behaviors, including the system pressure, the times for gravity feed injetion and core uncovery.

목 차

1. 서론 ---------- 7

2. 부분충수 운전중 사고해석 ---------- 9

2.1 부분충수 운전 및 사고 시나리오 ---------- 9

2.2 사고시 열수력 현상 ---------- 12

3. BETHSY 6.9b 계산 ---------- 14

3.1 BETHSY 실험 소개 ---------- 14

3.2 BETHSY 6.9b 실험 개요 ---------- 14

3.3 CATHARE2 입력모델 및 계산 ---------- 15

3.4 계산결과 ---------- 16

4. 결론 ---------- 22

5. 참고문헌 ---------- 23

표 목 차

표 1. 종합 실험 장치 개요
표 2. BETHSY 실험장치의 실험수행 현황
표 3. BETHSY 6.9b 초기조건
표 4. BETHSY 6.9b 주요현상 발생 시간

그 림 목 차

그림 1. RHRS 상실사고시 가능한 시나리오 및 냉각방법
그림 2. BETHSY 실험장치의 개략적인 일차계통 단면도
그림 3. BETHSY 실험장치의 일차냉각계통의 각 부분 높이
그림 4. BETHSY 실험장치의 증기발생기 개략도
그림 5. BETHSY 6.9b Nodalization
그림 6. Pressurizer manway configuration
그림 7. SG inlet plenum manway configuration
그림 8. 노심 출력
그림 9. Upper plenum pressure
그림 10. Injection fluid temperature
그림 11. Injection mass flowrate
그림 12. Core DP
그림 13. Upper plenum DP
그림 14. Downcomer DP
그림 15. Pressurizer DP
그림 16. Surge line DP
그림 17. SG inlet plenum DP (Loop 1)
그림 18. SG inlet plenum DP (Loop 2)
그림 19. SG inlet plenum DP (Loop 3)
그림 20. Crossover leg DP (Loop 1, SG side)
그림 21. Crossover leg DP (Loop 1, pump side)
그림 22. Crossover leg DP (Loop 2, SG side)

그림 23. Crossover leg DP (Loop 2, pump side)
그림 24. Crossover leg DP (Loop 3, SG side)
그림 25. Crossover leg DP (Loop 3, pump side)
그림 26. Hot leg temperature (Loop 1)
그림 27. Hot leg temperature (Loop 2)
그림 28. Hot leg temperature (Loop 3)
그림 29. Cold leg temperature (Loop 1)
그림 30. Cold leg temperature (Loop 2)
그림 31. Cold leg temperature (Loop 3)
그림 32. Downcomer temperature
그림 33. Core fluid temperature
그림 34. Rod temperature
그림 35. Void fraction in hot leg 1
그림 36. Void fraction in hot leg 2
그림 37. Void fraction in hot leg 3
그림 38. Void fraction in cold leg 1
그림 39. Void fraction in cold leg 2
그림 40. Void fraction in cold leg 3
그림 41. Void fraction in surge line
그림 42. Pressurizer manway mass flowrate
그림 43. SG manway mass flowrate
그림 44. Downcomer mass flowrate
그림 45. Upper head bypass mass flowrate
그림 46. Integrated mass flow through pressurizer manway
그림 47. Total mass in RCS
그림 48. Integrated SI fluid mass flow
그림 49. Integrated mass flow through SG manway
그림 50. Void distribution in the core

1. 서 론

가압경수로(PWR : Pressurized Water Reactor)에서 핵연료 재장전, 증기발생기(SG : Steam Generator)의 세관검사 및 보수 그리고 원자로 냉각재 펌프(RCP : Reactor Coolant Pump)의 Seal 교체 등을 목적으로 원자로 냉각재 계통(RCS : Reactor Coolant System)의 수위를 고온관 중간까지 낮추고 잔열제거(RHR : Residual Heat Removal) 계통을 이용하여 노심의 잔열을 제거하게 되는데, 이러한 운전모드를 부분충수(Mid-loop) 운전이라고 한다. 이때 일차계통의 윗부분은 증기나 비응축성 가스와의 혼합물 상태로 차 있게 된다. 이러한 부분충수 운전중 수위가 너무 높아지면 증기발생기 Manway 등과 같은 방출유로를 통하여 냉각수가 흘러나가게 되고, 또 수위가 너무 낮아지면 잔열제거계통에 공기의 유입이 발생하여 잔열제거펌프가 그 기능을 상실함으로써 원자로의 잔열이 적절히 제거되지 못하고 축적되므로서 노심에서의 냉각재 비등으로 인한 Inventory 감소로 노심노출을 초래하여 노심손상을 입을 가능성이 있다.

Mid-loop 운전중 RHR 기능 상실사고는 다음과 같은 원인에 의해서 발생할 수 있다. (가) 잔열제거계통에 공기유입으로 인한 잔열제거펌프 정지, (나) 잔열제거계통내 밸브 열림으로 인한 냉각재 상실, (다) 필수교류 전원 상실, (라) 잔열제거펌프의 자체고장, (마) 일차계통에서 RHR로 향한 격리밸브의 오동작 등이다. 이와같은 원인으로 인해 잔열제거 기능이 상실되면 노심 냉각재가 비등하고 적절한 조치가 없을 경우 노심노출로 이어져 노심손상을 유발할 수 있다.

사고후 주된 열제거 수단은 증기발생기 U-튜브를 통한 Reflux cooling과 계통내 방출유로를 통한 냉각재의 방출이다. Reflux cooling은 노심에서 발생한 증기가 증기발생기 U-튜브내로 이동되어 비응축성 가스를 U-튜브의 윗부분으로 압축함에 따라 U-튜브 표면이 증기에 노출될 때, 응축에 의해 일차측 열이 이차측에 전달되는 현상이다. 이 때 증기는 U-튜브로 이동하는 반면, 응축된 액체는 하부로 내려와 결국 노심으로 되돌아 가게된다. 이차측은 이러한 열전달이 이루어지도록 이차측 수위가 충분히 높게 유지되어야 하며, 온도가 일차측보다 낮아야 한다. 반면 계통내 방출유로를 통한 냉각재 방출에 의한 열제거는 노심노출을 가속시키며 이러한 경우 중력주입이나 강제주입을 이용한 적절한 계통 Inventory 확보가 필요하다. 잔열제거 기능 상실사고가 발생하게 되면 원자로 냉각재 계통의 압력이 상승하게 되는데, 이러한 계통압력 상승은 설계압력이 낮은 임시 Thimble seal 같은 기기의 건전성에 영향을 줄 수 있으며, 또한 노심비등으로 인한 노심노출은 심각한 노심손상을 발생할 수 있다. 이러한 이유로 Mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고는 원자로 안전성과 관련하여 많은 관심이 집중되고 있다. 특히 실험적으로는 BETHSY나 ROSA-IV와 같은 대형 실험장치가 활용되고 있으며, 해석차원에서는 RELAP5/MOD3나 CATHARE2 코드가 주로 이러한 사고의 물리적 현상 분석에 사용되고 있다[정영종 외, 1996; Hassan et al., 1993; Noel,

1994].

본 보고서에서는 Mid-loop 운전중 RHR 기능 상실사고시 가압기 및 증기발생기 일차측 Manway가 열린 경우를 실험한 불란서 BETHSY 6.9b 실험에 대해 최적 열수력 전산코드인 CATHARE2를 이용하여 모의.계산하였다. 본 연구의 주된 목적은 Mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통현상을 이해하고 이러한 사고시 CATHARE2 코드의 예측능력을 평가함으로써 실제 발전소의 이러한 사고 모의에 적용할 수 있는 타당성을 확보하는데 있다.

2. 부분충수 운전중 사고해석

2.1 부분충수 운전 및 사고 시나리오

2.1.1 부분충수 운전

가압경수로의 비상노심계통의 한 부분으로써 잔열제거계통은 발전소 정지시 남아있는 노심잔열을 제거하는데 사용된다. 발전소 정지는 주로 핵연료 재장전 및 증기발생기 U-튜브나 원자로 냉각재 펌프 Seal 점검 및 보수를 위하여 실시하며, 이 때 발전소 계통상태는 다음과 같다. 발전소는 모드 5(저온정지)나 모드 6(재장전) 상태를 유지하며, 이 때의 노심잔열은 전출력시에 비해 상당히 낮다. 잔열제거계통을 이용한 부분충수 운전은 발전소 정지후 최소 2일후 부터 시작하며 이 때의 노심잔열은 전출력시의 약 0.5%이다. 부분충수 운전은 노심수위를 고온관 중간까지 낮추게 되며, 나머지 고온관 상부는 비응축성가스와 증기의 혼합물이 존재하게 된다. 이 때 잔열제거계통을 이용한 노심잔열 제거는 고온관에서 고온의 냉각수를 RHR 계통으로 유입시킨 후 열교환기를 거쳐 냉각된 저온의 냉각수를 저온관으로 주입시키므로써 노심잔열을 제거한다. 발전소 보수나 재장전 기간중 증기발생기 이차측은 주로 물로 가득차 있는 'Wet lay-up' 상태이나 증기발생기 이차측 보수를 위해서는 이차측의 물을 모두 배수시키는 경우도 있다.

재장전 기간중 부분충수 상태를 이루기 위해 물을 배출하는 통로외에 또 다른 Vent가 존재할 수 있는데 이는 다음과 같다. 가압기의 Relief 밸브나 Manway, 증기발생기 Manway, Main coolant pump shaft seal, 저온관 밸브, 원자로 Upper head vent가 존재할 수 있다. 보통은 부분충수 운전시 하나나 그 이상의 Vent가 존재하게 되나, 전혀 Vent가 없는 경우도 가능하다. 또한 부분충수 운전중 증기발생기 이차측 보수를 위하여 노즐댐을 설치하는 경우가 있는데 이 경우 노즐댐으로 막힌 증기발생기의 이차측은 보통 보수를 위하여 열려있게 되며, 이 때 노즐댐의 갑작스런 손상은 계통의 냉각수가 격납용기로 빠져나갈 수 있는 가능성을 제공할 수 있다.

2.1.2 잔열제거계통 상실

Midloop 운전중 잔열제거 기능 상실사고는 국내를 포함하여 지금까지 세계적으로 여러번 일어났으며, 이러한 사고의 주된 원인은 크게 다음 5가지 형태로 구분할 수 있다.

(1) RHR 계통내 공기유입으로 인한 잔열제거펌프 정지사고로 이는 수위측정 설비의 신뢰성 결여 또는 운전원의 계통파악 미흡등으로 인해 냉각재 수위가 내려가 공기가 잔열제거계통으로

유입됨으로써 잔열제거펌프의 정지를 유발하는 사고이다. '87년에 발생한 미국의 Diablo Canyon 2 발전소가 이 사고의 가장 대표적인 사례라 할 수 있다[Crews, 1987]. 이 발전소는 Westinghouse type으로 사고전 발전소는 정지후 7일이 경과된 후 잔열제거계통을 이용하여 노심에서 나오는 잔열을 제거하는 중이었으며, RCS 수위는 노즐댐을 설치하기 위해 증기발생기 1차측 Manway를 개방할 수 있도록 고온관 중간까지 배수되어 있었다. 이 때 냉각재 수위의 하락으로 잔열제거계통으로의 공기유입에 의해 RHR 기능이 상실되는 사고가 발생하였다. 이로 인하여 RHR 기능이 복구되기 전에 노심 비등이 일어나기 시작하였으며, 계통 또한 가압되어 압력이 상승되었다. 비록 이 사고가 심각한 노심 손상을 초래하는 단계까지 전개되지는 않았지만, 그 가능성을 충분히 내포하고 있음을 보여 주었다.

(2) 잔열제거계통내 밸브가 열림으로써 냉각재가 상실되어 RHR 기능이 상실되는 사고로 잔열제거계통은 보통 원자로 냉각재보다 아래에 위치하고 있으며 RHR 계통내에 있는 밸브들이 거짓신호 혹은 오동작으로 열리게 되면, 원자로 냉각재는 이들 밸브를 통해 배수되고, 잔열제거펌프의 흡입수 상실로 인한 잔열제거 기능상실이 발생되는 사고이다.

(3) 필수 교류전원 상실사고로 이는 잔열제거펌프에 전원을 공급하는 소외전원 및 비상디젤이 제 기능을 수행하지 못하여 잔열제거펌프는 구동력을 상실하고 잔열제거 기능이 수행되지 못하게 된다. 이 사고의 대표적인 예는 Westinghouse 4-loop type의 Vogtle 1 발전소가 있다[Chaffee, 1990]. '90년 3월 핵연료 재장전중 전원이 상실되면서 RHR 펌프에 전원공급이 중단되었다. 이 때 RCS는 Midloop 상태를 유지하고 있었으며 비상디젤이 전원을 공급하기 시작한 것은 사고후 36분이 지난 후였다. 여기서도 노심의 온도는 상당히 상승하여 노심손상을 초래할 위험을 가지고 있었음을 확인할 수 있었다.

(4) 잔열제거펌프의 자체 고장인 사고로 잔열제거펌프의 기계적 손상으로 펌프가 정지되는 사고를 말한다. 이 때에도 다른 Train의 펌프가 적절히 기동되지 않으면 잔열제거 기능이 상실되는 사고를 유발할 수 있다.

(5) RCS에서 RHR 계통으로 향한 격리밸브 담김 사고로 잔열제거계통이 운전될 때에는 항시 이 밸브가 열려 있으나, 운전원 오동작 또는 거짓신호에 의해 이 밸브가 닫기면 잔열제거 기능이 상실될 수 있다.

잔열제거 기능 상실에 따른 계통 현상은 원자로의 형태나 정지후 사고 발생 기간 등 여러가지 요소에 의해서 결정되어진다. 특히 잔열제거 기능 상실사고는 RCS가 냉각재로 충만될 때 보다는 Midloop 상태에서가 더 심각한 것으로 나타났다. 왜냐하면 노심비등 및 노심노출 시점이 Midloop 운전일 때가 냉각재량이 적어 더 빨리 오기 때문이다. 또한 사고발생이 정지후 짧은 시

간에 일어날수록 노심출력이 커서 심각한 사고를 유발할 수 있는 가능성을 갖고 있다.

2.1.3 잔열제거계통 상실에 따른 사고 시나리오

그림 1은 잔열제거계통이 상실된 경우에 발생할 수 있는 계통상태를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 크게 두가지 경우로 볼 수 있다. 하나는 계통내 Vent가 존재하는 경우이고, 다른 하나는 전혀 없는 경우이다.

(1) 계통내 Vent가 있는 경우, 즉 가압기 Manway나 증기발생기 Manway와 같은 큰 크기의 Vent가 열려있는 경우를 의미한다. 이 때 계통내 증기나 냉각수는 Vent를 통하여 빠져나가게 되고, 이로 인해 계통내 Inventory는 적어지면서 노심노출에 의한 노심손상을 유발할 수 있다. 이 때 주된 냉각수 공급원은 재장전 냉각수 저장탱크(RWST : Refueling Water Storage Tank)로부터 중력주입에 의해 Vent로 빠져나간 량을 보충하게 된다. 이 경우 RWST 중력주입은 RCS 압력의 함수이다. 만약 계통이 가압되어 RWST 수두에 의한 압력차 이상으로 압력이 상승하면 중력주입에 의한 계통내 냉각수 공급은 불가능할 것이다. 이러한 경우 즉, 중력주입에 의한 냉각수 공급이 불가능한 경우에는 강제주입에 의한 냉각수 공급이 이루어져야 Vent에 의한 계통 Inventory 감소에 따른 노심노출 및 노심손상이 일어나지 않을 것이다.

(2) 계통내 Vent가 없는 경우나 Vent가 아주 작은 경우에도 사고후 노심에서 비등이 발생하므로 RWST로 부터 중력주입에 의한 냉각수를 공급받게 된다. 하지만 계통내 Vent가 없으므로 계통압력은 급속히 상승하게되어 (1)번의 경우와 같이 중력주입에 의한 냉각수 공급은 불가능하다. 이 때에는 계통압력 감소에는 영향을 주지 않으면서도 계통내 Inventory 감소에는 큰 영향을 미치는 Sight level indicator 같은 고온관내 연결된 모든 Vent를 막고, 증기발생기 U-튜브를 이용하여 Reflux 응축 모드에 의한 노심 열제거를 수행하게 된다. 특히 이 경우 Reflux 응축은 다음과 같은 조건하에서만 가능하다. 1대 이상의 증기발생기가 운전가능한 상태 즉, 증기발생기 이차측이 찬물에 의해 수위를 유지하고 있어야 하며, 노즐댐과 같은 것이 증기발생기의 고온관측이나 저온관측에 설치되어있지 않아야 한다. 이와 같은 상태에서 잔열제거 기능이 상실되었다면 노심잔열은 원자로 냉각재 온도를 상승시키게 될 것이고, 노심에서 증기가 발생하기 시작하면서 계통내로 팽창하기 시작한 증기는 고온관을 거쳐 증기발생기에 이르게 된다. 이어서 증기발생기 U-튜브에서 응축된 증기는 다시 고온관으로 떨어져 노심으로 되돌아 가는 Reflux 응축 모드상태에 이른다. 여기서 증기발생기 U-튜브를 통한 이차측으로의 열전달은 이차측 온도를 상승시키며 이는 곧 일차측 계통온도 및 압력을 증가시키는 원인이 된다. 마지막 단계로 일차측으로 부터의 열전달 결과로 이차측 온도가 올라가면서 이차측이 비등하기 시작한다. 여기서 생긴 증기를 이차측 압력상승 없이 충분히 배출할 수 있도록 이차측에 충분한 크기의 Vent가 존재한다면, 일차측 압력은 더 이상 상승하지 않고 최대압력을 이루면서 안정될 수 있을 것이다. 이 때 이차측에

서는 Vent로 냉각재가 빠져나가므로 이차측 수위가 낮아지면서 증기발생기의 Reflux cooling에 의한 열전달 능력을 위협하게 된다. 계속적인 증기발생기의 열제거 기능을 유지하기 위해서는 U-튜브내 응축이 일어나는 Active 영역이 항상 열전달이 가능할 수 있도록 이차측 수위를 충분히 유지하는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 Reflux 응축에 의한 노심 열제거는 최소한 1대 이상의 증기발생기를 이용할 수 있는 경우에 가능하면, 전혀 이용 가능한 증기발생기가 없는 경우는 노심내 비등에 의한 노심손상이 우려된다.

2.2 사고시 열수력 현상

Mid-loop 운전중 RHR 상실사고시 발전소의 운전 상태에 따라 약간씩 차이가 있겠지만 계통 냉각 수단으로써 사용되는 열수력 현상은 크게 다음 세가지로 나눌 수 있다. 첫째는 중력주입에 의한 냉각, 둘째 노심비등(Core boil-off), 마지막으로 Reflux 응축에 의한 냉각이다.

2.2.1 중력주입에 의한 냉각

RHR 상실사고시 RWST로부터의 중력에 의한 냉각수 주입은 노심노출 및 손상을 줄일 수 있는 중요한 수단이 된다. RCS내 방출유로가 있는 경우(가압기나 증기발생기 Manway 그리고 Upper head 열림등)나 방출유로가 없는 경우 모두 RWST의 수두차에 의한 중력주입이 저온관을 통하여 이루어진다. 중력주입에 의해 저온관으로 유입된 냉각수는 Downcomer를 거쳐 노심으로 유입되어 노심을 냉각하게 되고 이 때 발생된 증기는 계통내 방출유로가 있는 경우 그곳을 통하여 빠져나감으로써 계통압력의 급격한 증가를 늦추는 요인이 된다. 사고시 노심을 냉각시킬 수 있는 충분한 중력주입량은 발전소 상태 및 노심잔열 수준에 따라 결정될 수 있다. 또한 중력에 의한 주입은 RWST 수위와 저온관 사이의 수두차 및 유량이 흐르는 곳의 형태손실(Form loss) 및 마찰에 의한 저항에 의해서도 제한받게 된다.

2.2.2 노심비등 현상

노심이 비등됨으로써 발생되는 현상으로서 첫번째로는 계통압력이 상승하면서 2.2.1 에서도 언급한 바와 같이 계통에 냉각수 주입량이 줄어들거나 제한되는 경우가 발생할 수 있으며, 다음으로는 증기발생기 Reflux 냉각에 의한 노심 잔열 제거를 들 수 있다. RHR 상실사고 직후에는 아직도 계통은 아냉 상태로 있으며, 비등이 발생하기 전에 냉각수는 포화온도까지 상승하기 위해 약간의 시간이 필요하다. 영광 3/4호기인 경우 발전소 정지후 2일후 RCS 온도가 60℃이고, Midloop 운전중 RHR 상실사고가 발생하였다고 가정했을 때 최소 노심 비등 시간은 사고후 약 300초로 짧은 시간안에 노심 비등이 발생하는 것을 볼 수있다[Jeong et al., 1996]. 노심비등이 진행되는 동안 노심에서 발생된 증기는 RCS를 가압하면서 한편으로는 열려진 유로를 통해 빠져나

가게 된다. 또한 Vent를 통한 방출은 노심내 혼합수위를 낮추게 될 것이다. 이와같이 노심 비등에 따른 계통내 열수력 현상은 초기 계통 Inventory, 계통압력, 노심잔열, 노심축방향 출력분포 그리고 계통내 Vent 유무에 의해 결정되어진다.

2.2.3. Reflux Cooling

증기발생기 U-튜브를 통한 Reflux 응축은 Midloop 운전중 RHR 상실사고시 노심잔열을 제거하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 영광 3/4호기인 경우 계통내 작은 방출유로가 가압기와 Upper head에 열려 있을시 증기발생기 U-튜브를 이용한 Reflux cooling에 의한 노심 잔열 제거량은 전체노심 잔열량의 약 94%로 상당히 많은 량의 잔열이 증기발생기의 Reflux cooling에 의해서 제거됨을 알 수 있다[김원석, 1995]. 이와 같은 Reflux cooling은 Midloop 운전과 같이 고온관에 물이 나 차지 않은 상태에서 가능한 현상으로 노심에서 발생된 증기가 고온관을 거쳐 증기발생기 U-튜브에 유입됨으로써 발생할 수 있다. 증기발생기 U-튜브내 비응축성 기스의 존재는 U-튜브를 응축이 일어나는 Active 영역과 응축이 발생하지 않는 Passive 영역으로 나누어 그 결과 대부분의 응축이 U-튜브의 입구쪽 상승 부분에서 발생하게 된다[김원석, 1997]. 결과적으로 비응축성 가스가 증기발생기 U-튜브에 차 있는 경우 노심에서 발생된 증기가 U-튜브에 도달하여 일정한 계통압력에 이르면 비응축성 가스를 U-튜브 상부로 밀어올려 U-튜브에 응축이 가능한 유효열전달 면적을 만들어 냄으로써 일차측에서 이차측으로의 열전달이 가능해 진다[Naff et al., 1992; Ward et al., 1992].

3. BETHSY 6.9b 계산

3.1 BETHSY 실험 소개

BETHSY 실험장치는 CEA, EDF 및 Framatome사의 공동지원으로 3-Loop 가압경수로형 원자로의 과도현상을 연구하기 위한 종합 실험장치이다. 표 1은 이와 같은 종합 대형 실험 장치에 대한 개요를 수록한 것이다. 또한 표 2에서는 BETHSY 실험장치에서 수행된 실험에 대한 목록 및 성격을 정리하였다. BETHSY 실험장치 및 실험결과는 개발하는 전산코드의 검증뿐 아니라 사고시에 발생할 수 있는 계통의 거동에 대한 물리적 현상을 이해하는데 도움이 된다. 또한 기존의 전산코드로 모의 계산한 결과를 분석함으로써 전산코드의 물리적 모델링에 대한 타당성을 검토할 수도 있으며 실험장치 및 그 운용방법을 습득함으로써 장래의 자체실험 설계 및 수행에 대비한 개념 착상의 참고로 사용할 수 있다. 이 실험장치의 주 목적은 CATHARE 전산코드의 평가 및 3-loop PWR 비상운전 절차서(EOP)의 타당성을 검토하는데 있다(Bazin, 1988).

BETHSY 실험장치는 원자로 냉각재 계통(RCS)의 비대칭적인 냉각을 고려하기 위하여 실제 원전의 Loop과 같은 3-loop을 모의 실험할 수 있는데, BETHSY 실험장치의 개략적인 일차계통 회로는 그림 2에 나타나 있다. BETHSY는 원전의 실제압력을 모의할 수 있는 실험장치로 일차계통의 최고 설계압력은 17.2MPa이고, 이차측은 8MPa까지 유지할 수 있으며, 노심출력은 잔열수준(Decay Heat Level)으로 제한되어 운전된다. 보편적으로 사고모의에서는 과도기 초기에 원자로 정지가 일어나므로 정격출력에 관련된 모의는 요구되지 않지만 ATWS(Anticipated Transient Without Scram) 같은 정격출력하에서의 모의에는 적절치 못하다. BETHSY의 냉각재 펌프는 실제 원전의 냉각재 펌프를 축소하여 정격유량을 공급할 수 있도록 설계되었다. 이것은 운전자가 RCP의 정지를 필요로 하지 않거나, 사고 진행 동안 3개의 RCP가 완전히 정지하지 않는 과도기에 대한 계통분석, 또는 RCP를 수정하여 사용할 경우 나타나는 잇점 등을 연구할 때 유용하다. 높이를 축척하지 않고 실제값을 유지하는 이유는 많은 사고들이 사고 초기에 RCP가 정지되어 높이와 관련하여 중력이 일차계통의 거동에 중요한 역할을 하기 때문이다. 그림 3은 일차계통의 개략적인 위치를 나타낸 것이며, 그림 4는 이 실험장치의 증기발생기를 개략적으로 보여주고 있다.

3.2 BETHSY 6.9b 실험 개요

BETHSY 6.9b 실험은 계통내 두 Vent 즉, 가압기 Manway와 증기발생기 입구공동 Manway가 열려 있는 상황하에서 Midloop 운전중 잔열제거 기능이 상실되는 사고를 모의한 것이다. 이

실험의 조건으로 노심출력을 정격출력의 1.3%인 370kW이며, 계통내 Vent는 Loop에 연결된 가압기 Manway와 증기발생기 입구공동 Manway가 열려 있는 것으로 가정하였으며 노심압력 증가에 따라 안전주입 즉, 중력주입 및 강제주입이 Loop 3 저온관에 연결된 안전주입 노즐을 통해 주입되도록 모의하였다. 증기발생기 이차측은 공기로 가득차 있으며 각각 격리되어 사용되지 않은 것으로 가정하였다.

이러한 실험조건 하에서 과도기 계산을 위한 초기조건으로 계통압력은 1.12bar, 고온관 및 저온관 온도는 계통 포화온도인 103℃와 102℃로써 이에 대해 표 3에서 실험값과 계산값을 비교 정리해 놓았다. 또한 실험의 경계조건으로 원자로 냉각재 펌프는 정지된 상태이며 계통수위는 Midloop 상태로서 고온관 중간까지 낮아져 있고 안전주입은 중력주입과 강제주입이 다음과 같은 조건에 따라 37℃의 냉각수를 Loop 3의 저온관으로 주입되도록 하였다[Dumont, 1992].

- 중력주입 -

중력주입은 노심내 Rod의 온도가 250℃를 넘어서면 주입을 시작하는 것으로 모의하였으며 그 양은 다음과 같은 비율에 따라 주입되도록 하였다.

QAG = 0.654 * (1.5 - PBF3B)

여기서 QAG = 안전주입량(m^3/h)

PBF3B = 저온관 3에서의 압력 (bar)

- 강제주입 -

중력주입만으로는 계속되는 노심온도 상승을 막을 수 없어 노심 Rod 온도가 350℃ 이상이면 강제주입이 시작되며 그 양은 0.25 kg/s 이다. 이 때 사용된 강제주입은 실험진행에 따라 그 양이 달리 사용되고 있다.

- o 노심 Rod 온도 > 350℃ -> 0.25 kg/s
- o 3000 ~ 3600 초 -> 0.30 kg/s
- o 3600 ~ 4450 초 -> 0.35 kg/s

3.3 CATHARE2 입력모델 및 계산

CATHARE2 코드는 불란서 CEA , EDF 그리고 Framatome이 공동으로 개발한 원전의 최적계산용 열수력 코드로 이상유동을 모의하기 위해 2-fluid, 6-equation 모델을 사용하고, 이 코드의

검증을 위하여 15개의 기초실험과 BETHSY 대형 실험을 수행하였다. 코드는 1979년에 개발을 시작하여 1982년에 최초의 CATHARE1 Version 개발완료를 시작으로, 소형 및 대형 냉각재 상실사고 실험에 대한 검증을 마친후 계속 보완작업 및 수정을 하여 현재는 CATHARE2 V1.3을 공개하였다. 여기서는 특히 대형 냉각재 상실사고시 예상되는 다차원 효과를 고려하기 위해 2차원 Downcomer 모델이 추가되었다. 그리고 이상유동에서의 원자로 냉각재 특성을 현실적으로 기술하기 위해 1-D Pump Model을 완성했으며, 2가지 종류의 비응축성 가스(N_2, H_2)가 계통내 존재할 경우 계산 수행을 할 수 있도록 모델을 추가하였다[Farvacque, 1991; Barre, 1990].

BETHSY 6.9b 모의를 위하여 CATHARE2 입력은 총 420개의 node 를 사용하였다(그림 5). 가압기는 3개의 Volume으로 나누어 Loop 1에 연결하였으며, 가압기 상부에 Pipe를 모델하여 가압기 Manway Vent를 연결시켰다. 그림 6과 7은 실험에서의 가압기 및 증기발생기 Manway 구조를 나타내었다. 실험 도중 주입되는 안전주입을 Loop 3 저온관에 Source 모듈을 이용하여 주입되도록 하였다. 또한 증기발생기 이차측은 실험조건에 따라 모델링하지 않았다. 또한 원자로 냉각재 펌프는 작동되지 않는 것으로 가정하였으며, Midloop 상태를 얻기위해 하부공동(Lower plenum)에서 냉각재로 배출하도록 하였다. 노심출력은 정격출력의 1.3%인 370kW로써 실험 종료시까지 유지되는 것으로 가정하였다(그림 8).

3.4 계산 결과

그림 9는 Upper plenum에서의 압력을 나타낸 것이다. 과도기가 시작되면서 노심출력은 처음 초기상태인 0kW에서 370kW까지 38초만에 급상승하게되고 이와 동시에 가압기와 증기발생기 입구공동에 있는 Manway가 열리게 된다. 이와같이 노심출력이 급상승하면서 노심에서의 급격한 증기발생으로 인한 계통압력 상승이 발생한다. 이 실험에서는 이미 포화온도의 초기조건에서 시작하므로 노심 냉각재가 포화온도에 도달하여 최초 기포가 발생하는데 걸리는 시간은 거의 필요치 않는다. 그림에서도 과도기 시작과 동시에 계통압력이 급속히 상승하고 있음을 알 수 있다. 과도기 시작후 약 100초에서 초기 압력 Peak를 이루는데 실험은 처음 1.12bar에서 1.3bar까지 상승하였으며, 계산은 1.24bar까지 상승하였다. 그러나 곧 과도기 시작과 동시에 열려있는 가압기와 증기발생기 1 입구공동 Manway를 통해 냉각재가 빠져나감으로써 계통압력은 서서히 낮아진다. 과도기 시작후 약 100초부터 점차 떨어지기 시작한 계통압력은 약 450초 부터는 노심내 증기생성율과 계통에서 빠져나간 량과의 균형에 의해 일시적으로 안정된 상태를 유지한다. 그러나 850초 이후부터 시작한 노심노출로 노심내 증기발생율은 떨어지고 이로인해 계통압력도 서서히 떨어진다. 그러나 곧 주입되는 중력주입과 이어서 계속적으로 주입되는 강제주입에 의해 노심은 다시 점차 채워지면서 노심내 증기발생량이 많아지고 이로인해 계통압력은 다시 상승하기 시작한다. 계속적으로 상승되는 계통압력은 1600초에 이르러 Crossover leg의 수두를 밀어내고 Loop seal clearing를 발생시킨다. 이때 Crossover leg에 있던 물이 저온관 및 Downcomer를 거쳐 노

심으로 유입된다. 이때까지도 노심상부는 냉각재가 일부 비어있는 노심노출 상태에서 물이 노심 아래에서 갑작스럽게 밀려올라와 노심상부를 채우면서 노심노출로 상당히 고온을 유지하던 Rod 와의 열전달로 노심내 증기발생율이 급작스럽게 많아지면서 압력은 급상승하게 된다. 이로인해 고온관 쪽으로 증기속도가 빨라져 가압기 및 증기발생기 Manway를 통해서 많은 량의 증기가 빠져나가게 되고, 특히 고온관 1에 연결된 Surge line으로 유입되는 증기속도 증가에 의한 압력차 (DP) 증가가 발생하게 된다. 그러나 곧 노심노출이 사라지고 Rod 온도가 떨어지면서 노심내 증기발생율도 떨어져 계통압력은 다시 떨어지는 현상을 보이고 있다. 이 때 과도기 최대압력이 형성되는데 약 1000초에 실험은 1.45bar 그리고 계산은 이 보다 조금 더 높은 1.70bar까지 상승하였다

그림 10은 중력주입 및 강제주입시 사용되는 냉각수의 온도를 나타낸 것으로 약 37℃의 물이 저온관 3에 설치된 안전주입 노즐을 통해 주입됨을 알 수 있다. 그림 11은 이때 주입되는 주입량을 나타낸 것이다. 실험에서와 같이 중력주입은 노심 Rod온도가 250℃를 넘어서면 저온관 3에서의 계통압력과 RWST 수위로 인한 수두차에 따라 다음과 같은 비율로 계통에 주입된다.

$$Q_{gravity} = 0.654 * (1.5 - P_{cold3})$$

여기서 $Q_{gravity}$ = 중력주입량(m^3/n)

P_{cold3} = 저온관 3에서의 계통압력 (bar)

그림에서 보듯이 계산이 실험보다 노심 Rod 온도가 약간 빨리 상승하여 1120에 이미 250℃에 도달하여 중력주입이 시작하였으며 실험은 이보다 13초 늦은 1133초에 도달하여 중력주입이 이루어졌다. 그러나 중력주입만으로는 노심노출을 막을 수 없어 Rod 온도는 계속 상승하여 강제주입이 시작되는 350℃에까지 도달하게 된다. 계산은 중력주입후 100초 후인 1220초에, 실험은 약 200초 후인 1318초에 강제주입이 공급되며 이 때의 주입량은 0.25kg/s로 일정한 량이 저온관을 통해 주입된다. 이렇듯이 노심 Rod 온도 상승에서 계산이 실험보다 약간씩 빠른 이유는 초기에 노심의 많은 물이 고온관으로 유입되어 증기발생기 Manway을 통해 빠져나감으로써 노심 Inventory 측면에서 계산이 실험보다 적고 노심노출 발생시점도 계산이 빨라 이와같이 Rod 온도가 빨리 상승하게 된 것으로 판단된다. 그림에서 알 수 있듯이 강제주입은 중력주입과는 달리 일정한 양이 일방적으로 주입되는 것으로 실험에서는 3 단계로 강제주입량을 공급하였다. 처음에는 Rod 온도가 350℃를 넘어서면 0.25kg/s의 량이 주입되고 다음에는 실험 진행시간에 따라 3000초에 도달하면 주입량을 0.25kg/s에서 0.30kg/s로 증가시켰으며 마지막으로 3600초 부터는 또 다시 주입량을 늘려 0.35kg/s가 주입되는 것으로 가정하였다.

그림 12는 노심 압력차(DP)를 나타낸 것이다. 그림에서 나타났듯이 계산결과가 실험보다 노심

DP를 낮게 예측하고 있다. 이는 과도기 초기에 실험보다 많은 량의 냉각재가 고온관으로 밀려 올라가 증기발생기 Manway를 통해 빠져나갔기 때문이다. 즉, CATHARE2 코드가 노심 Interfacial drag force를 실험보다 과대 예측하여 많은 물이 고온관으로 밀려 올라가는 것으로 판단된다. 이와같이 CATHARE2 코드의 노심 DP에 대한 과소 예측은 다른 실험에 대한 CATHARE2 코드의 계산결과에서도 똑같이 발생되고 있음을 알 수 있다[정영종, 1996]. 그림에서 Loop seal clearing이 일어나는 1600초에 급작스런 노심 DP 증가가 일어나고 있다. 이는 계통압력 그림에서도 언급하였듯이 Crossover leg에 있던 물이 저온관 및 Downcomer를 거쳐 노심으로 유입되면서 수위가 높아져 발생한 현상이다. 이 후 계속되는 강제주입에 의해 노심은 다시 채워져 노심노출 현상은 사라지고 노심 DP는 일정한 값을 유지하게 된다. 그림 13은 상부공동 DP를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 약 850초에 계산이나 실험 모두 상부공동의 DP가 거의 0에 도달한다. 이는 곧 이 때부터 노심노출이 발생하게 됨을 의미하며 1600초 이후 노심에 물이 차오르면서 노심노출은 끝이 나고 상부공동에도 물이 밀려 올라와 DP값은 다시 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그림 14는 Downcomer DP를 나타낸 것이다. 과도기 시작후 약 200초 까지는 DP가 일정한데 이는 Downcomer 위 저온관 및 입구 노즐 부근의 물이 노심으로 유입되는 시점으로 Downcomer DP에는 변동이 없다. 200초 이후 저온관 및 Downcomer 위에 존재하는 물이 다 빠져나가고 이제는 Downcomer 물이 노심을 거쳐 빠져나가면서 DP는 줄어들기 시작한다. 약 1120초 이후부터는 중력주입 및 강제주입이 공급되면서 다시 DP는 상승하게 된다. 1600초에서의 급작스런 DP하락은 Loop seal clearing에 의한 현상으로 Downcomer의 물이 노심으로 유입됨으로써 발생된 것이다. 그러나 이후 계속되는 강제주입에 의해 노심은 다시 차고 Downcomer도 일정한 DP를 이루면서 안정화 된다.

그림 15는 가압기 내에서의 DP를 나타낸 것이다. 과도기 전기간동안 물이 가압기 내로 유입되지도 않았으며 증기속도에 의한 DP 형성도 Surge line에 비해 상당히 큰 가압기의 유로면적으로 가압기내 DP형성에 별 영향을 주지 못하고 있다. 계산결과에서 보면 1600초에 DP가 약간 상승하나 이는 이때 증기속도가 증가한 결과로 나타난 현상이며 전체적으로 볼 때 그 량은 상당히 작아 실험과 큰 차이를 보이지 않는다. 그림 16은 Surge line DP를 나타낸 것이다. Surge line은 실험기간 내내 거의 증기로 가득차 있어 이와 같은 DP형성은 주로 증기속도에 의한 마찰력에 의해 발생되어지는 것으로 보통 이러한 상황시 고온관 물이 Surge line에 유입되어 발생되는 Liquid hold-up 현상에 의한 DP형성은 아니다.

다음 그림 17에서 19까지는 증기발생기 입구공동에서의 DP를 각 Loop별로 나타낸 것이다. Loop 1에 대한 그림 17을 보면 초기 과도기가 시작하자마자 계산은 노심에서 많은 물이 고온관을 거쳐 증기발생기 Manway을 통해 빠져나가기 위해 상당히 높은 DP를 입구공동에 형성하고 있으나 실험은 그것의 1/3 가량의 DP만을 형성하고 있어 계산보다는 다소 적은 량의 냉각수가 Manway를 통해 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. 그 이후에도 실험은 거의 DP를 형성하지 않

고 있으나 계산에서는 노심노출 시점인 850초에서 1600초 사이를 제외하고는 적지만 조금씩의 DP를 꾸준히 형성하고 있음을 알 수 있다. Loop 2와 3에 대한 그림 18과 19에서 보듯이 가압기 및 증기발생기 Manway Vents가 열려있는 Loop 1을 제외하고는 다른 Loop에서는 거의 어떠한 DP도 형성되어 있지않아 이쪽으로의 유량의 호름이 매우 적은 것을 알 수 있다.

그림 20에서 25까지는 Crossover leg에서의 DP를 나타낸 것이다. 그림 20과 21은 Loop 1에서의 증기발생기 및 Pump 쪽 DP를 나타낸 것으로 완전한 Loop seal clearing은 발생하지 않았으며 그림 20의 증기발생기 쪽 DP에서 보듯이 일정한 량의 물이 계속 존재하고 있음을 알 수 있다. 그림 22와 23은 Loop 2에서의 DP를 나타낸 것으로 실험이나 계산 모두 1600초에 Loop seal clearing이 발생한 것을 볼 수 있다. 그림23 Pump 쪽 DP에서 계산은 완전히 DP가 0가 되지 못하고 약간의 물이 존재하나 그 양이 작고 또한 증기속도가 빨라 Loop seal clearing에 의한 효과를 충분히 나타내었다. 다만 실험에서는 그림 24와 25에서 보듯이 Loop 3에서는 Loop seal clearing이 일어나지 않는데 반해 계산결과에서는 Loop 2와 똑같이 Loop seal clearing이 일어나고 있다. 그러나 Loop 3의 이러한 경향이 전체적인 결과에는 큰 차이를 내지 않고 있어 전체적으로 실험과 비슷한 경향을 보이고 있다.

그림 26에서 28까지는 각 Loop에서의 고온관 온도를 나타낸 것이다. 계산은 물과 증기의 온도를 따로 그려 놓았다. 그림에서 보드시 노심노출이 발생하는 850초에서 1600초 사이에 온도가 급상승하는 것을 볼 수있다. 그림 29에서 31까지는 저온관 온도를 나타낸 것이다. 여기서도 노심노출이 발생하는 시기에 온도가 상승하고 있음을 알 수 있다. 다만 그림 31의 Loop 3의 저온관 물의 온도가 1200초 이후 약간 낮아진 이유는 Loop 3의 저온관을 통하여 중력주입 및 강제주입이 이루어졌기 때문이다. 그림 32는 Downcomer에서의 온도를 나타낸 것이다. 큰 차이없이 실험결과와 잘 일치하고 있다. 그림 33은 노심 상부에서의 온도를 나타낸 것이다. 계산이 실험보다 약 70℃ 높게 예측하고 있으며 온도 증가 시점도 200초 정도 빨리 나타났다. 또한 그림 34에서는 노심 Rod 최대 온도가 계산이 약 70℃ 높게 나타났으나 온도 증가시점은 약 850초로 실험과 거의 일치하고 있다. 아와같이 CATHARE2 코드가 노심상부의 국부적 온도상승을 실험값에 비해 높게 예측하고 있다. Rod 온도에 따라서 중력주입 및 강제주입이 공급되므로 전체적인 사건 순서 및 현상에는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 약 1600초에서 Loop seal clearing에 의해 노심이 다시 채워지면서 온도는 다시 정상적인 값으로 떨어졌다.

그림 35에서 37까지는 고온관에서의 기포율을 나타낸 것이다. 고온관은 과도기 시작전 Midloop 상태로 고온관 중간까지 물이 차 있는 상태에서 실험이 시작되었다. 과도기 시작후 약 500초 안에 실험 및 계산 모두 가압기와 증기발생기 Manway를 통해 유량이 빠져나가 거의 비어있는 즉, 기포율이 1에 가까운 현상을 보이고 있다. 1600초 이후 노심이 다시 중력주입 및 강제주입에 의해 채워지면서 약간씩 고온관 기포율에 흔들림이 발생하고 있으나 아주 적은 량이다.

다시 말해서 과도기 시작후 500초 내에 고온관의 물이 빠져나간후 실험 종료시까지 고온관은 거의 비어있는 상태에서 사고가 진행되고 있다. 그림 38에서 40까지는 저온관에서의 기포율을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 BETHSY 실험장치에서 저온관은 고온관보다 약간 낮은 위치에 놓여 있어 실제 고온관이 Midlooop 상태에 있더라도 저온관은 물로 가득차 있는 상태에 있게된다. 이 실험에서도 과도기 시작전 저온관의 기포율은 0에서 시작하게 되며 초기 300초 내에 대부분의 저온관 물이 노심을 거쳐 Vent로 빠져 나가게 된다. 그러나 계산에서는 앞에서도 언급하였듯이 증기발생기 Manway를 통해 실험보다 많은 량이 빠져나감으로써 저온관의 기포율 비교에서도 계산이 실험보다 높다. 즉 계산결과 실험보다 많은 양의 저온관 물이 노심을 거쳐 빠져나갔음을 알 수 있다. 계산에서나 실험 모두 1500초 부근에서 기포율의 흔들림이 발생하는데 이는 이 시기에 강제주입에 의해 노심의 기포 발생율이 많아지고 이로 인해 계통압력 증가와 함께 증기속도가 빨라져 Surge line의 DP를 증가시키면서 Crossover leg의 유량에 변화를 가져와 Crossover leg의 유량이 흔들리면서 저온관 기포율에 변화를 가져온 것이다. 다음 그림은(그림 41) Surge line에서의 기포율을 나타낸 것이다. 여기에서 보듯이 Surge line에는 실험 전기간을 통해서 거의 증기만 존재할 뿐 어떠한 물도 고온관에서 Surge line쪽으로 유입되지 않았음을 확인할 수 있다. 즉, 과도기 기간중 발생되는 Surge line에서의 DP형성은 증기속도의 증가에 따른 마찰에 의한 DP로 증기 속도가 줄어들면 DP도 작아지는 경향을 보이고 있다.

그림 42는 가압기 Manway를 통해 빠져나가는 유량을 나타낸 것으로 실험이나 계산 모두 증기만이 빠져나가고 있다. 그림 9의 Upper plenum 압력 그림과 비슷한 데 이는 Surge line이나 가압기에 Liquid hold-up 같은 저항이 없어 계통압력이 높으면 많은 량의 증기가 빠져나가고 압력이 줄어들면 Vent 유량도 줄어드는 경향을 보이고 있다. Upper plenum 압력 설명에서 언급한 경향들이 그대로 가압기 Manway 유량에도 적용되고 있어 앞서 설명한 내용을 참조하면 될 것이다. 그림 43은 증기발생기 Manway를 통해 빠져나간 유량을 나타낸 것이다. 실험값은 증기유량만 측정한 값을 보유하고 있어 직접적인 비교를 할 순 없지만 가압기 Manway를 통해 빠져나간 량과 전체 Inventory를 비교했을 때 실제 증기발생기로 빠져나간 량은 계산이 실험에 비해 많이 빠져나간 것으로 나타났다. 여기에 대해서는 뒤에 다시 언급하도록 하겠다. 그림 44는 Downcomer에서의 유량을 나타낸 것이다. Upper plenum 압력변화에 따라 노심으로 유입되는 Downcomer의 유량에 많은 흔들림이 발생하고 있다. 약 1600초에서는 Loop seal clearing 발생으로 일시적으로 많은 량의 물이 노심으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 그림 45는 Upper head bypass 유량을 나타낸 것이다. 과도기 시작후 초기 300초 사이에 실험에 비해 상대적으로 많은 물이 Dome을 거쳐 Downcomer로 빠져 나가고 있다. 그러나 증기유량에 있어서는 실험과 큰 차이를 보이지 않고 있어서 가압기 Manway 유량 및 계통압력 측면에서는 큰 영향을 주지 않아 전체적인 경향에 있어서는 큰 차이를 보이지 않고 있다.

그림 46은 가압기 Manway를 통해 빠져나간 전체 유량을 나타낸 것으로 계산이 실험에 비해

과대 예측하고 있음을 알 수 있다. 다음 그림 47은 전체 계통 Inventory를 나타낸 것으로 과도기 중간에 중력주입 및 강제주입이 주입되며 주입시기도 실험과 약간 차이를 보이고 있어 실험과 계산을 일대일 비교할 순 없지만 그래도 전반적인 경향은 초반에 빠져나간 양의 차이가 실험 끝날 때까지 비슷한 경향으로 유지되고 있음을 보여주고 있다. 실제로 중력주입이 시작되기 전 500초에서의 Inventory를 비교해 볼때 이미 계산과 실험이 100kg 정도 차이를 보이는데 반해 그림 46에서 보았듯이 가압기 Manway 유량은 거의 일치하고 있어 초기에 증기발생기 Manway를 통해 빠져나간 유량의 비교에서 계산이 실험에 비해 상당히 많음을 알 수 있다. 그림 48은 중력주입 및 강제주입으로 공급된 유량을 나타낸 것으로 계산이 실험에 비해 주입시기가 조금 빠를뿐 전체적인 양에 있어서는 거의 일치하고 있다. 전체적으로 주입된 총량을 볼 때 약 900kg 정도가 외부에서 실험기간에 공급되었다. 그림 49은 증기발생기 Manway를 통해 빠져나간 유량을 나타낸 것으로 실험은 측정된 자료가 없어 계산결과만 나타내었다. 과도기 시작후 초기에 대부분 빠져나가는 것은 물이고 약 300초 이후 부터는 증기만 빠지다가 1600초 이후 노심이 다시 차고 Upper plenum에 물이 차오르면서 다시 증기와 물이 동시에 빠져나가기 시작한다.

마지막으로 그림 50은 노심에서의 기포율 분포를 나타낸 것이다. 과도기 시작후 850초 부터 노심노출이 일어나기 시작하고 있으며 1600초에 노심은 다시 채워져 노심노출이 사라지고 있음을 볼 수있다. 그림에서 보듯이 노심노출이 가장 심한 1300초 부근에서는 거의 노심 중간까지 노심노출이 일어나고 있으며 Rod 온도는 노심노출이 사라지기 바로 전인 1600초 이전에 최대치를 기록하고 있다.

4. 결 론

Midloop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통내 가압기 Manway 및 증기발생기 입구공동(Inlet plenum) Manway가 열려있는 경우를 실험한 불란서 대형 실험 BETHSY 6.9b에 대해 최적 열수력 전산코드인 CATHARE2를 사용하여 모의 분석하였다. 실험은 4453초 동안 진행되었으며, 이 기간동안 노심잔열은 정격출력의 1.3%인 370kW를 유지하는 것으로 가정하였다.

계통압력 측면에서 볼 때 초기에 즉, 사고후 300초 까지는 증기발생기 Manway를 통해 증기가 빠져나가는 양을 비교할 때 계산이 실험보다 과다하여 계통압력을 다소 낮게 예측하고 있으나, 실험 전기간 전체적으로는 실험값에 근사한 값을 유지하고 있다. 가압기 및 증기발생기 Manway를 통해 유량이 빠져나감으로써 노심노출이 발생하게 되는데, 실험은 848초, 계산은 830초로 계산이 실험보다 18초 먼저 노심노출이 발생되고 있다. 이는 보다 많은 물이 노심에서 고온관으로 유입됨으로써 노심 Inventory측면에서 계산이 실험에 비해 상대적으로 작기 때문에 발생되었다. 노심 Rod 온도가 250℃를 초과하면 주입되는 중력주입은 계산이 실험보다 13초 빨리 주입되어 1120초에, 그리고 실험은 1133초에 주입되었다. 본 실험에서는 노심노출을 막기 위한 수단으로 중력주입을 시도했으나 중력주입 만으로는 노심 Rod 온도 상승을 막을 수 없어 다시 Rod 온도가 350℃를 초과하게 되면서 이번에는 강제주입에 의한 냉각수가 저온관을 통해 노심에 공급된다. 이러한 강제주입에 의해 노심노출은 계산이나 실험 모두 비슷한 시기인 약 1600초에 Loop seal clearing이 발생하게 되면서 많은 물이 Downcomer와 하부공동를 거쳐 노심에 들어오게 되면서 사라지게 된다. 결론적으로 말하면 계산의 경우 노심에서 고온관으로 초기에 유입되는 냉각수의 량이 실험에 비해 과다하여 모든 진행이 실험에 비해 조금씩 빨라진 것이라 볼 수 있다. 즉 코드에서 계산되는 Interfacial drag force을 실험에 비해 다소 과대 예측하고 있다고 판단된다. 또한 이와같은 사고시 중력주입 만으로는 노심노출을 막을 수 없고 강제주입이 필요함을 확인하였다. 이외에도 국부적으로 실험과 비교했을 때 약간의 차이를 나타내고 있으나, 전반적인 면에서 볼 때 CATHARE2 코드는 실험 값에서 크게 벗어나지 않고 있으며, 실험에서의 물리적 현상들도 코드 계산에서 거의 타당하게 예측하고 있다.

이 실험의 모의 계산은 HP Workstation에서 수행하였으며, 계산시간은 실험시간 4453초을 모의하는데 27700초 소요되어, 실제 실험시간에 비해 약 6.2배 정도의 계산시간이 사용되었다.

5. 참고문헌

김원석 외, "영광 3/4호기 Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고시 CATHARE2 코드를 이용한 열수력 현상 및 증기발생기 열제거 능력 평가", 한국원자력학회, '95 추계학술대회, 1995

김원석 외 "증기발생기 U-튜브내 비응축성 가스 존재시 열전달 현상 해석", KAERI/TR-801/97, 한국원자력연구소, 1997

정영종 외, "가압경수로의 부분충수 운전중 잔열제거계통 기능 상실사고시 가압기와 증기발생기 Manway 유출유로를 이용한 사고완화에 관한 연구", Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 28, No. 2, April 1996

Barre, F. and Bernard, M., "CATHARE Code Strategy and Assessment", Nucl. Eng. Des. 124, pp. 257-284, 1990

Bazin, P., "Bethsy Data Base", SETh/LES/87-38, France, 1988

Chaffee, A., "Loss of Vital AC Power and the Residual System during Mid-loop Operation at Vogtle Unit 1 on March 20, 1990", NUREG-1410, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1990

Crews J.L. et al., "Loss of Residual Heat Removal System Diablo Canon Unit 2, April 10, 1987", NUREG-1269, 1987

Dumont, D., "Loss of Residual Heat Removal System during Mid-loop Operation", STR/LES/92-97, CENG, 1992

Farvacque, "CATHARE User's Manual of CATHARE2 V1.3e", CENG/ STR/LML/EM/91-61, 1991

Hassan, Y.A. and Raja, L.L., "Analysis of Experiments for Steam Generator in the Presence of Noncondensable Gases Using the RELAP5/MOD3 Code", Nucl. Tech. 104, PP. 76-88, 1993

Jeong J.J. and Kim W.S., "Investigation of Steam Generator Cooling Capability under the Loss

of RHR Accident during the Midloop Operation of Yonggwang Nuclear Units 3/4", ICONE-4, U.S.A, 1996

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

Noel, B. and Deruaz, R, "Reflux Condensation with Nitrogen in Steam Generator U-tube : Analysis of Bethsy Test 7.2c Using CATHARE2 code", Proc. Intl. Symp. on Multiphase Flow Heat Transfer, Xi'an, China, 1994

Ward L.W. et al., "Consequences of the Loss of the Residual Heat Removal System in Pressurized Water Reactors", NUREG/CR-5820, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1992

표 1. 종합 실험 장치 개요

	PKL	BETHSY	LOBI	LOFT	LSTF
LOCATION	Erlangen(FRG)	CENG(F)	JRC(I)	INEL(US)	JAERI(J)
NUMBER OF LOOP	1 + 1 + (2)	1 + 1 + 1	1 + (3)	1 + (2)	(2) + (2)
SCALE VOLUME	1 : 134	1 : 100	1 : 712	1 : 60	1 : 48
ELEVATION	1 : 1	1 : 1	1 : 1	1 : 2	1 : 1
POWER (MW)	1.25	3	3.3	50.	10.
RODs	340	428	64	1300(FUEL)	1168
PRESSURE (MPa)	4	17.2	15.5	15.5	16.
DOWNCOMER	EXTERNAL	EXTERNAL	INTERNAL	INTERNAL	INTERNAL
HOT LEG DIAMETER(mm)	Double 113 Single 81	118	Triple 73. Single 46.	Double 350 Single 130	207

표 2. BETHSY 실험장치의 실험 수행 현황 (1/2)

CHARACTERIZATION TESTS	
STEADY STATE tests :	
. Single phase NC	
- Balanced loops (low, high P)	3.1
- Unbalanced loops (isolation of 1,2 SGs)	3.4a
. Two phase NC	
- Balanced loops	
high p 2% NP	4.1a
5% NP	4.1aTC
low P	4.1b
- Unbalanced loops	5.1b
- Non condensible gas	7.2c
. Degradation of SG mass inventory	
- Single phase at PCS (NC, FC)	5.1a
- Two phase NC	4.1aTC
. Two-phase flow forced convection	8.1a
. Feed and bleed at PCS	5.2a
SMALL- INTERMEDIATE BREAKS	
Cold leg :	
2" : - w HPIS 1 FILE	4.2a
- wo HPIS, delayed uitimate procedure	9.1b
3" : - safety injection in intact loops	6.1a
- safety injection in every loop	6.1b
- pumps on	8.1b
- delayed pump trip	8.1c
6" : - UHSN 3%, conservatrice power curve	6.2TC
- UHSN 2%, realistic power curve	6.2
10"	6.3
Hot leg : 6"	6.4
Steam break pressurizer	6.5
PV lower plenum	4.2b
RHRS break	6.8

표 2. BETHSY 실험장치의 실험 수행 현황 (2/2)

STEAM GENERATOR TUBE RUPTURE	
. Single w HPIS and AFWS	3.4b
. Single wo HPIS and AFW	9.3
. Multiple (6 tubes) w HPIS AFWS	4.3b
. Multiple + steam line rupture	9.2
TOTAL LOSS OF FEEDWATER	
	5.2c
. 2 HPIS files, 3 relief valves	5.2b
. 1 HPIS file, 1 relief valve	5.2e
. Delayed recovery of AFWS	
BLACK OUT AND AFWS FAILURE	5.2d
LOSS OF RHRS	
. PCS open :	
- pressurizer	6.9a
- pressurizer + SG inlet plenum	6.9b
- pressurizer + SG outlet plenum	6.9c
. PCS half-open	6.9d
LARGE BREAKS (reflooding phase)	
- wo non condensible gas	6.7a 1....4
- with "	6.7b
. to be defined	6.7c...e

표 3. BETHSY 6.9b 초기조건

Parameters	*BETHSY*	*CATHARE2*
Upper plenum pressure (MPa)	0.112±0.002	0.111
Core power (kw)	0.0	0.0
Pump speed (rpm)	0.0	0.0
Primary total mass (kg)	1085±15	1084
Hot leg 1/2/3 void fraction	0.6/0.6/0.6	0.7/0.7/0.7
Cold leg 1/2/3 void fraction	0.0/0.0/0.0	0.0/0.0/0.0
Temperature in core (C)	103±2	103
Temperature in hot leg (C)	101.5±	101.5
Temjperature in cold leg (C)	96±2	96

표 4. BETHSY 6.9b 주요현상 발생 시간

Event	*BETHSY*	*CATHARE2*
Start od core power ramp and Opening of manways	0	0
End of core power ramp	38	38
Start of core uncovery	848	830
Start of gravity-feed injection	1133	1120
Start of force-feed injection(0.25 kg/s)	1318	1220
End of core uncovery	1598	1600
Increase of force-feed injection(0.30 kg/s)	2998	3000
Increase of force-feed injection(0.30 kg/s)	3598	3600
Transient shutdown procedure (injection stopped, core power shutdown and orifices closed)	4453	4453
End of test	5333	

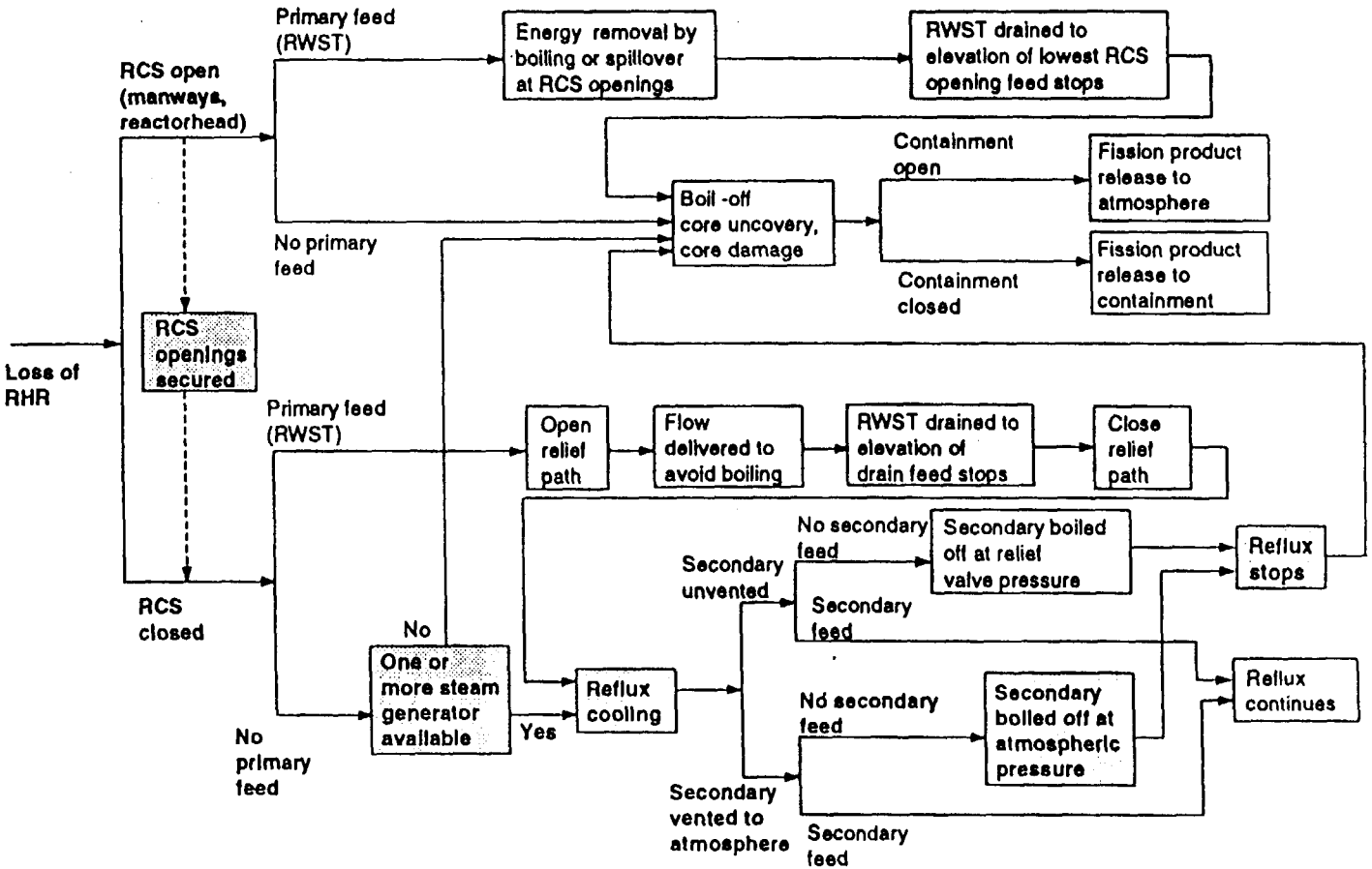

그림 1. RHRS 상실사고시 가능한 시나리오 및 냉각 방법

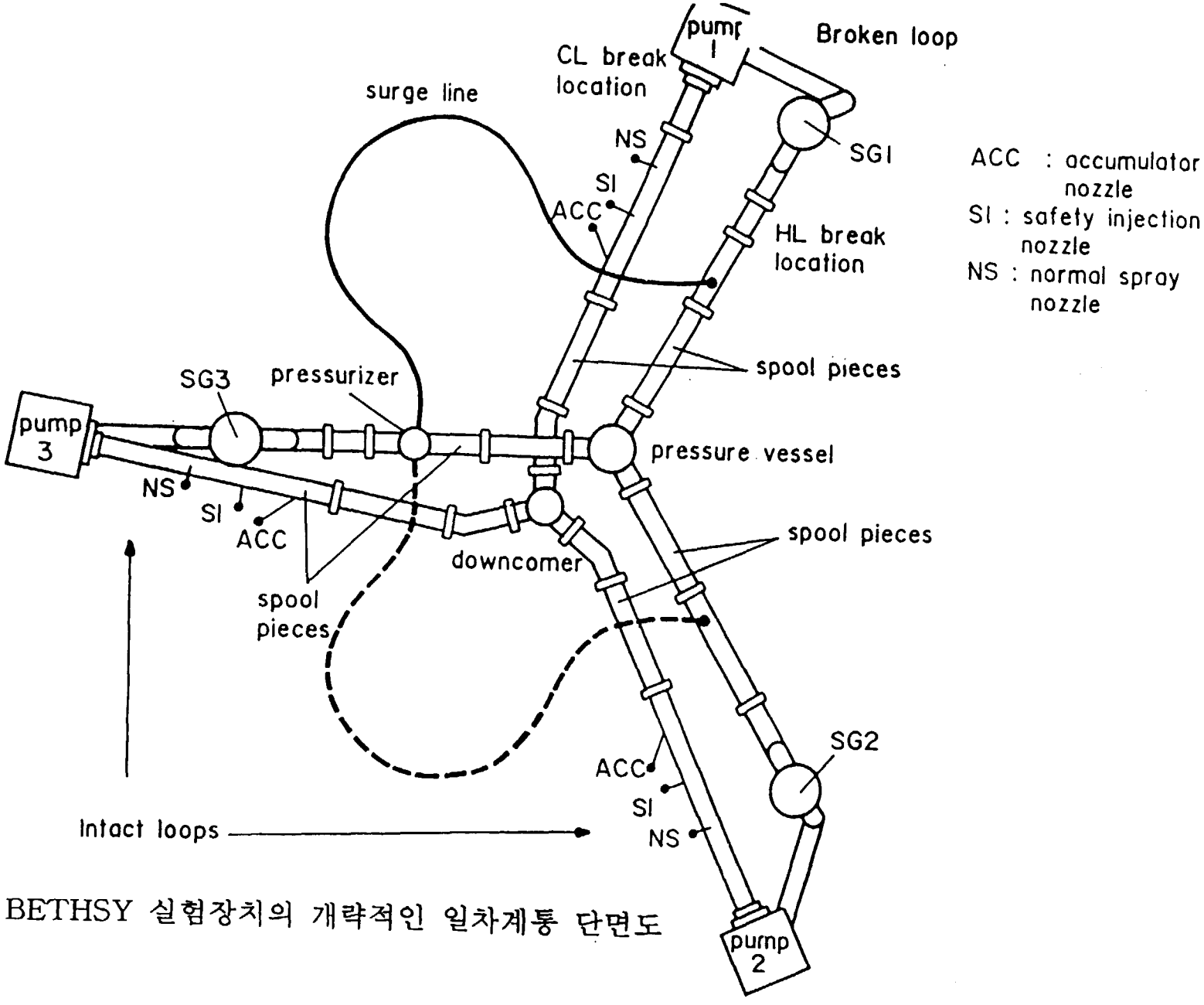

그림 2. BETHSY 실험장치의 개략적인 일차계통 단면도

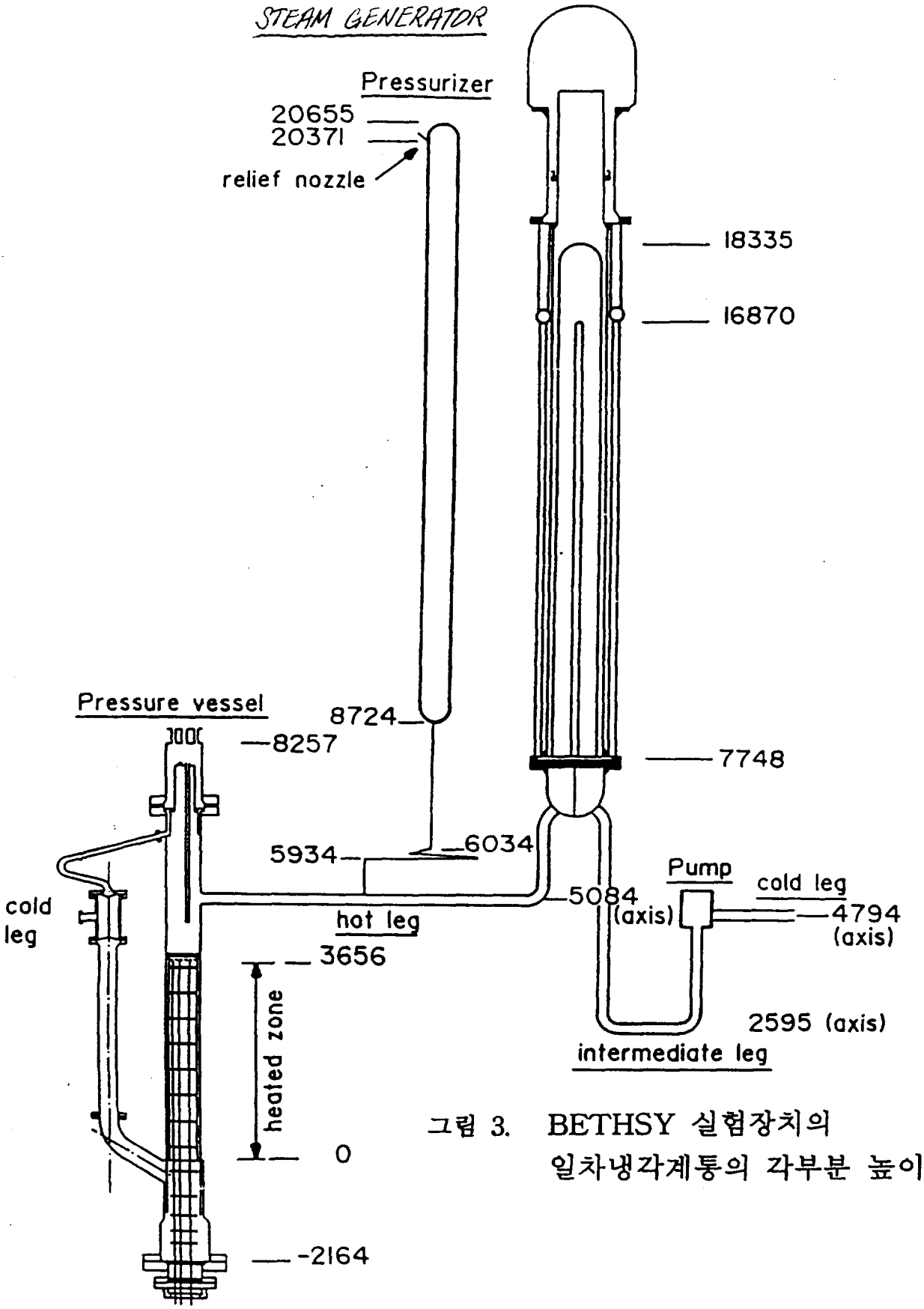

그림 3. BETHSY 실험장치의
일차냉각계통의 각부분 높이

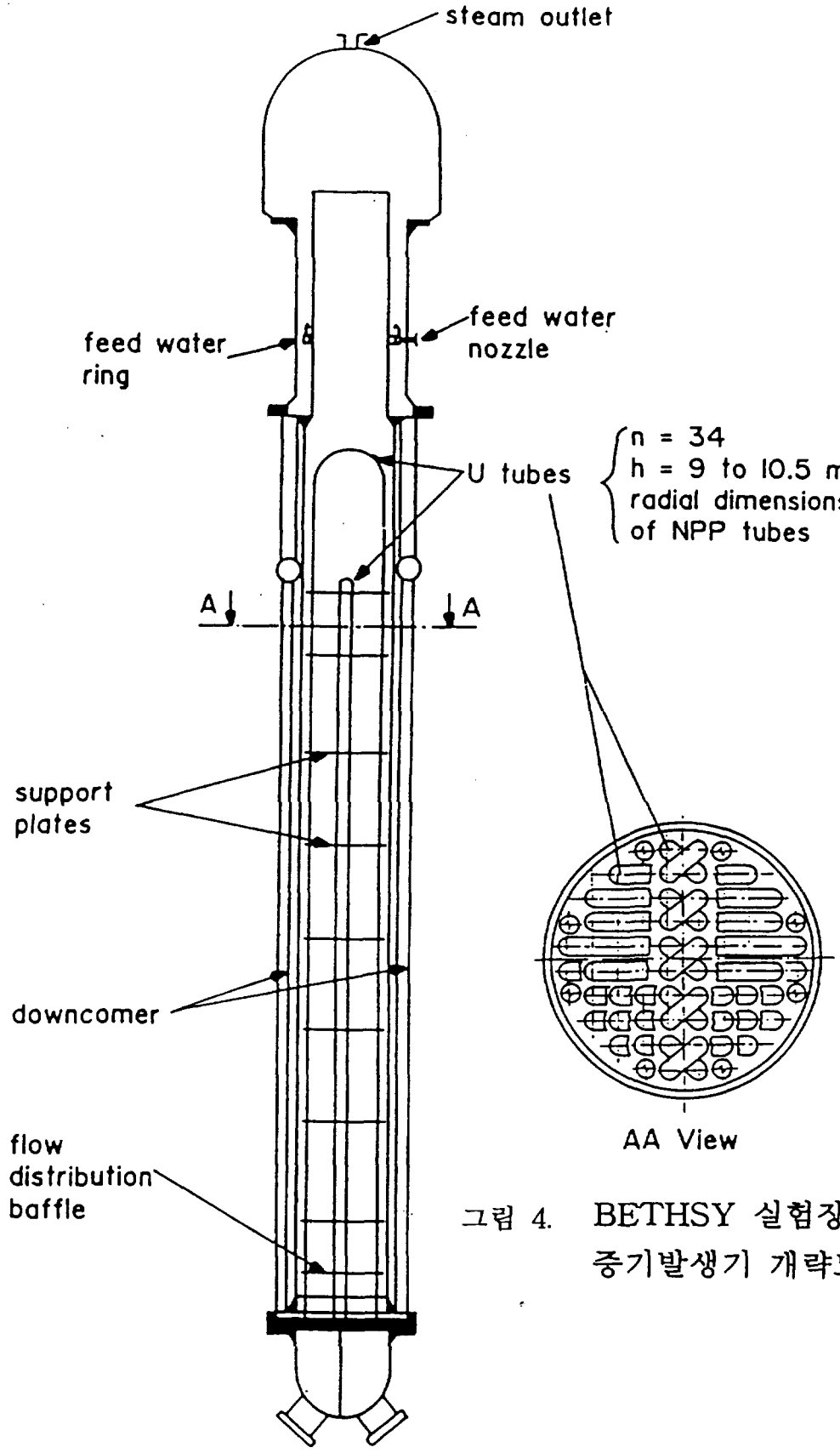

그림 4. BETHSY 실험장치의 증기발생기 개략도

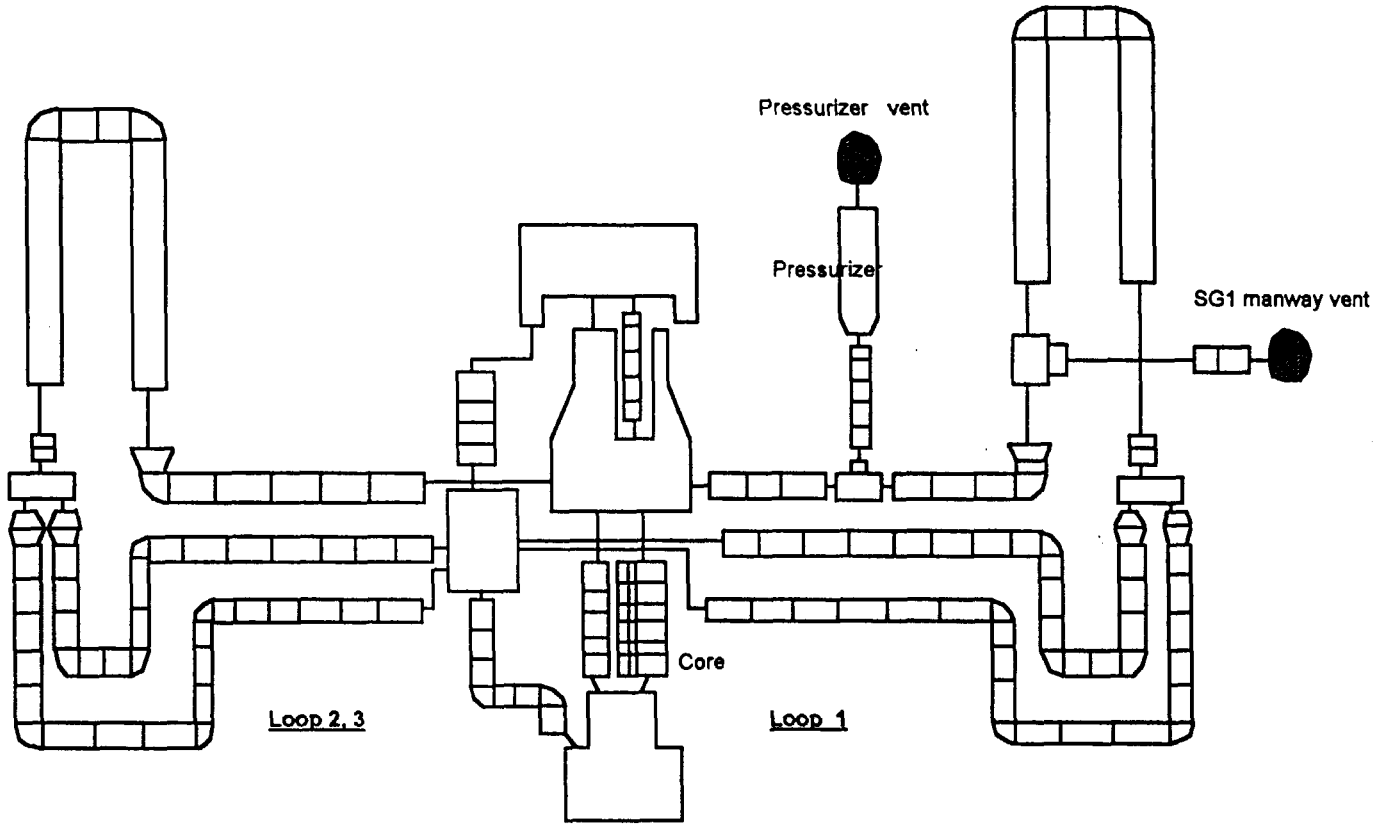

그림 5. BETHSY 6.9b Nodalization

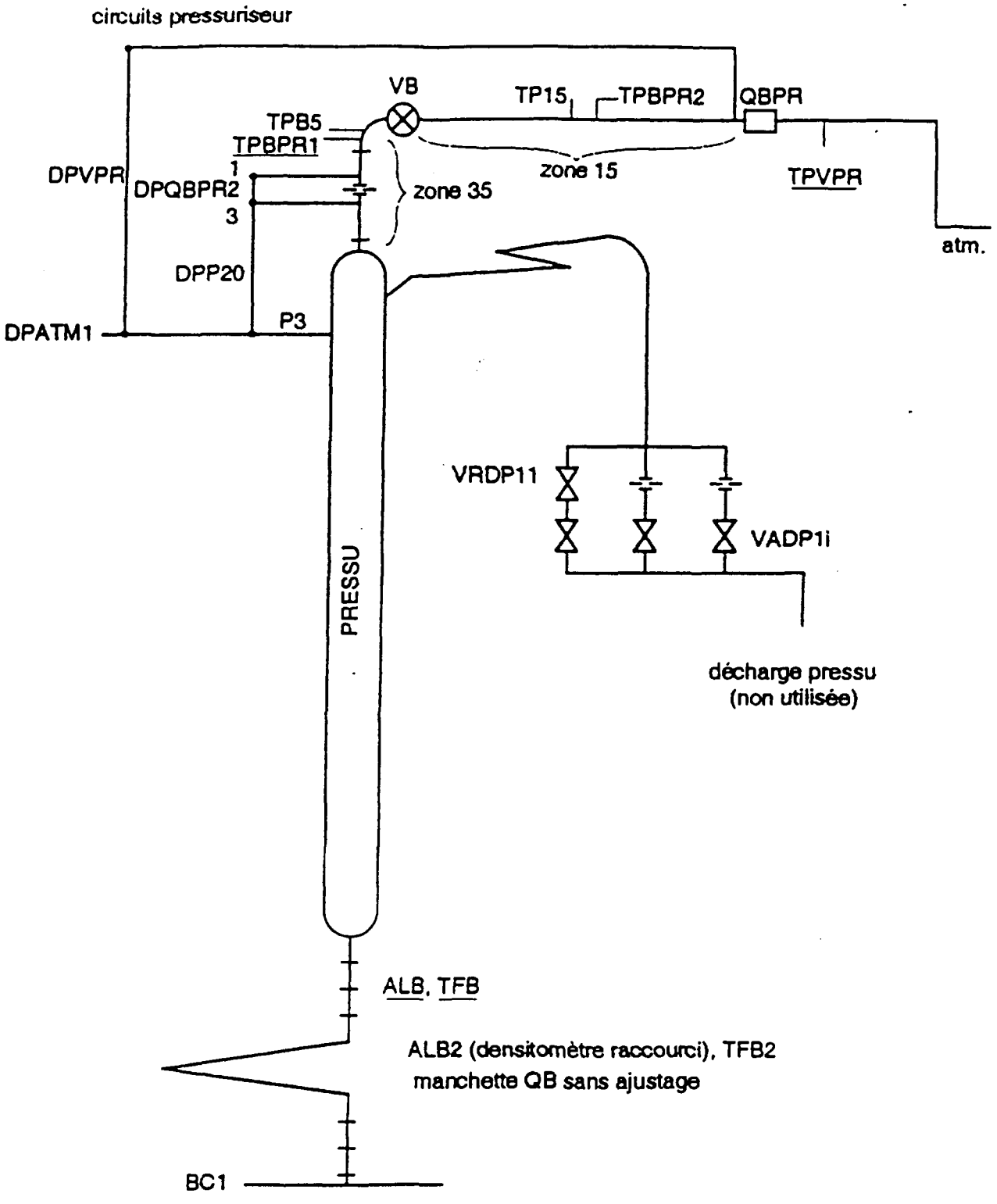

그림 6. Pressurizer manway configuration (1/2)

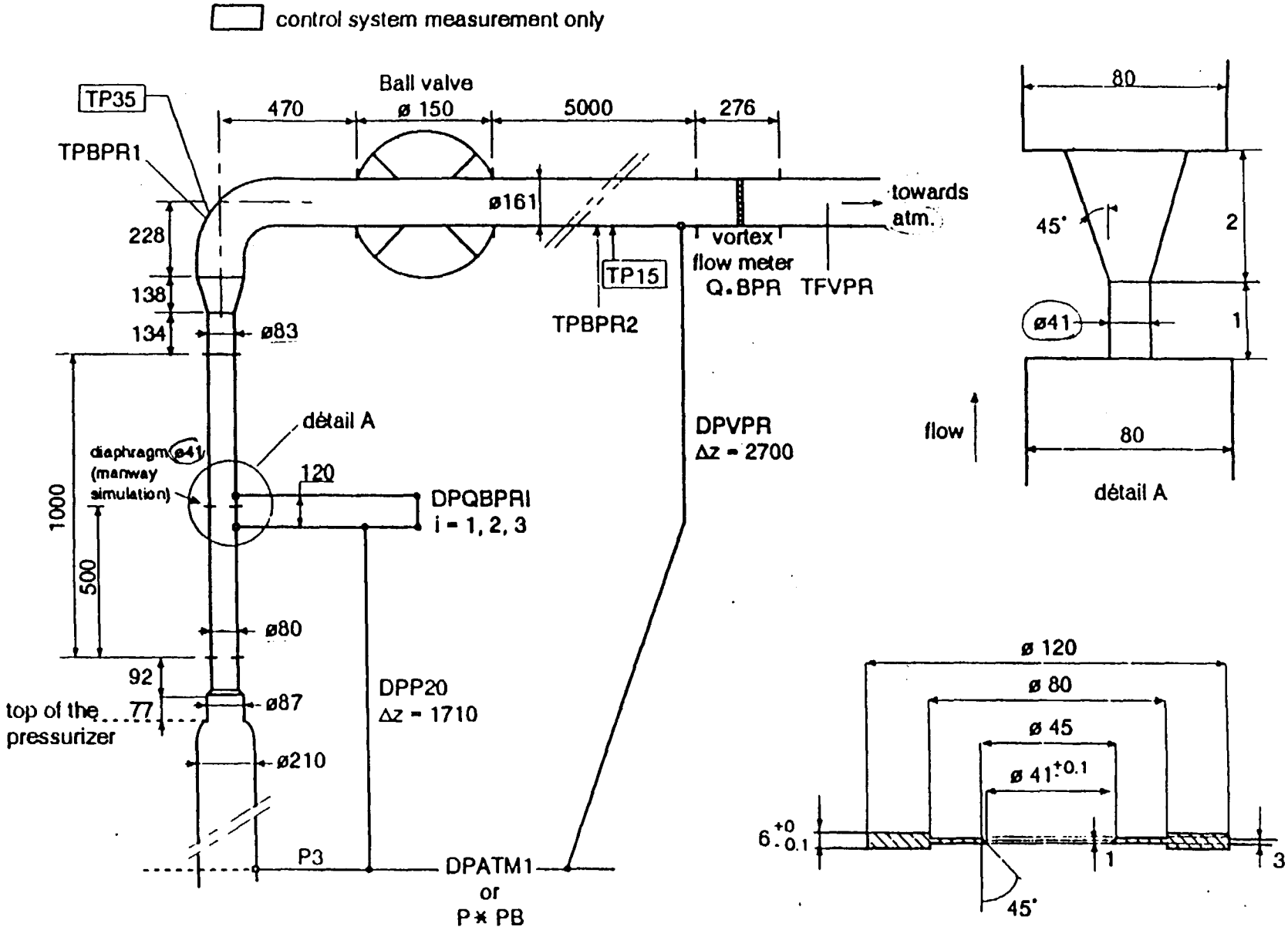

그림 6. Pressurizer manway configuration (2/2)

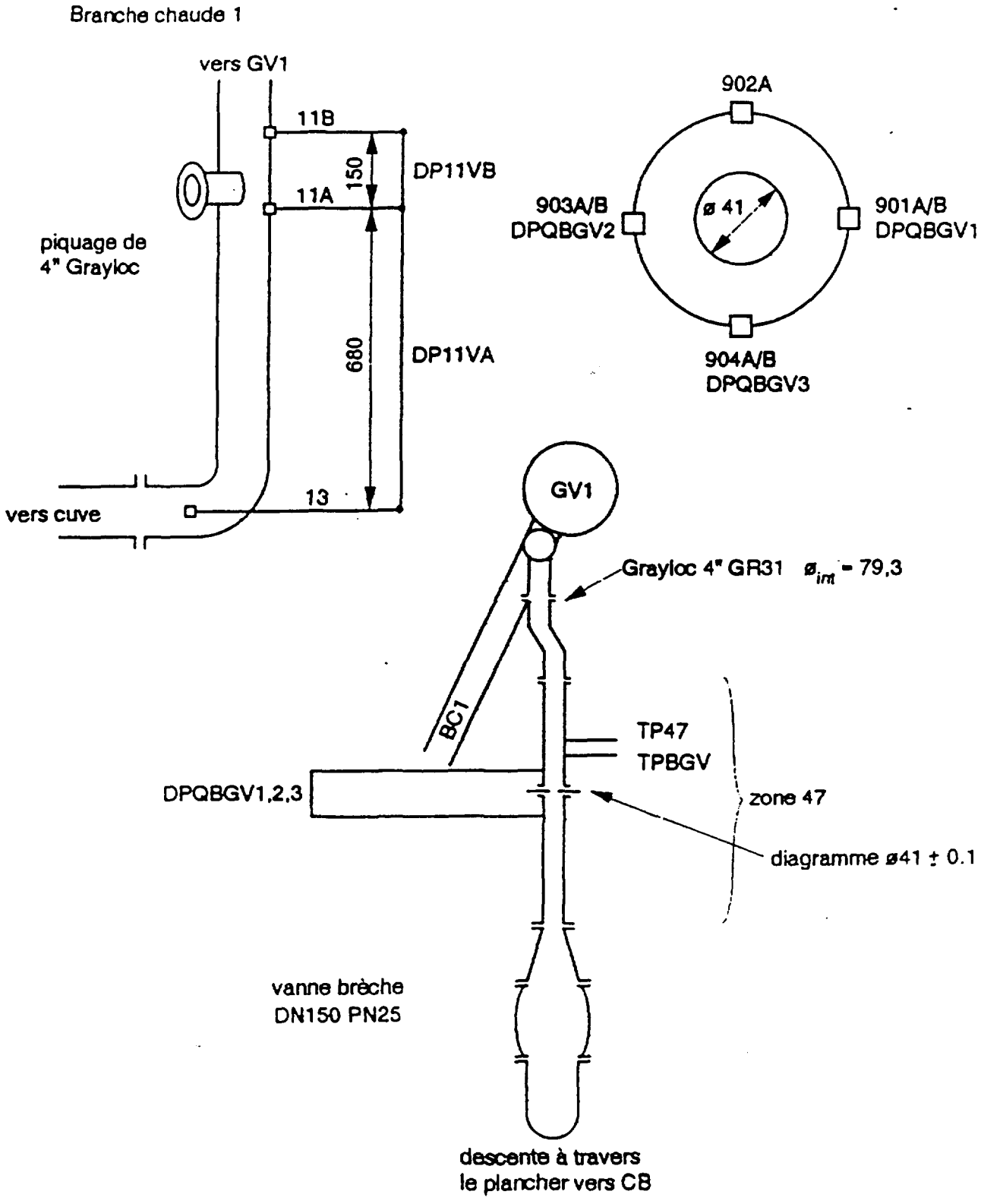

그림 7. SG inlet plenum manway configuration (1/2)

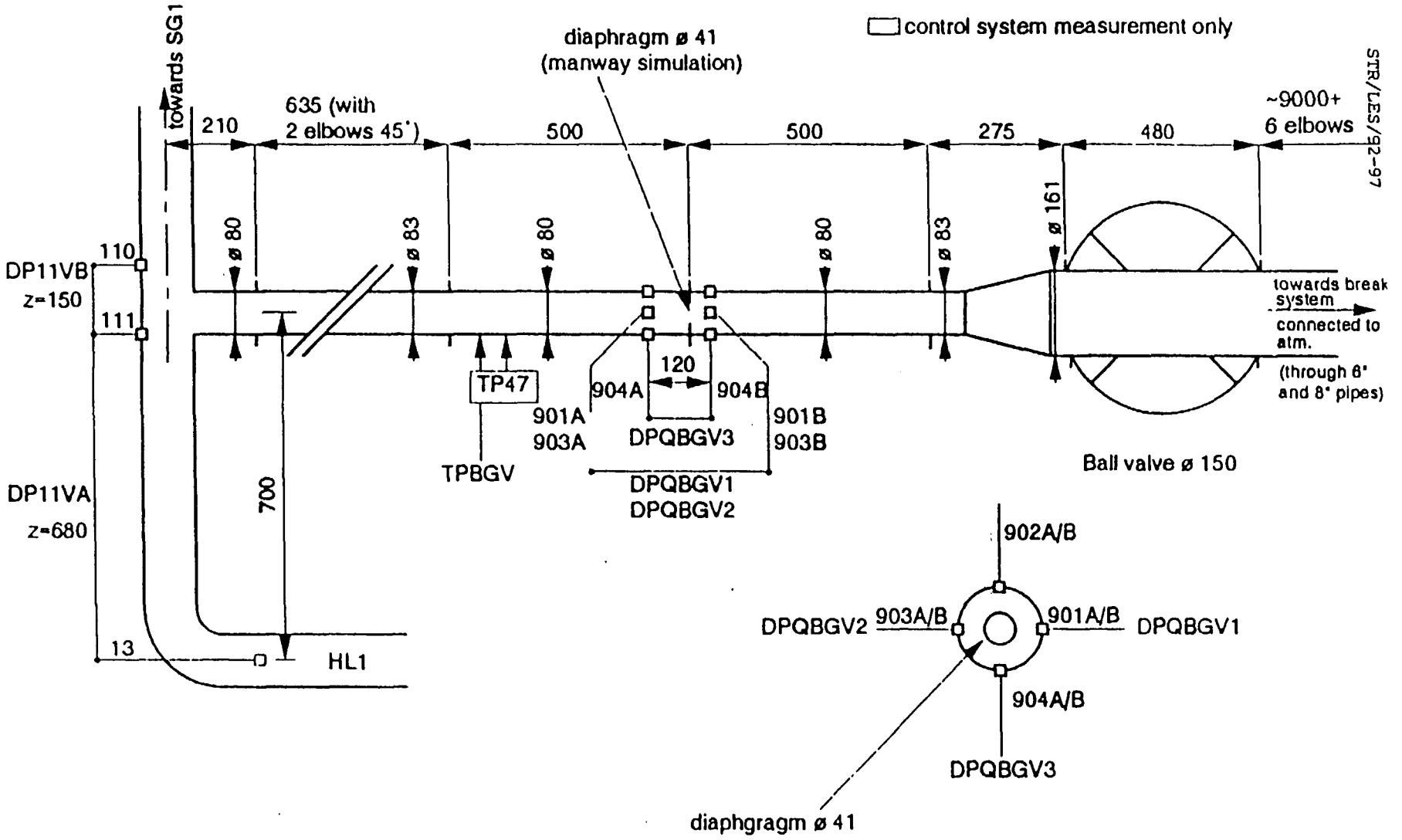

그림 7. SG inlet plenum manway configuration (2/2)

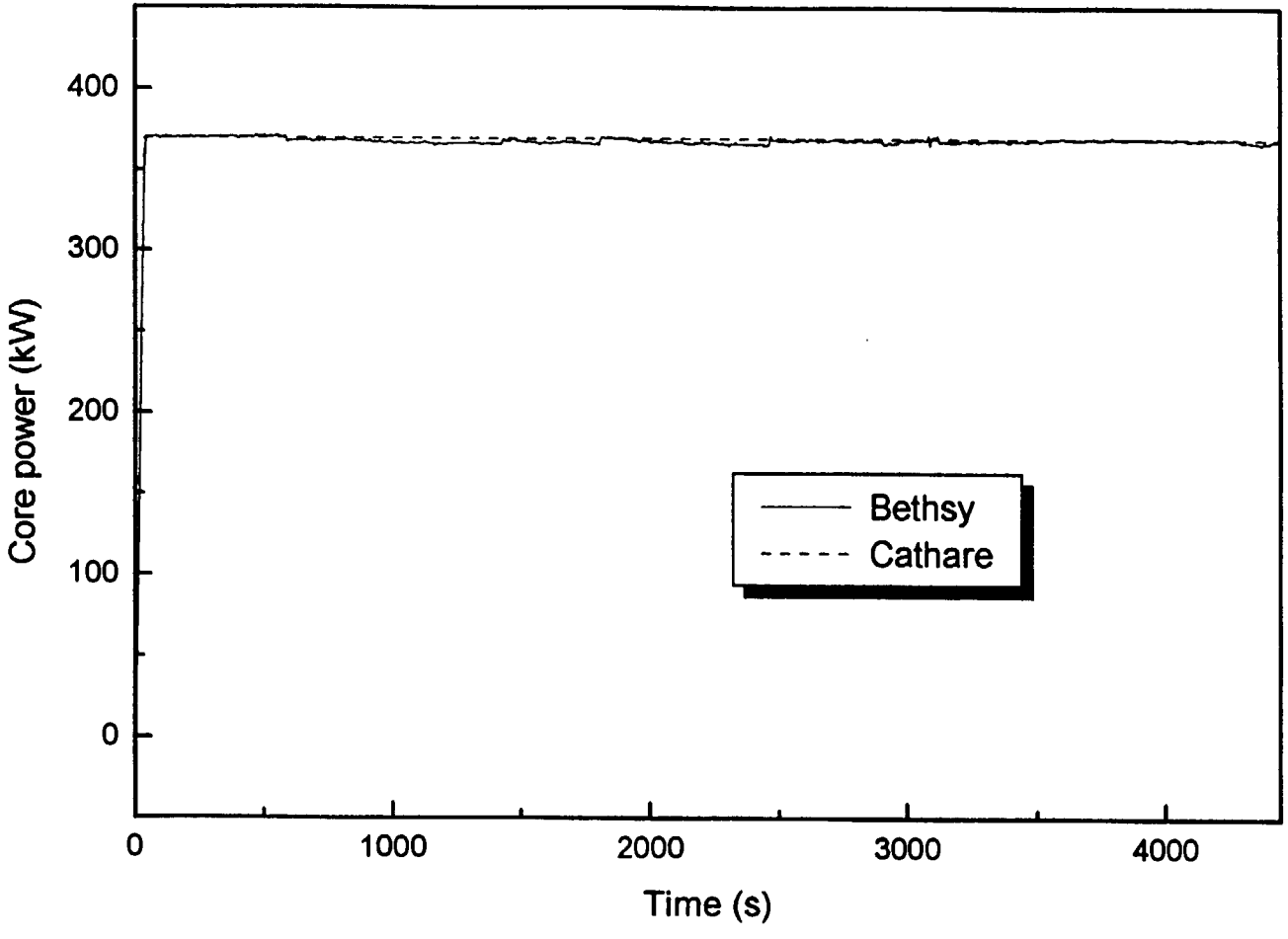
400
300
200
100
0
Core power (kW)
0
1000
2000
3000
4000
Time (s)
Bethsy
Cathare

그림 8. 노심 출력

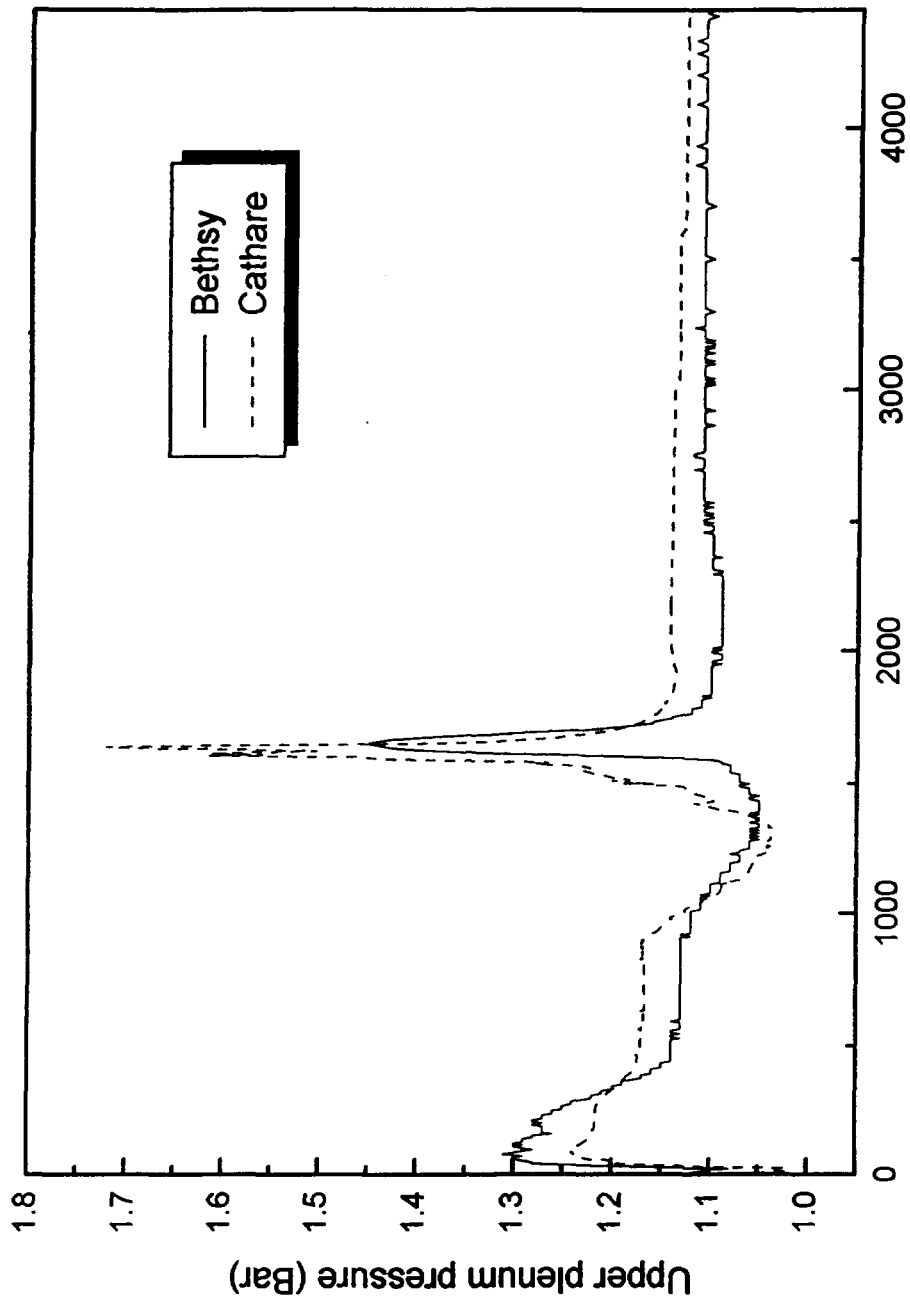

그림 9. Upper plenum pressure

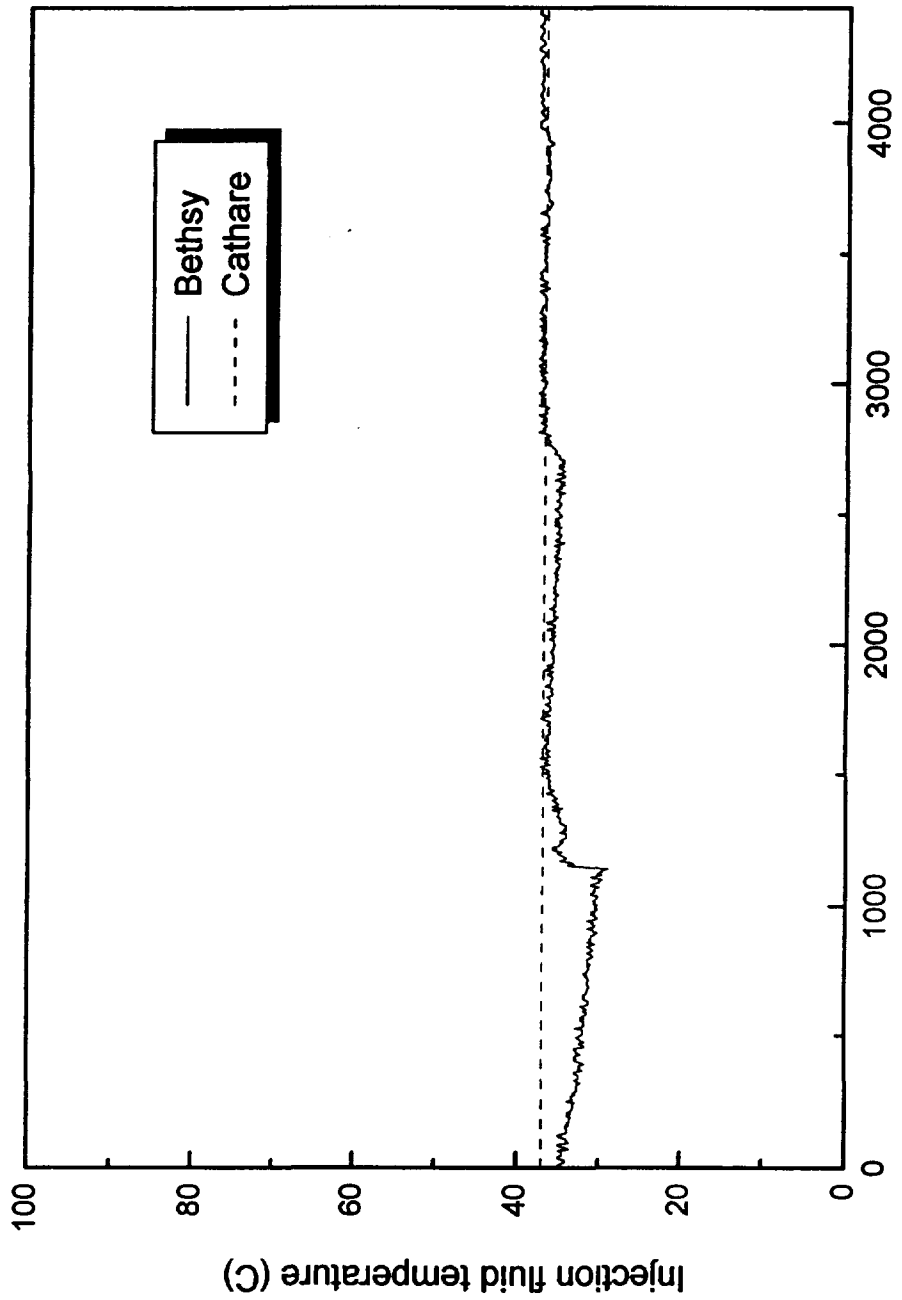

그림 10. Injection fluid temperature

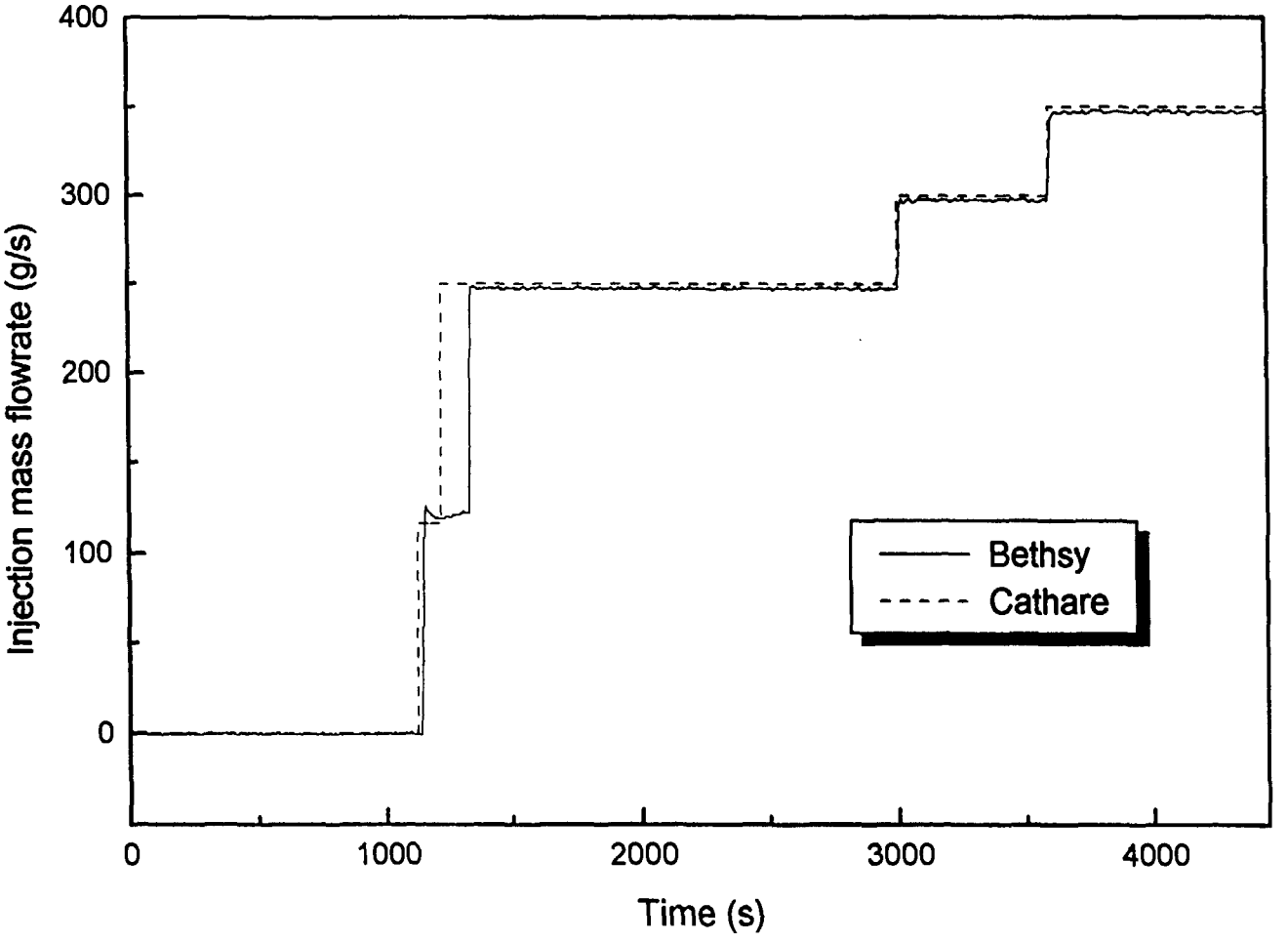

그림 11. Injection mass flowrate

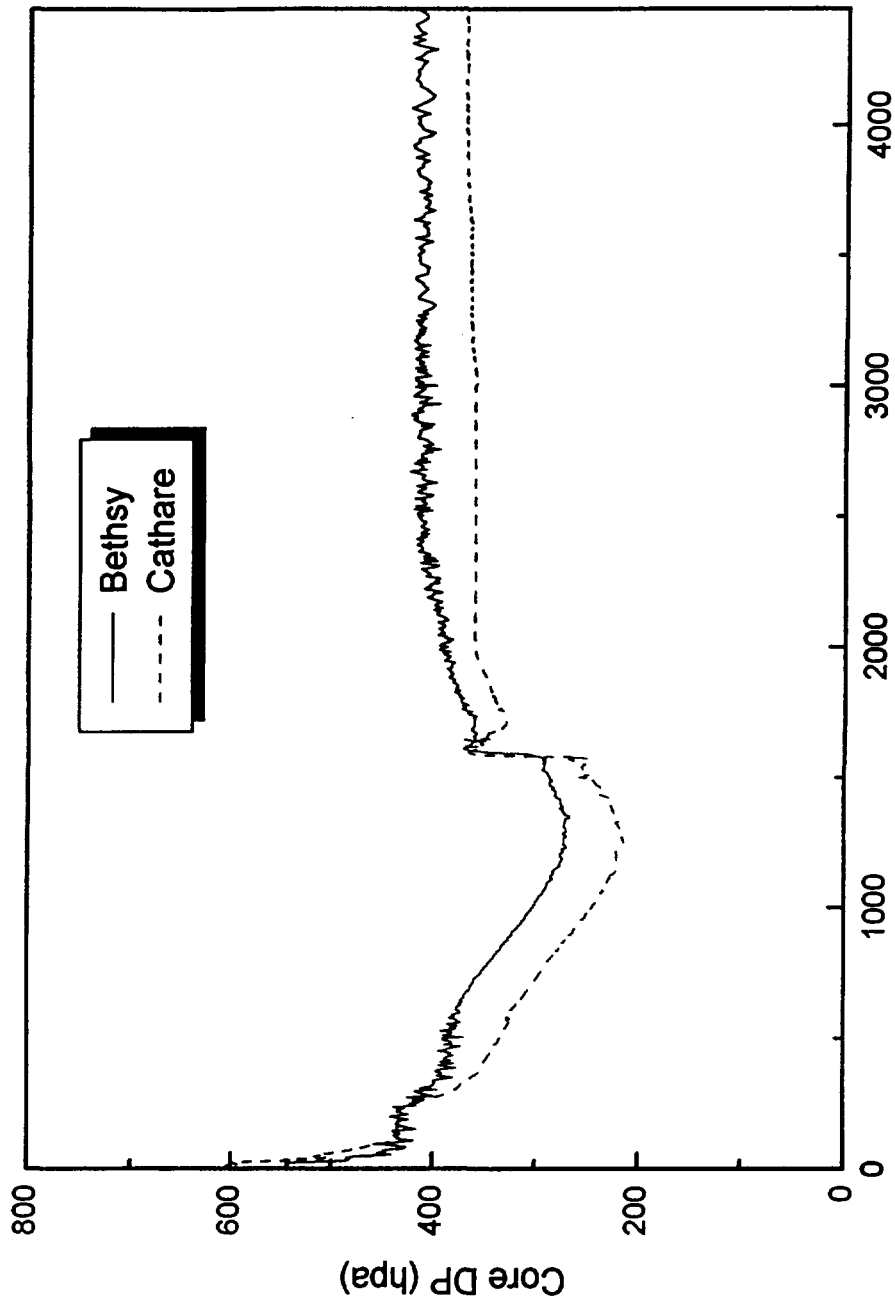
Bethsy
Cathare
Core DP (hpa)
Time (s)
0
200
400
600
800
0
1000
2000
3000
4000

그림 12. Core DP

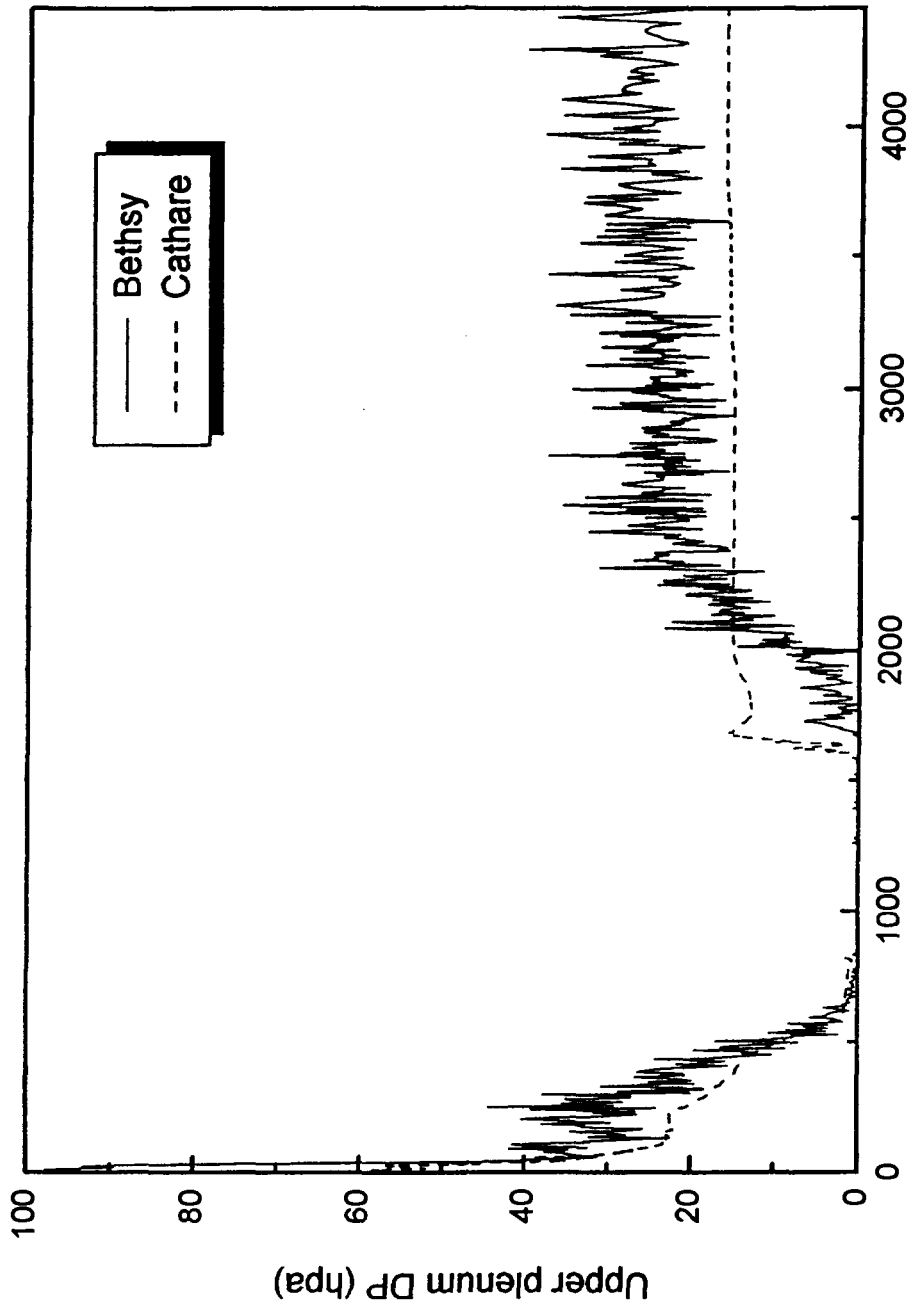

그림 13. Upper plenum DP

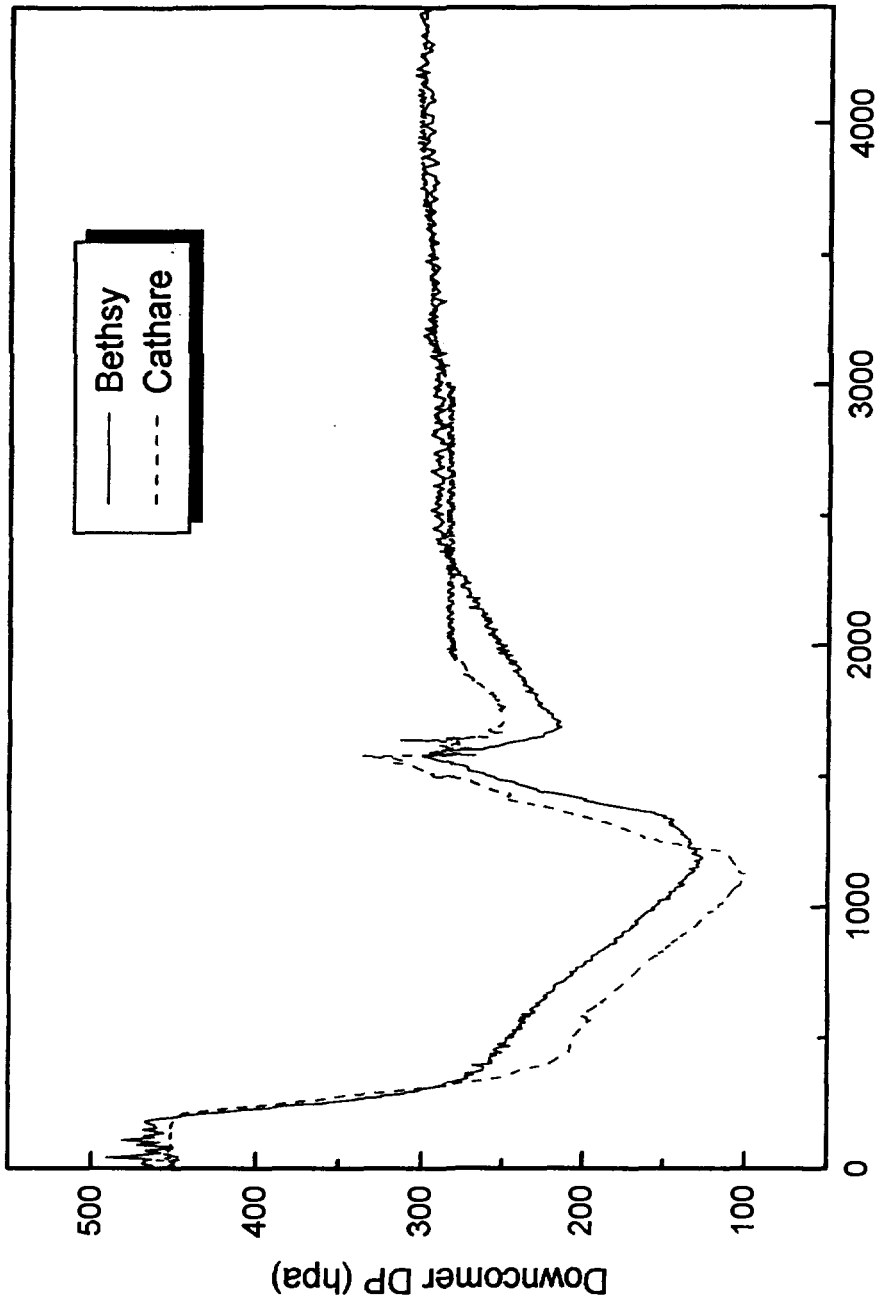

그림 14. Downcomer DP

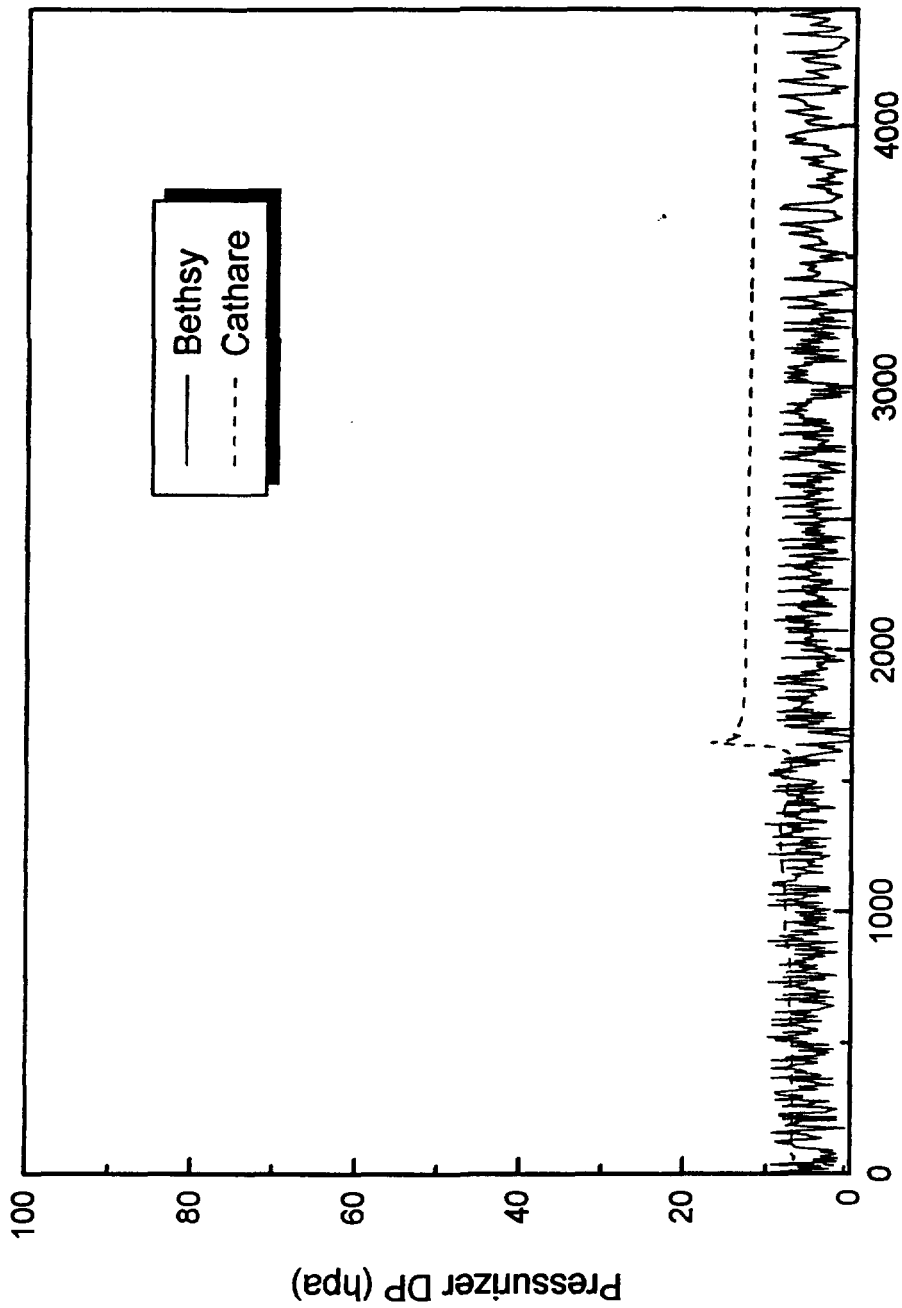

그림 15. Pressurizer DP

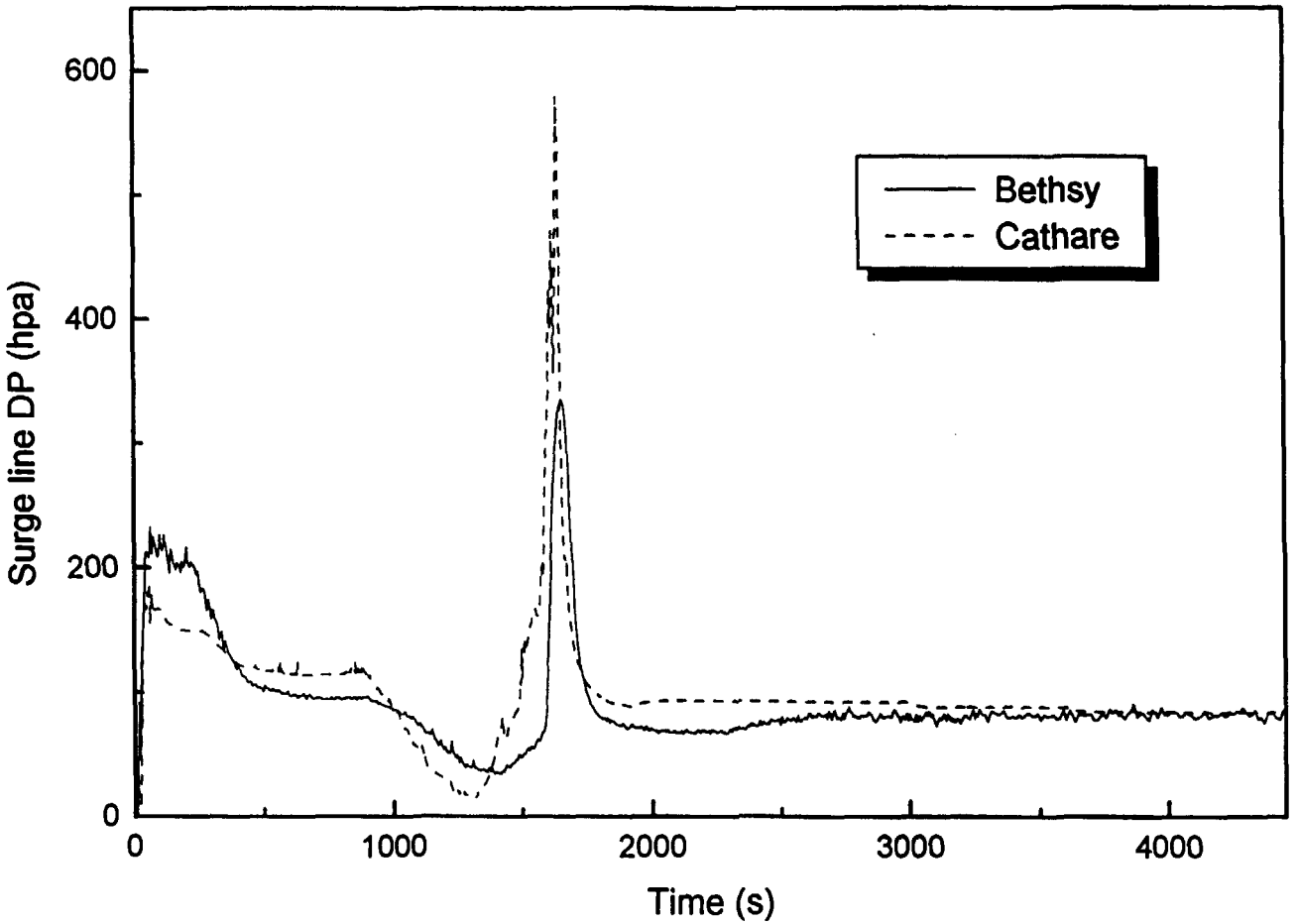

그림 16. Surge line DP

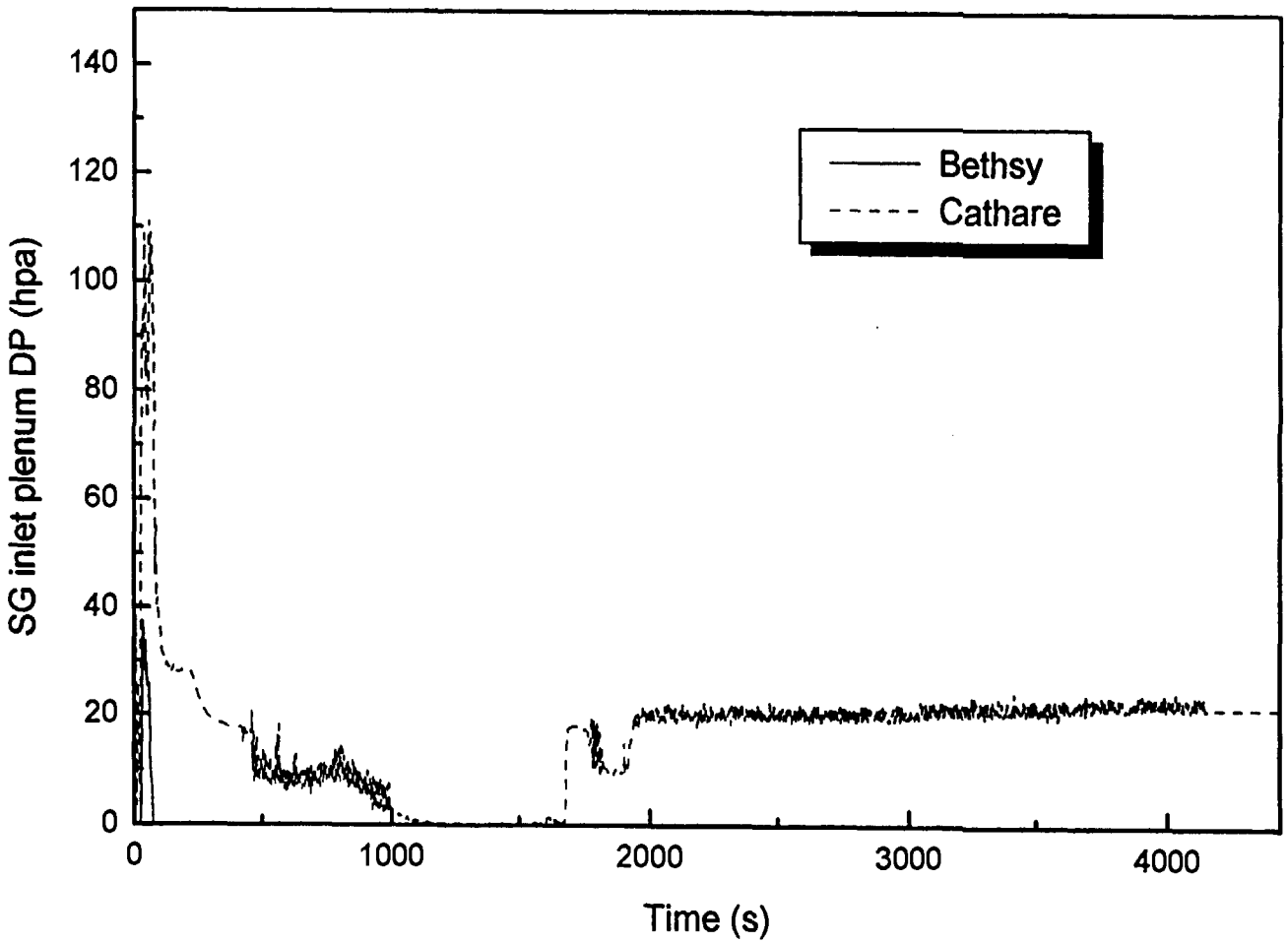

그림 17. SG inlet plenum DP (Loop 1)

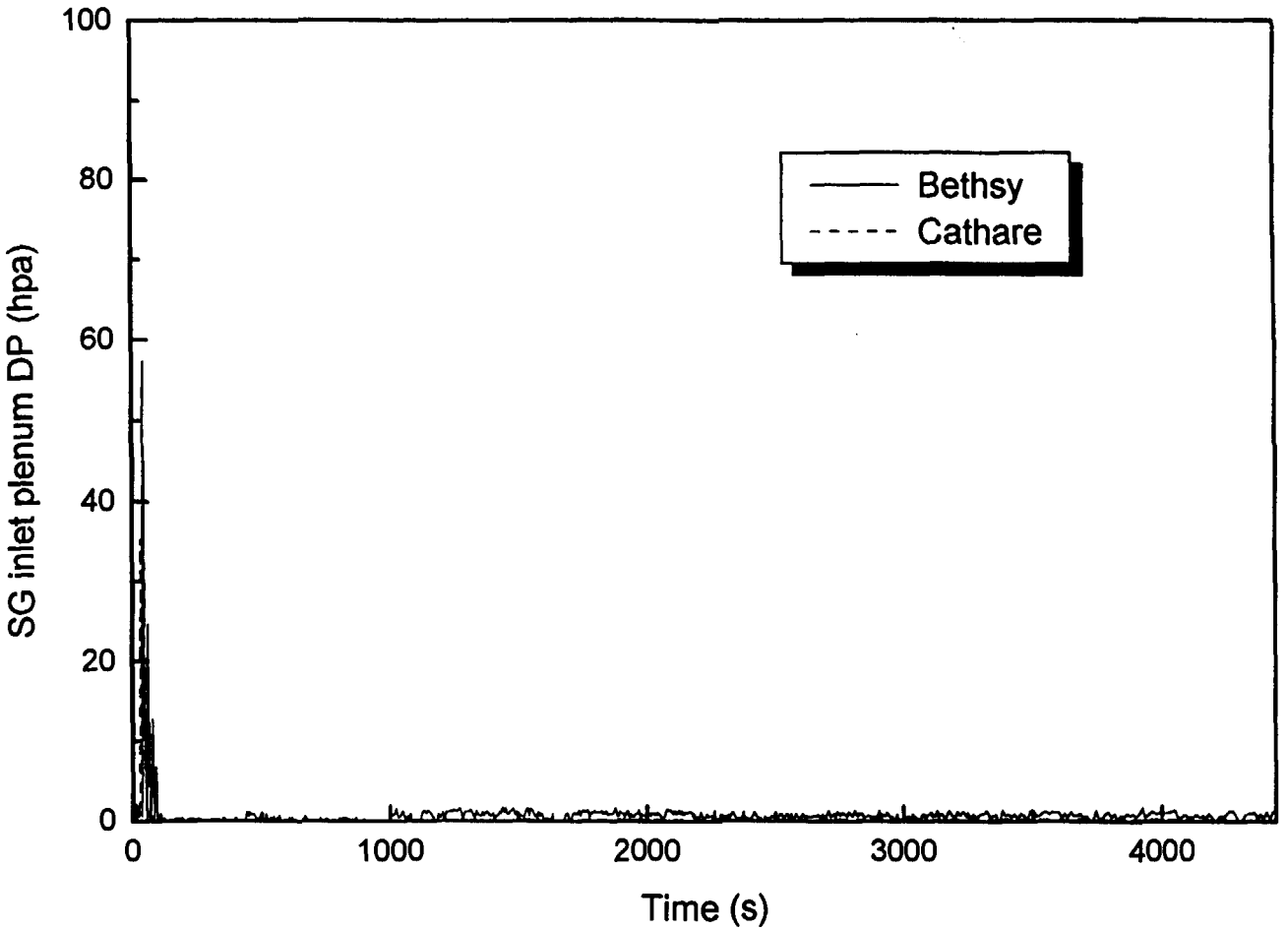

그림 18. SG inlet plenum DP (Loop 2)

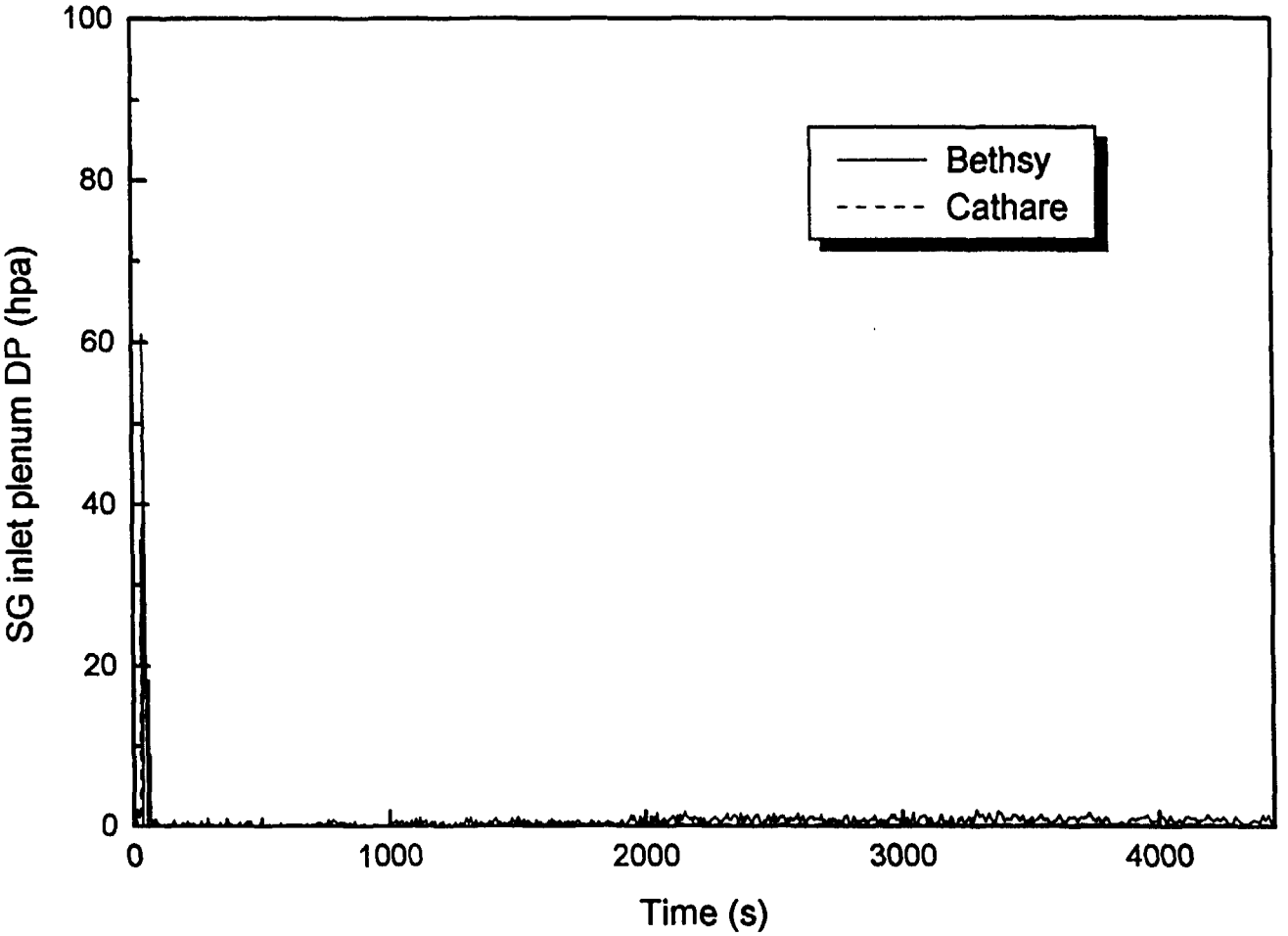

그림 19. SG inlet plenum DP (Loop 3)

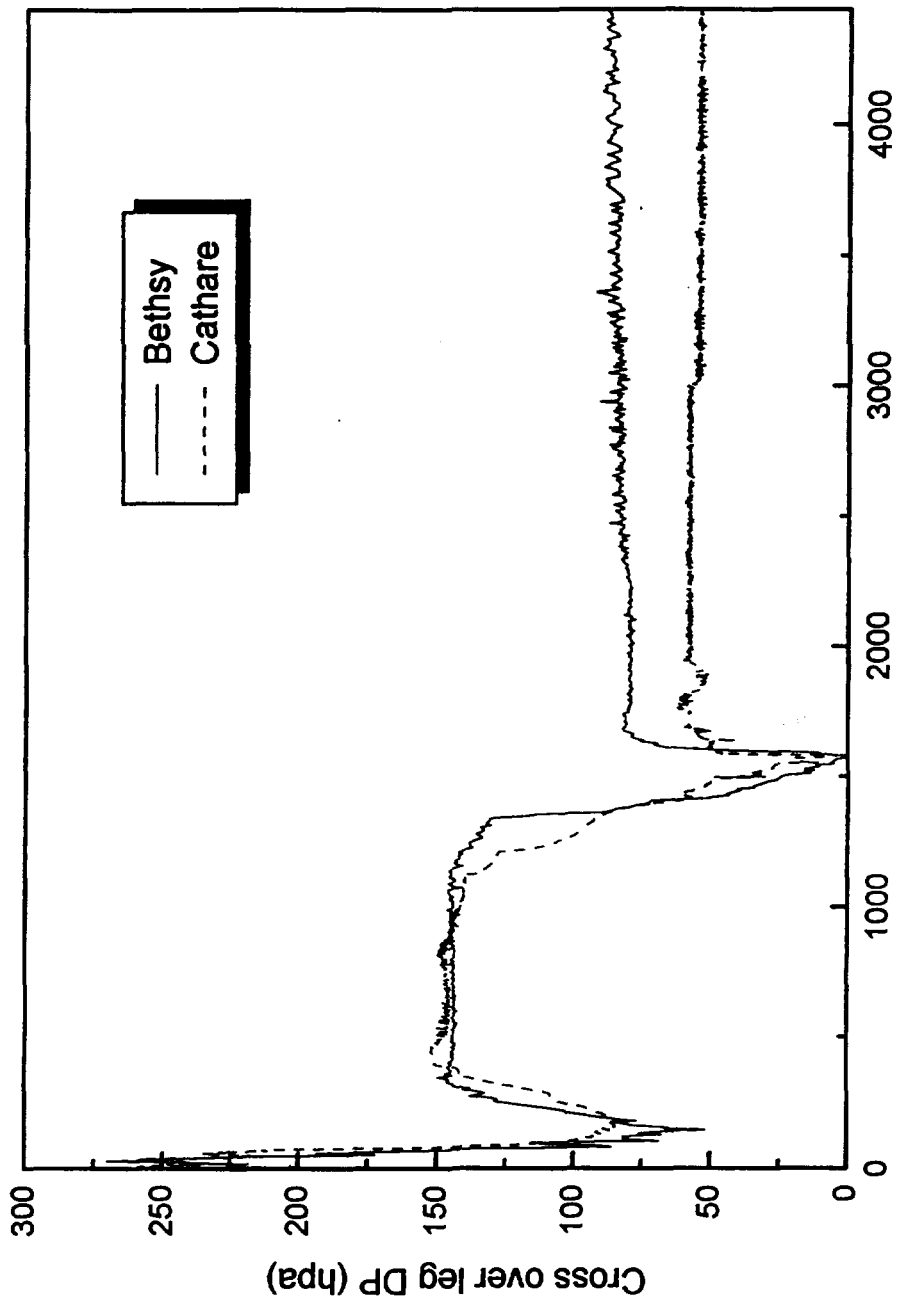

그림 20. Cross over leg DP (Loop 1, SG side)

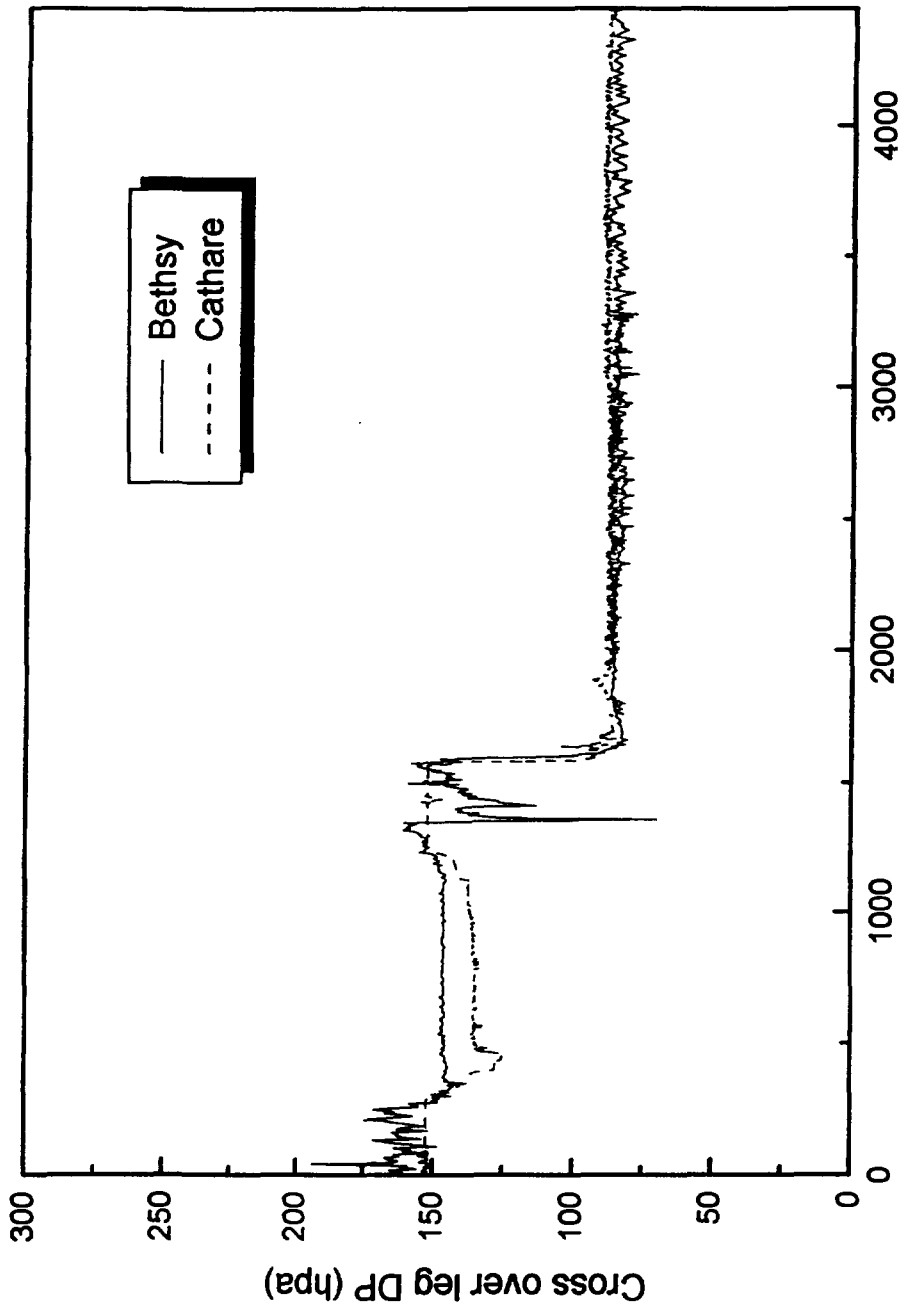

그림 21. Cross over leg DP (Loop 1, pump side)

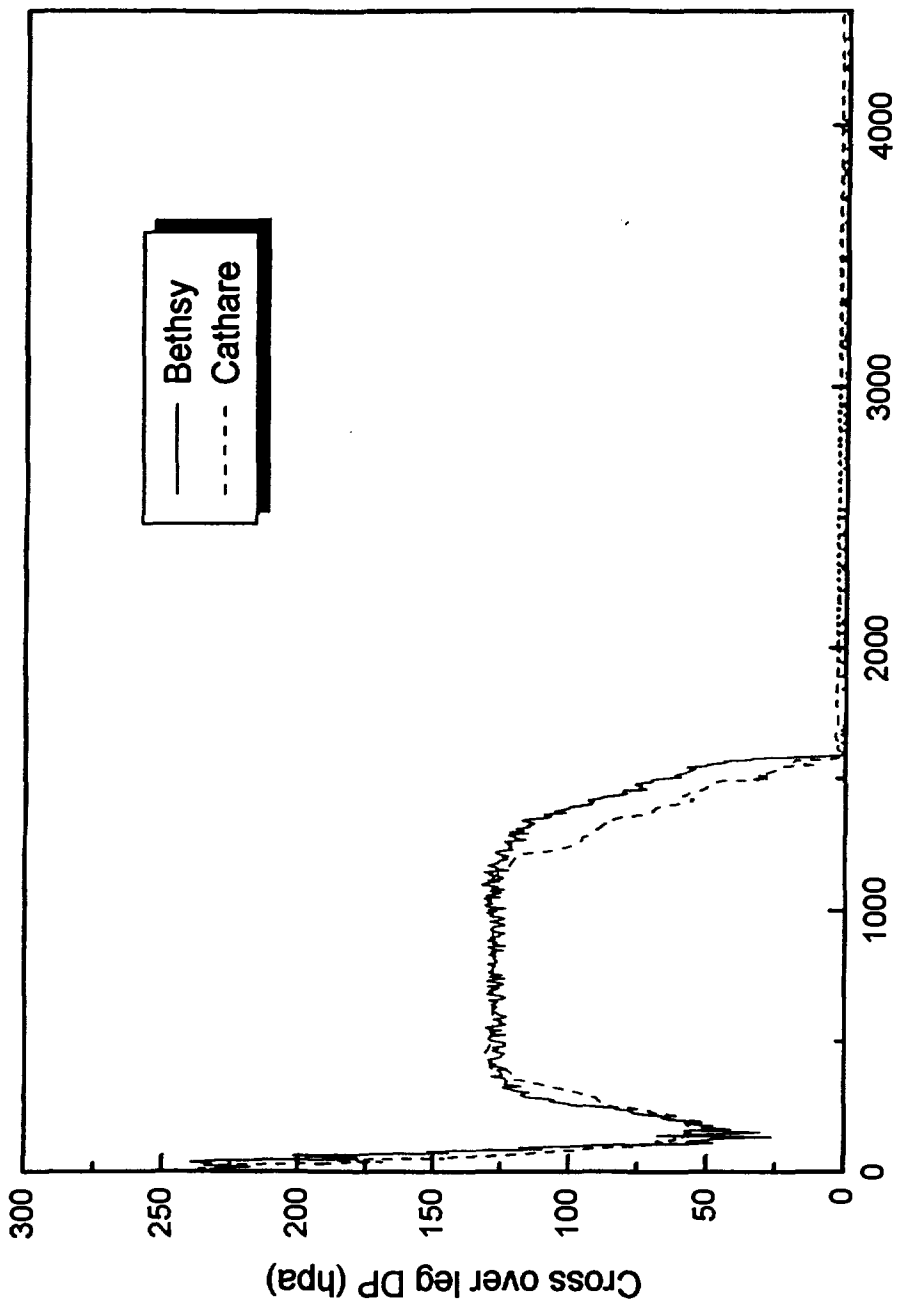

그림 22. Cross over leg DP (Loop 2, SG side)

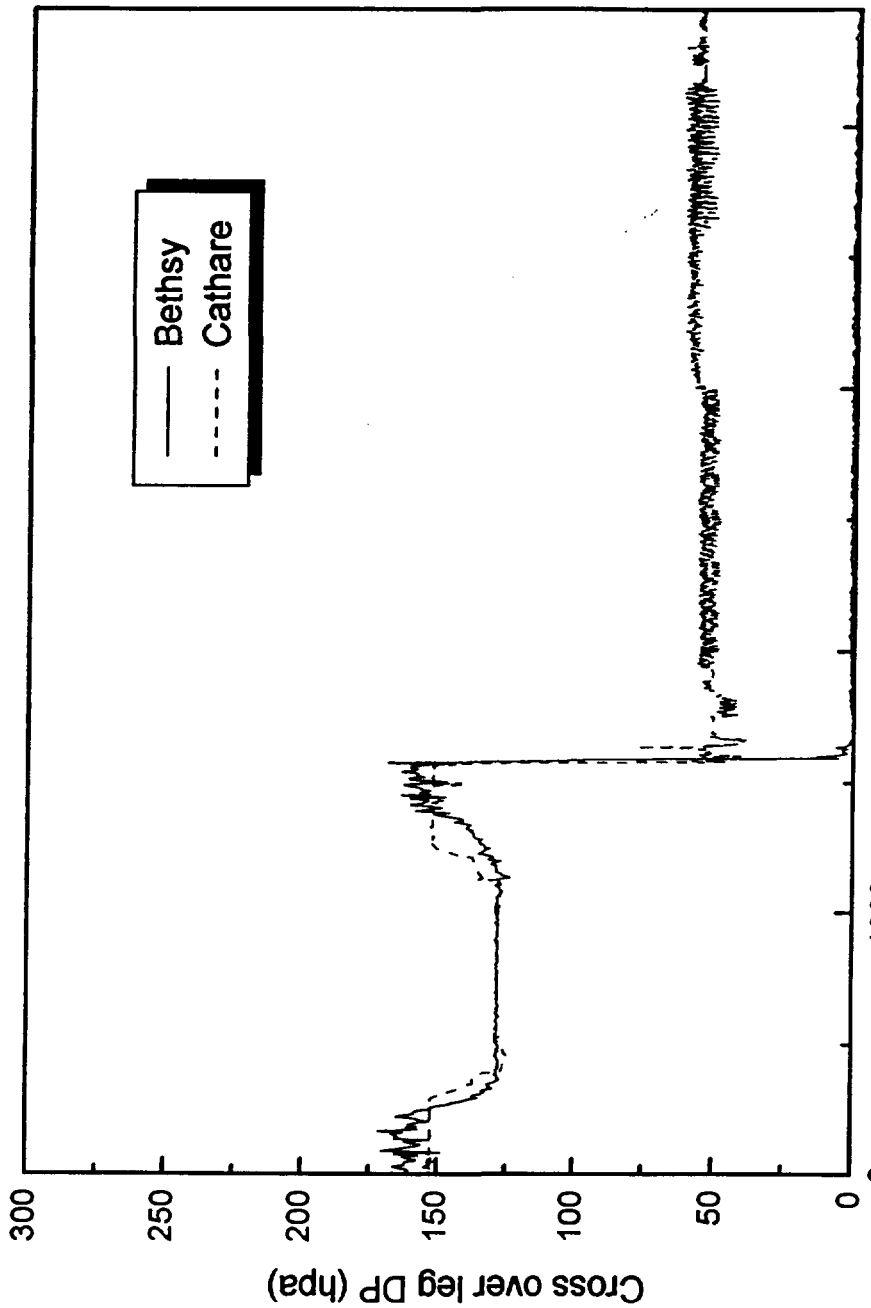

그림 23. Cross over leg DP (Loop 2, pump side)

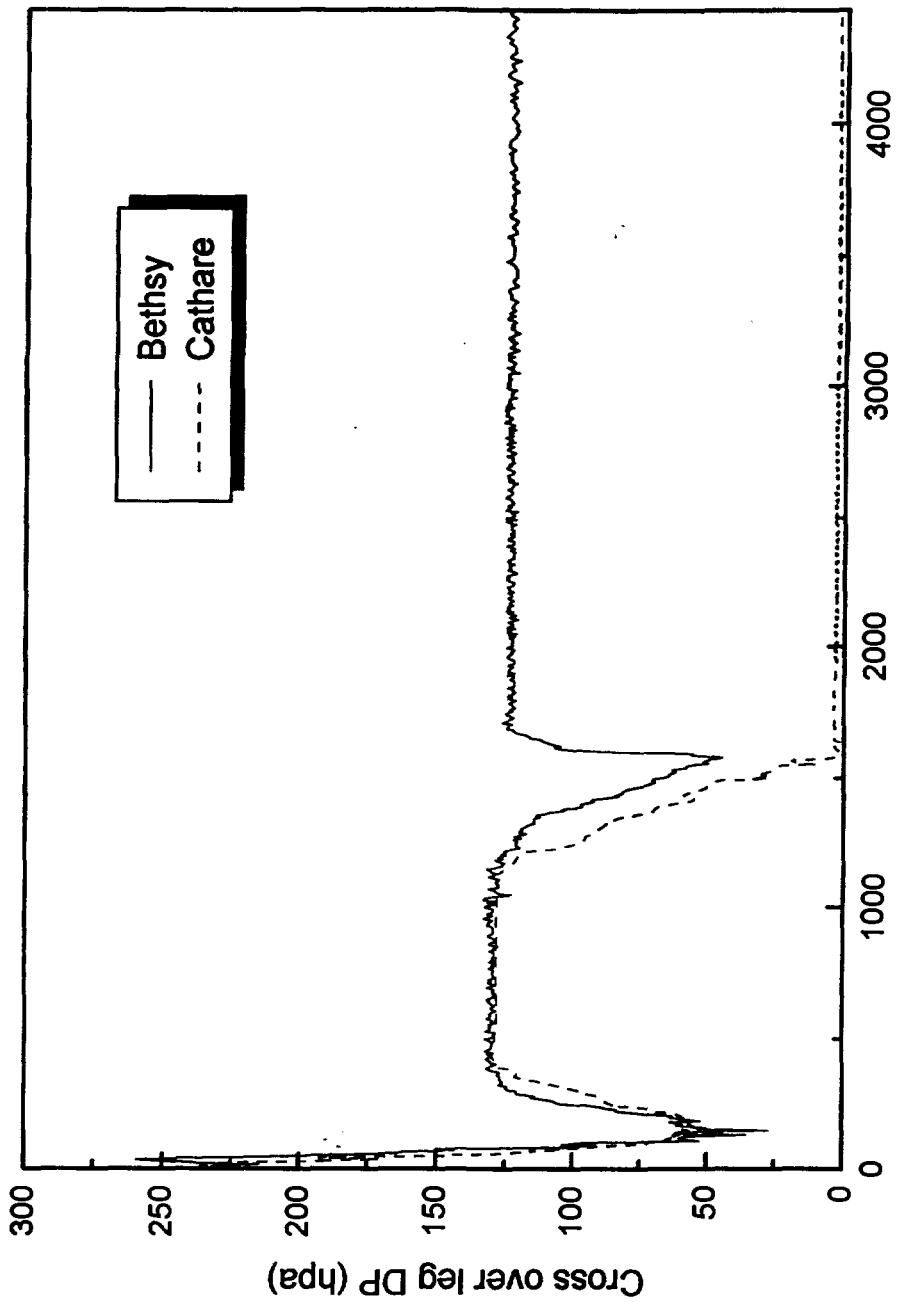

그림 24. Cross over leg DP (Loop 3, SG side)

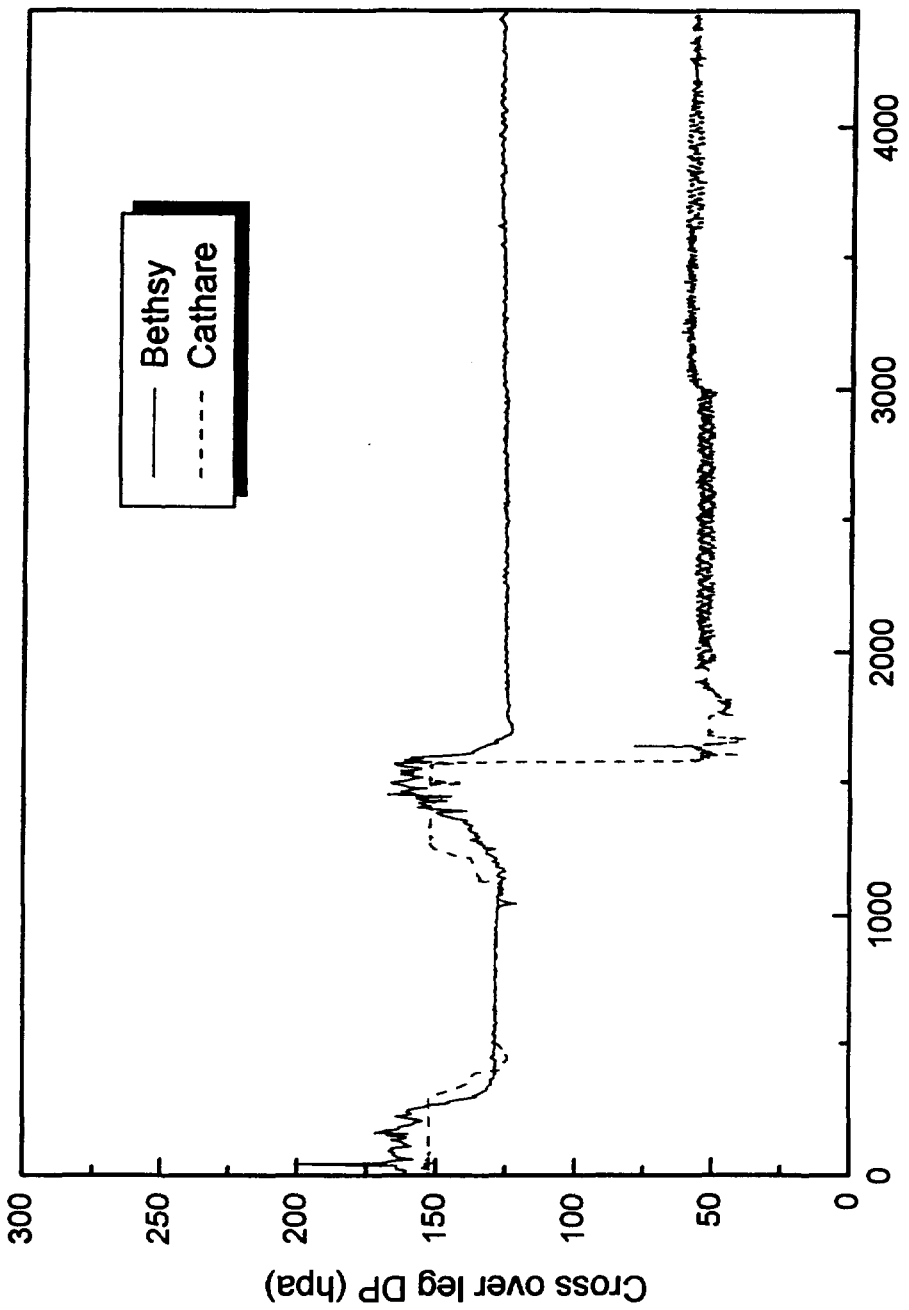

그림 25. Cross over leg DP (Loop 3, pump side)

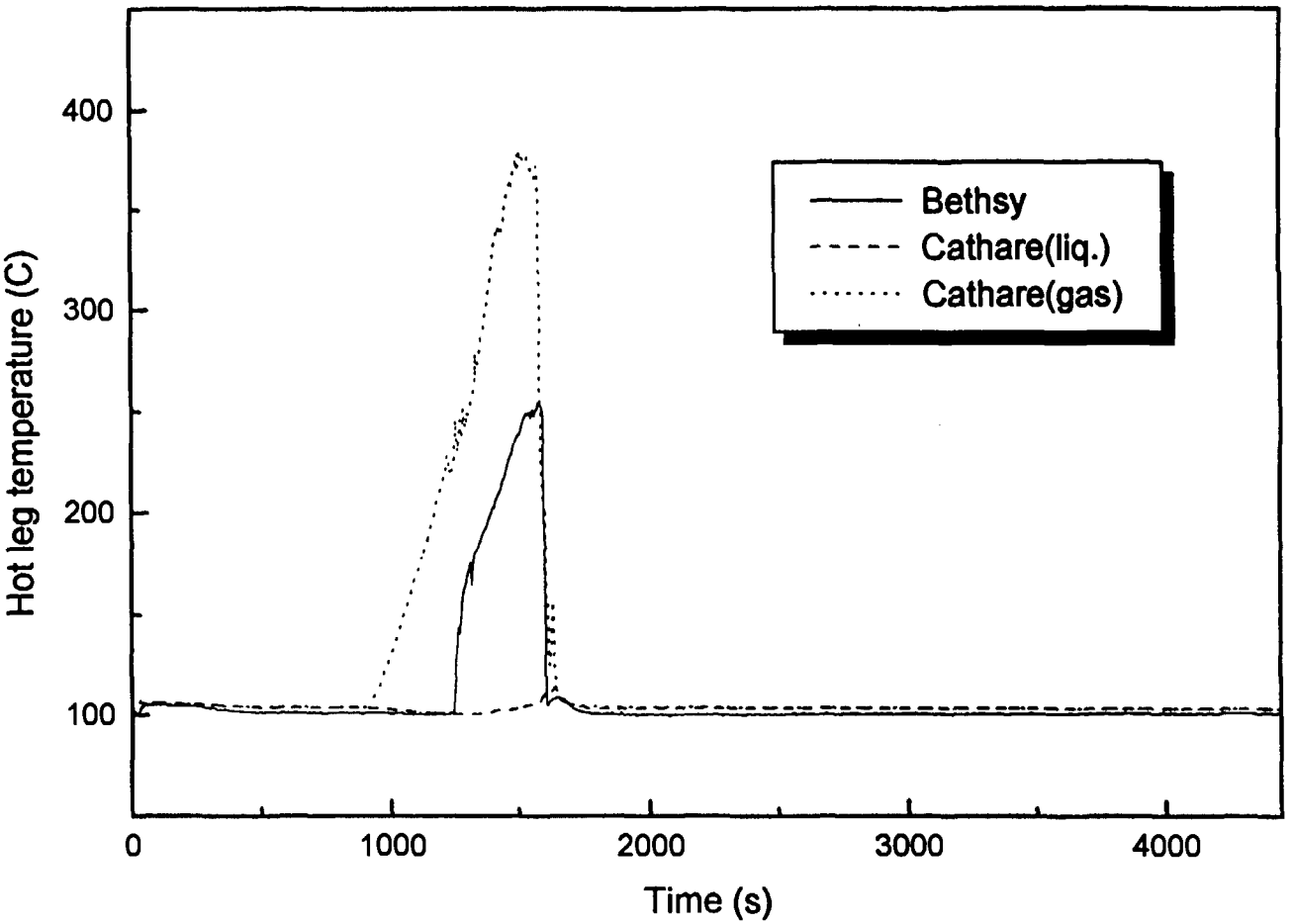

그림 26. Hot leg temperature (Loop 1)

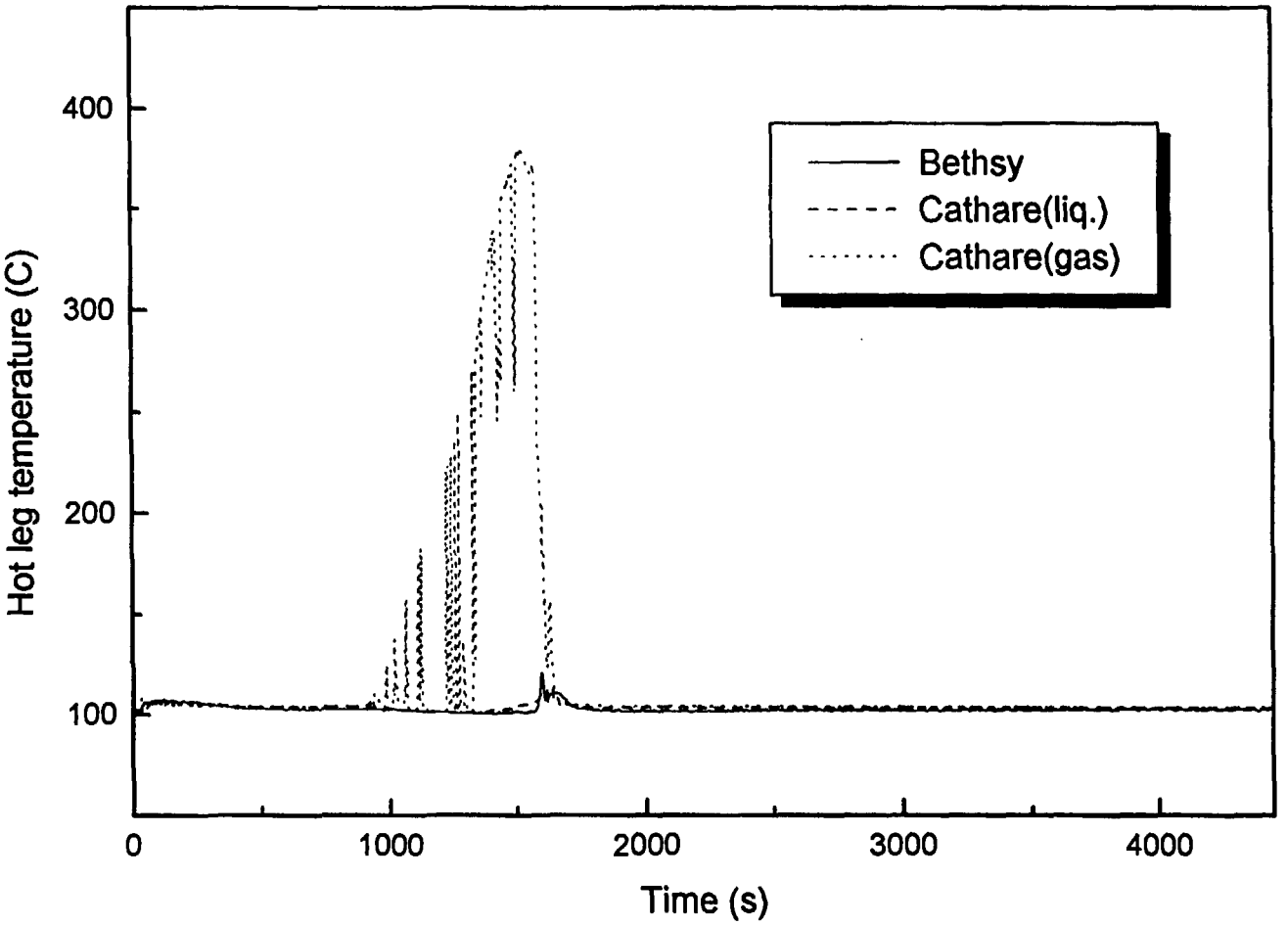

그림 27. Hot leg temperature (Loop 2)

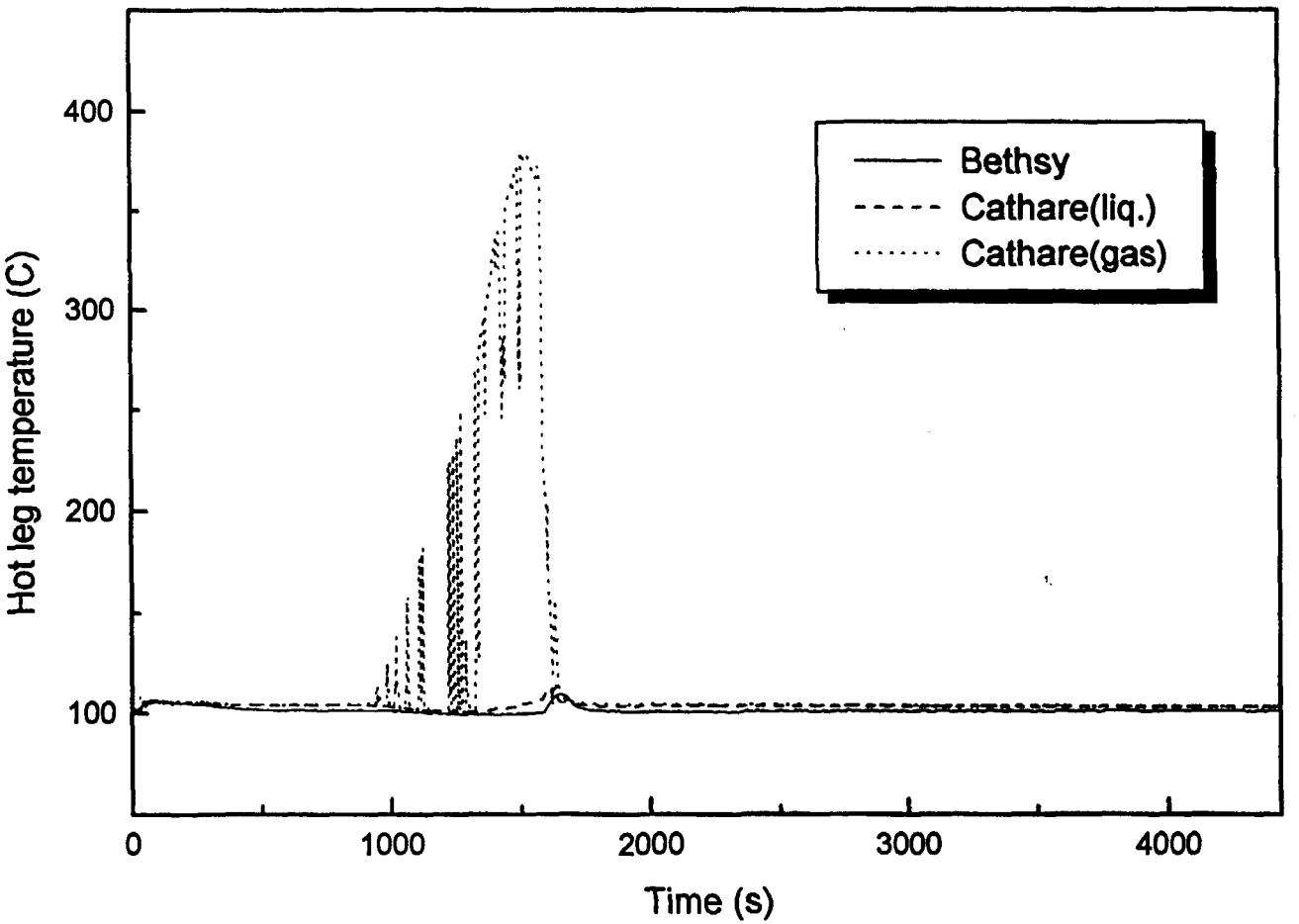

그림 28. Hot leg temperature (Loop 3)

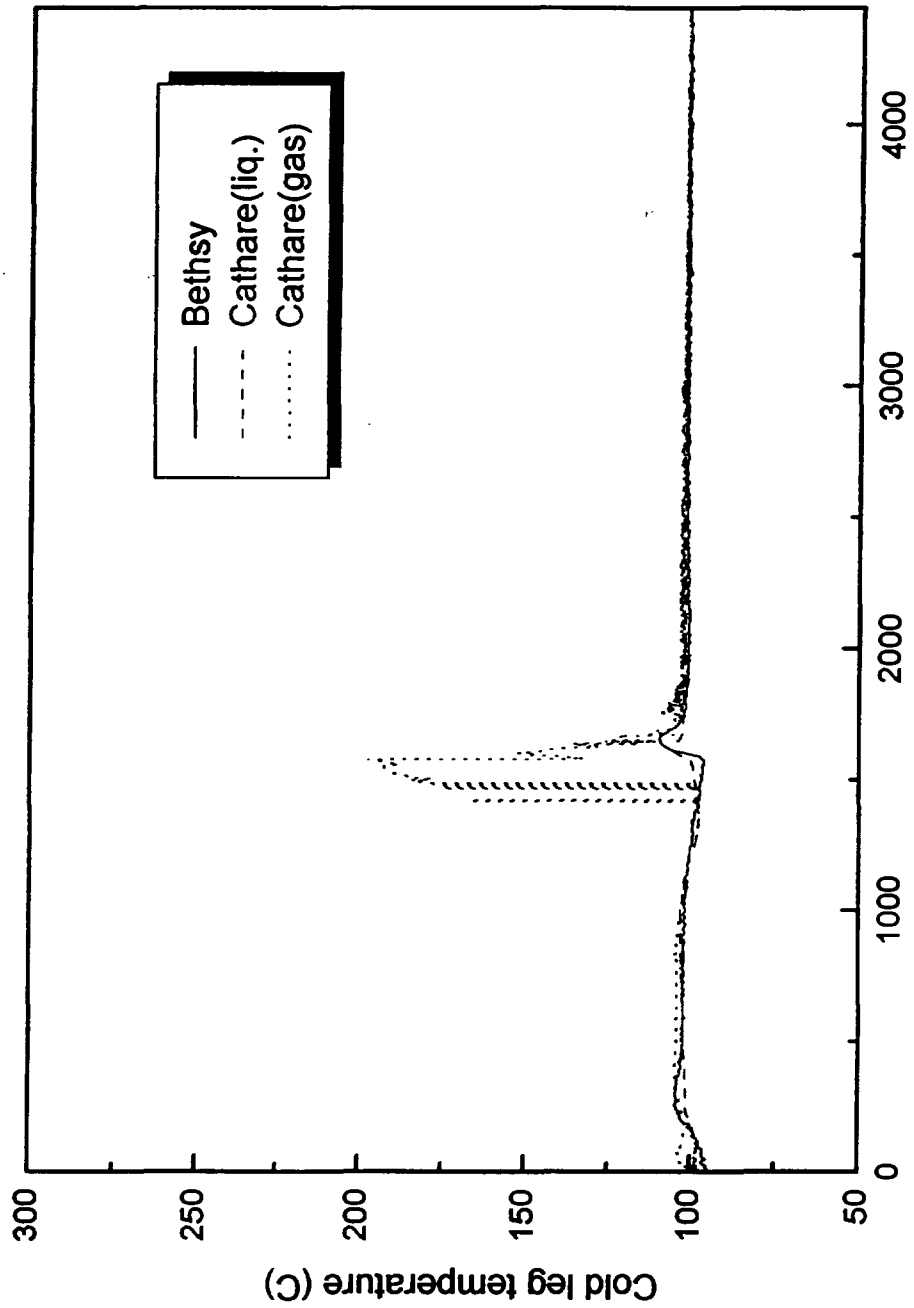

그림 29. Cold leg temperature (Loop 1)

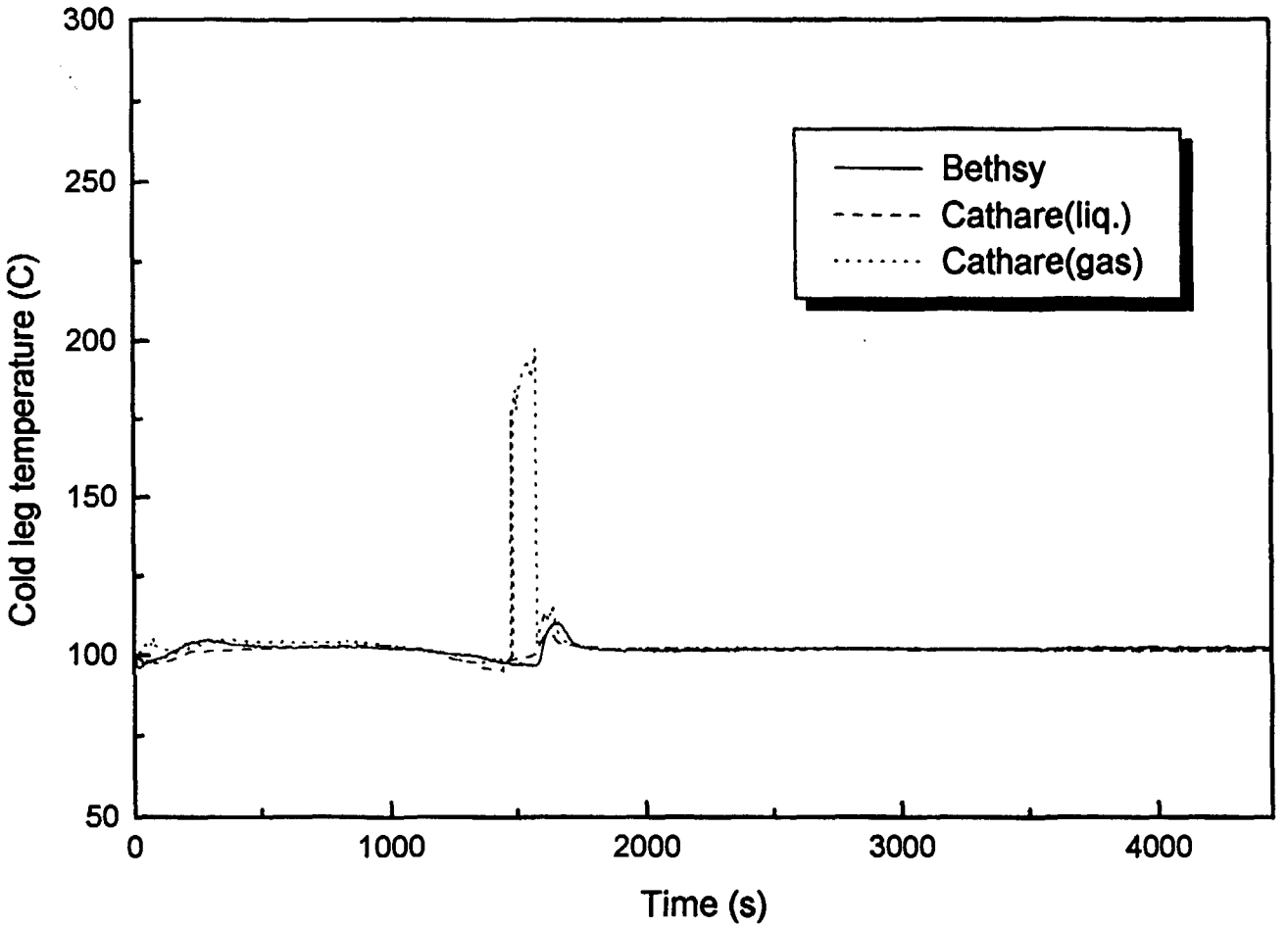

그림 30. Cold leg temperature (Loop 2)

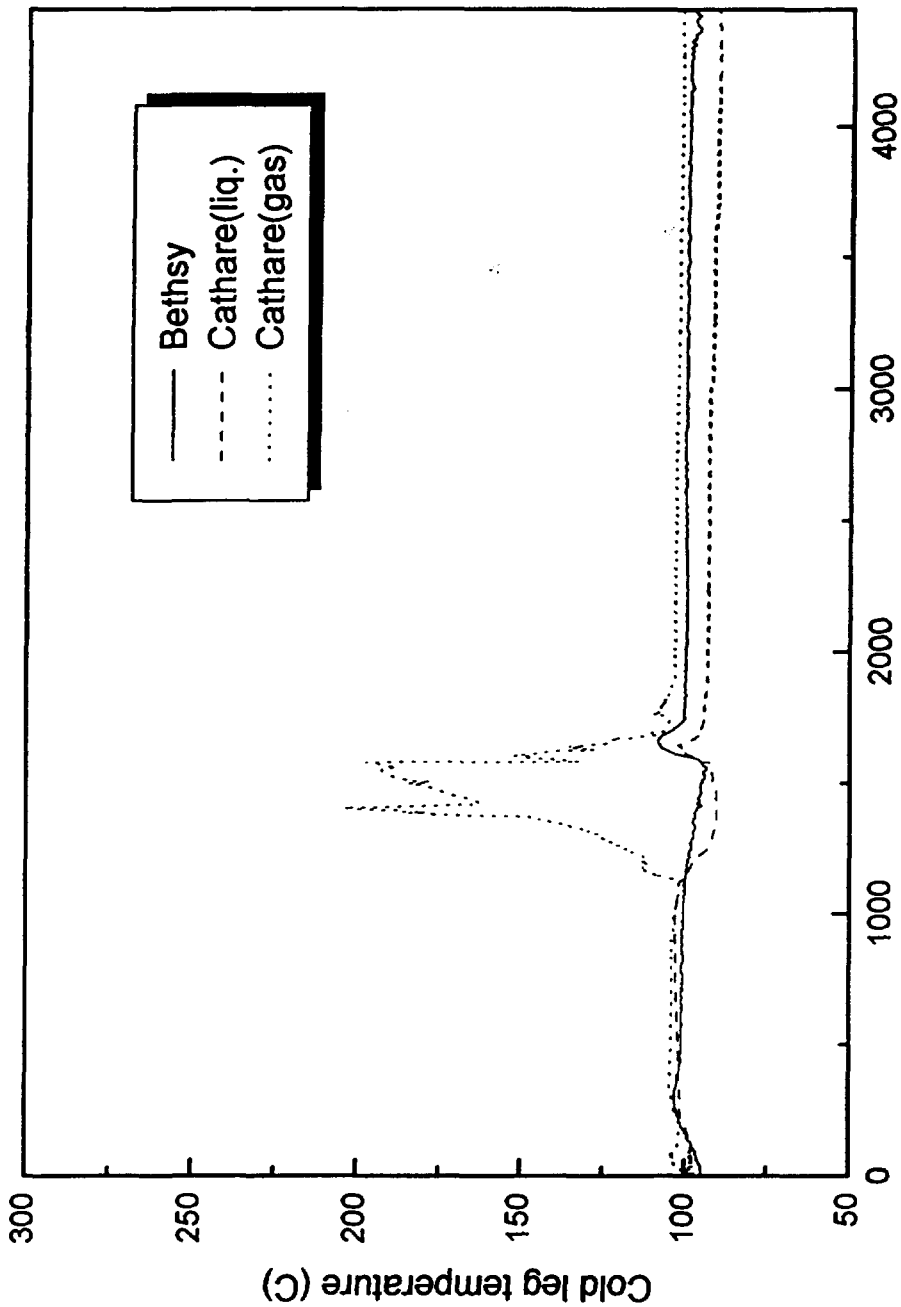

그림 31. Cold leg temperature (Loop 3)

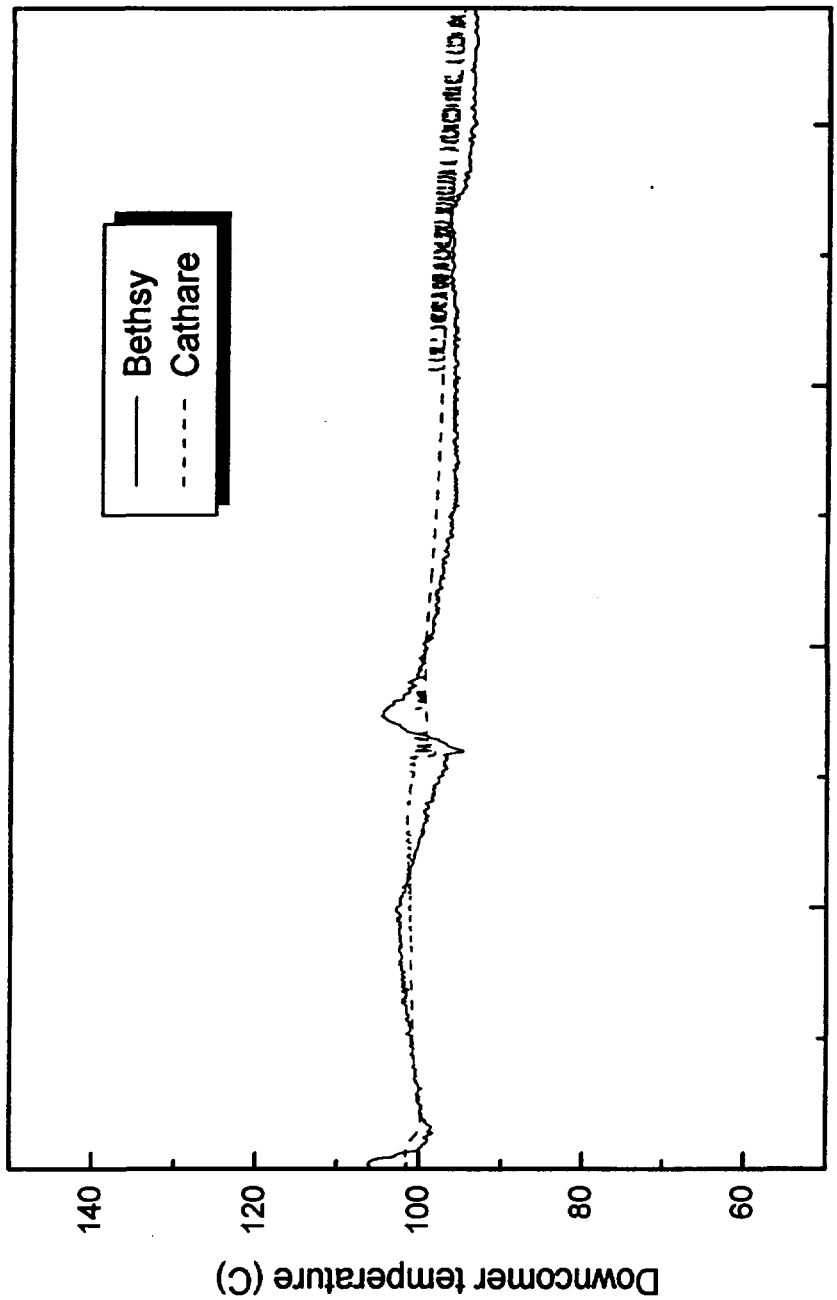

그림 32. Downcomer temperature

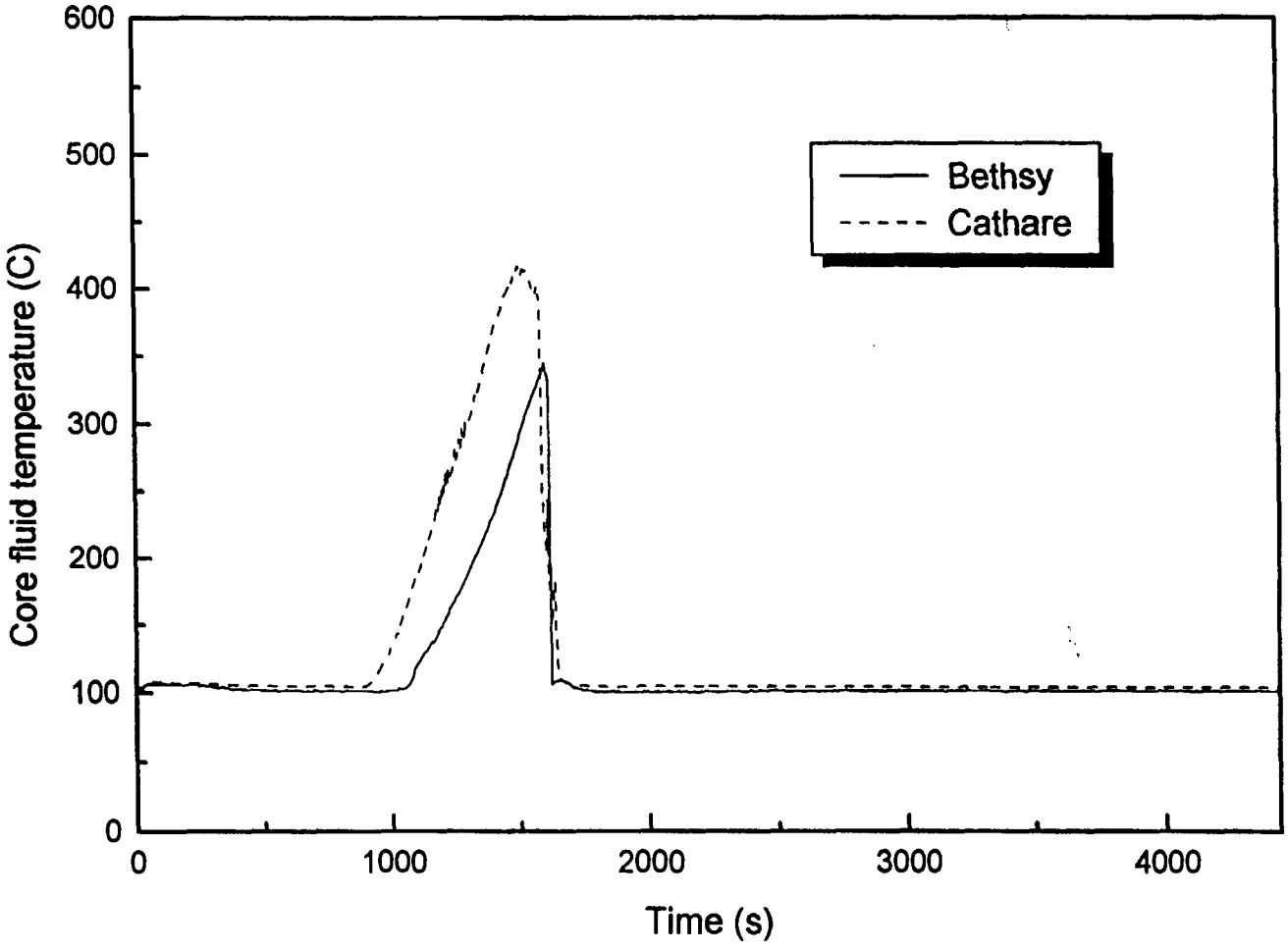

그림 33. Core fluid temperature

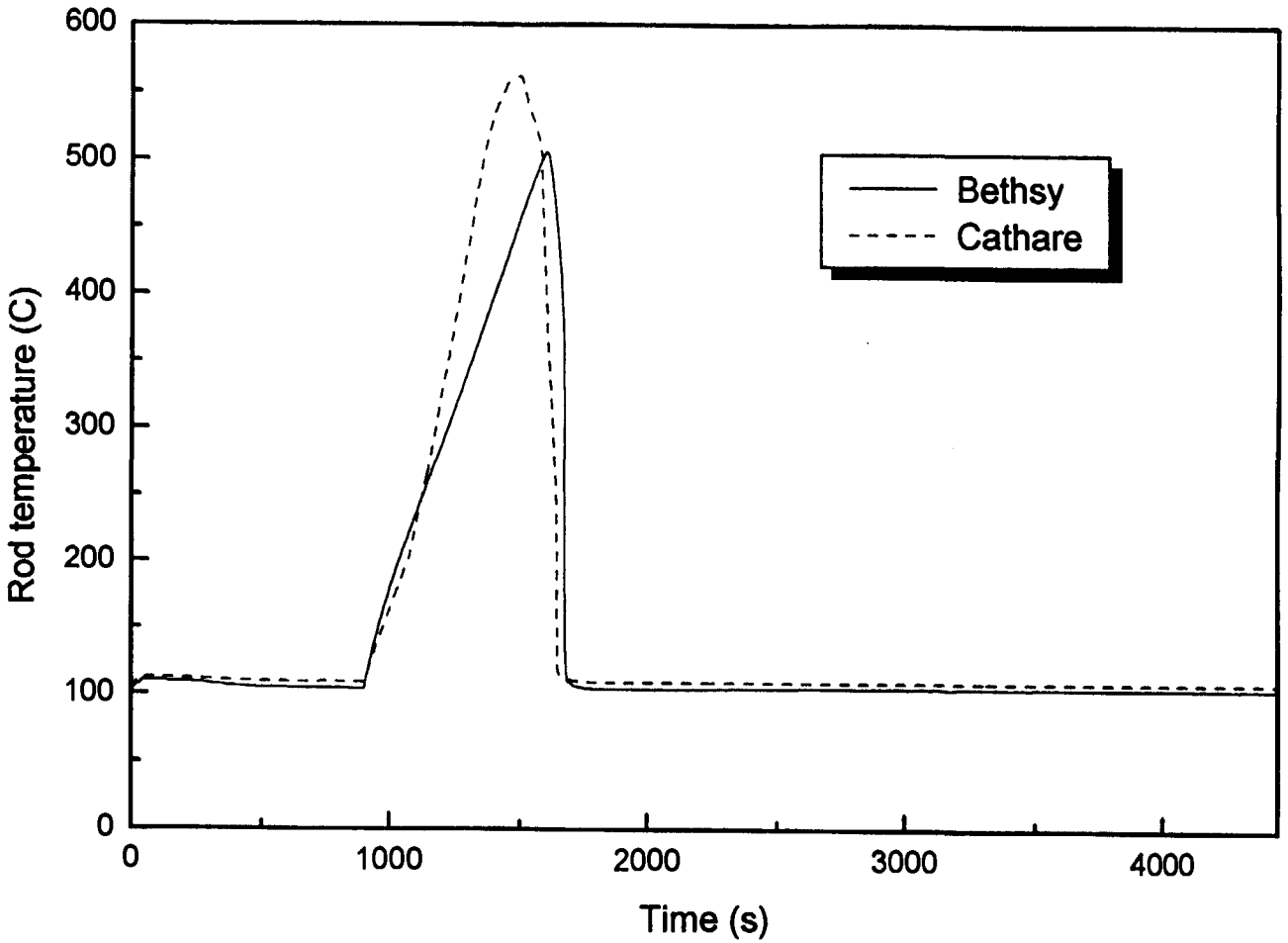

그림 34. Rod temperature

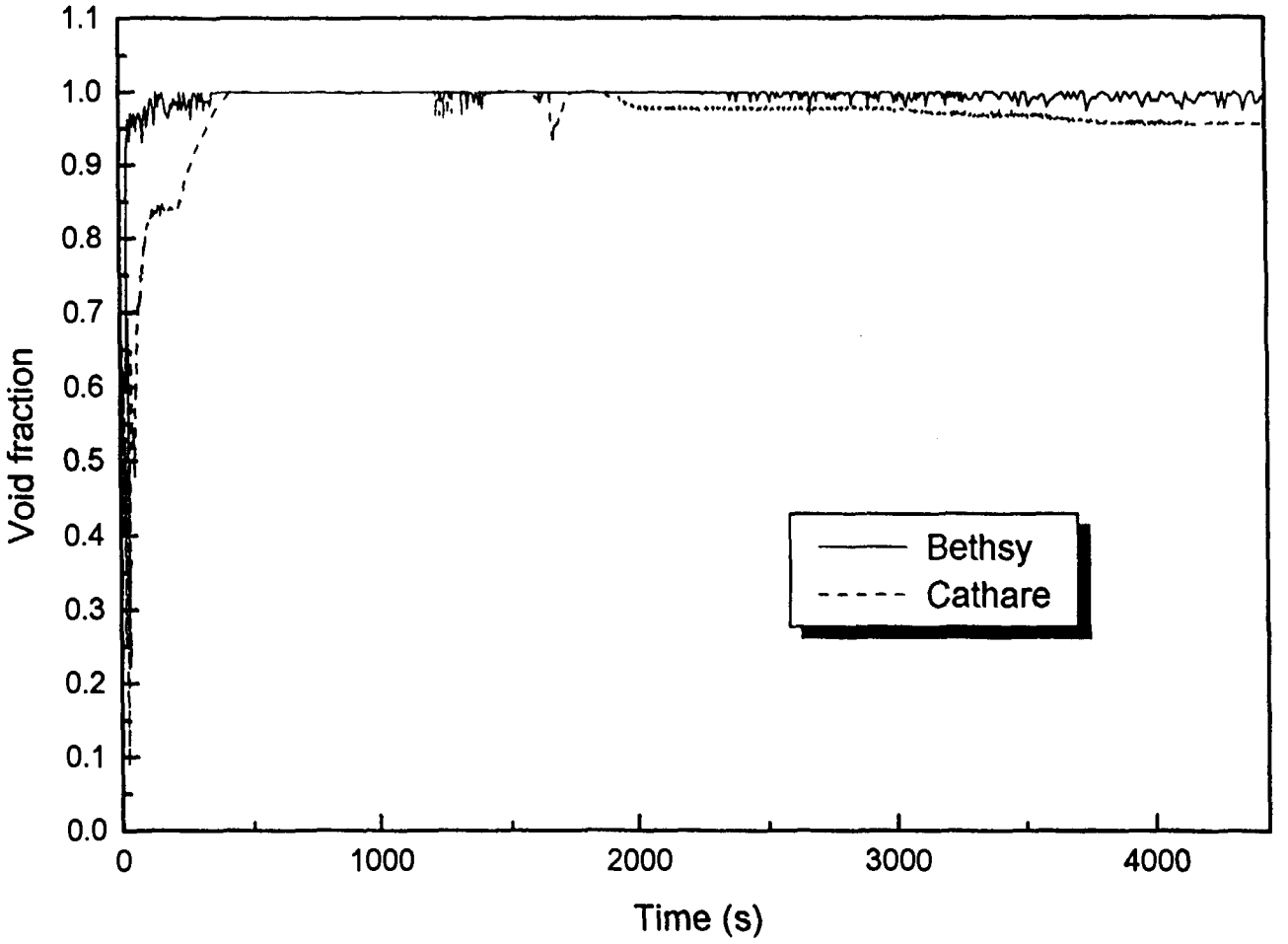

그림 35. Void fraction in hot leg 1

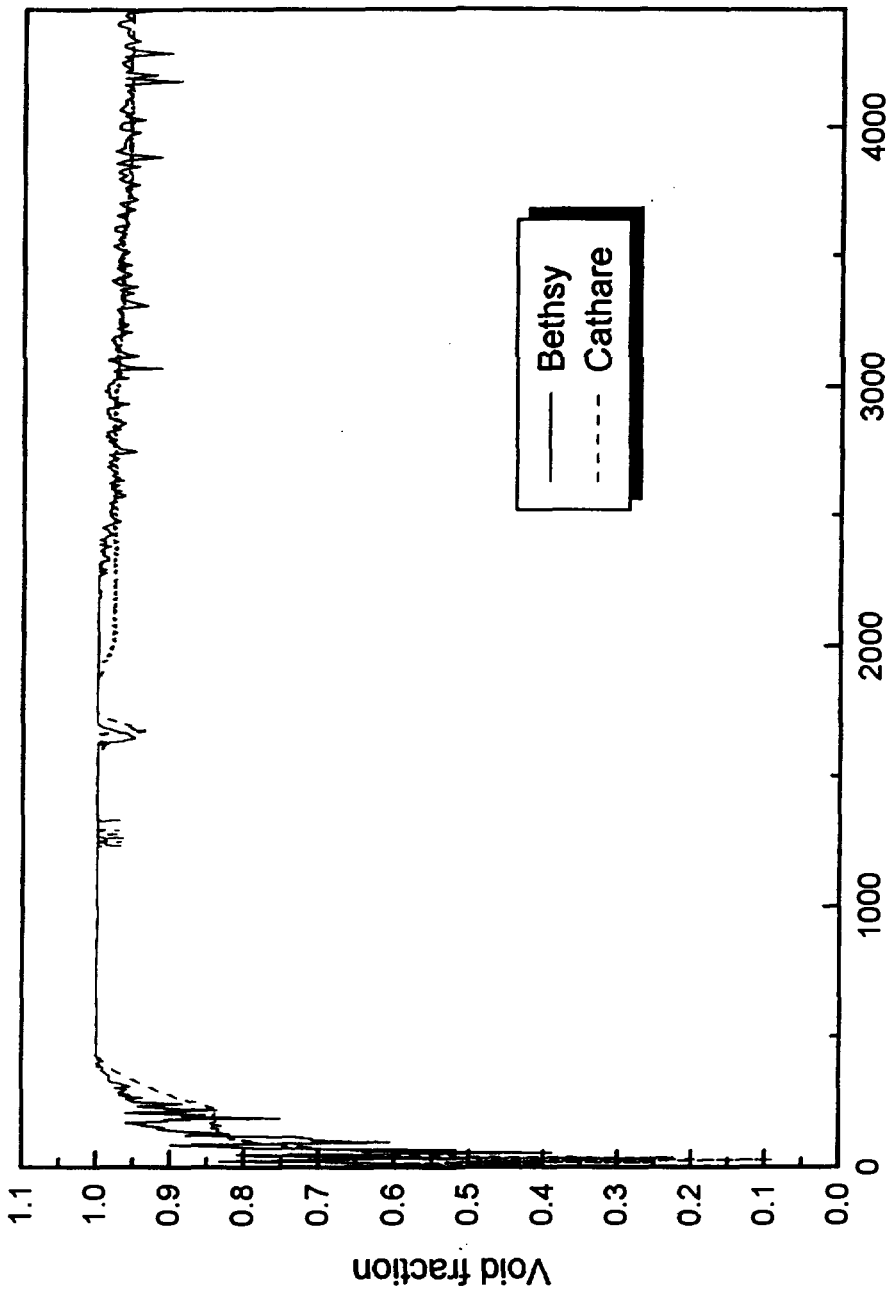

그림 36. Void fraction in hot leg 2

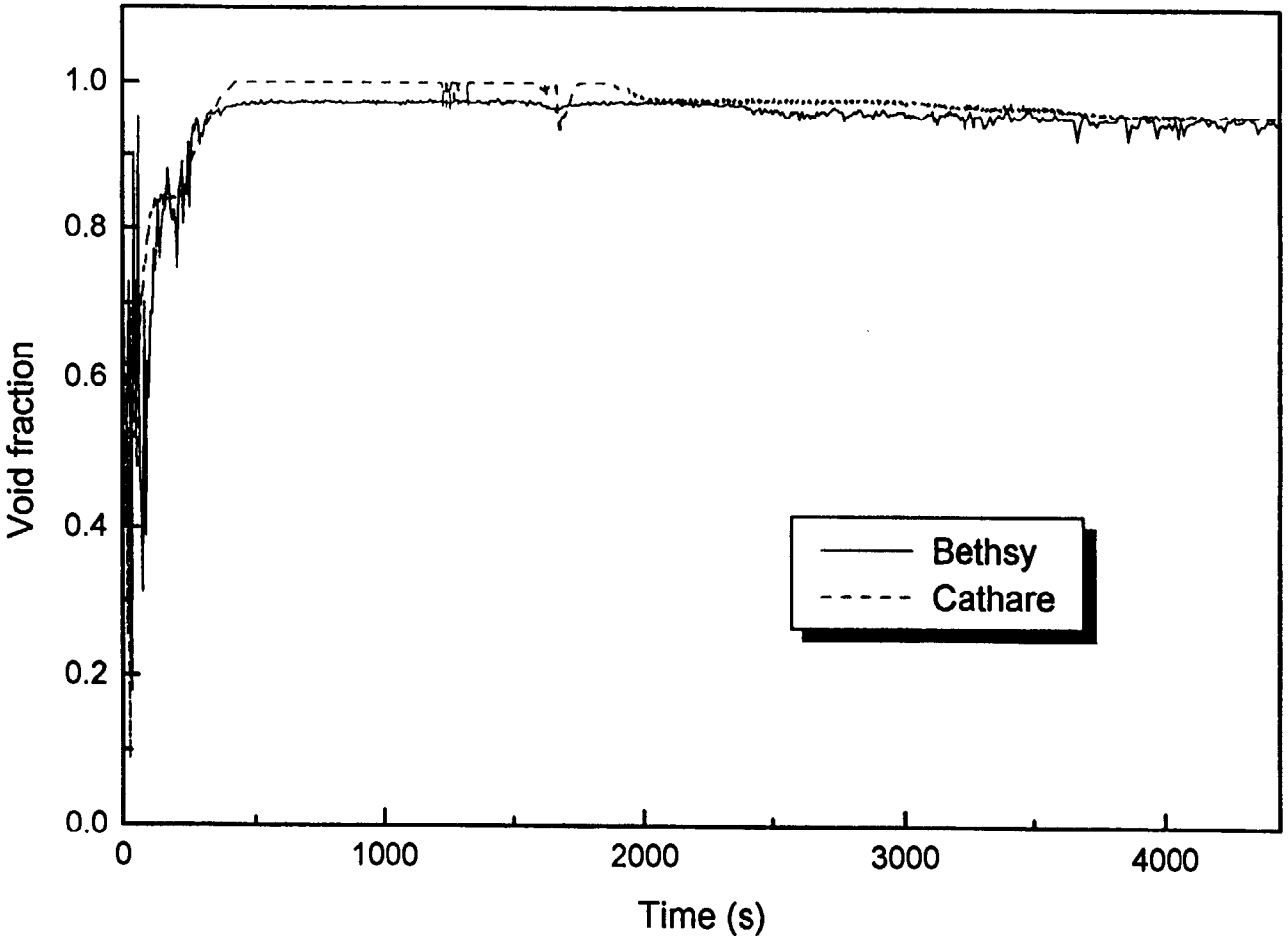

그림 37. Void fraction in hot leg 3

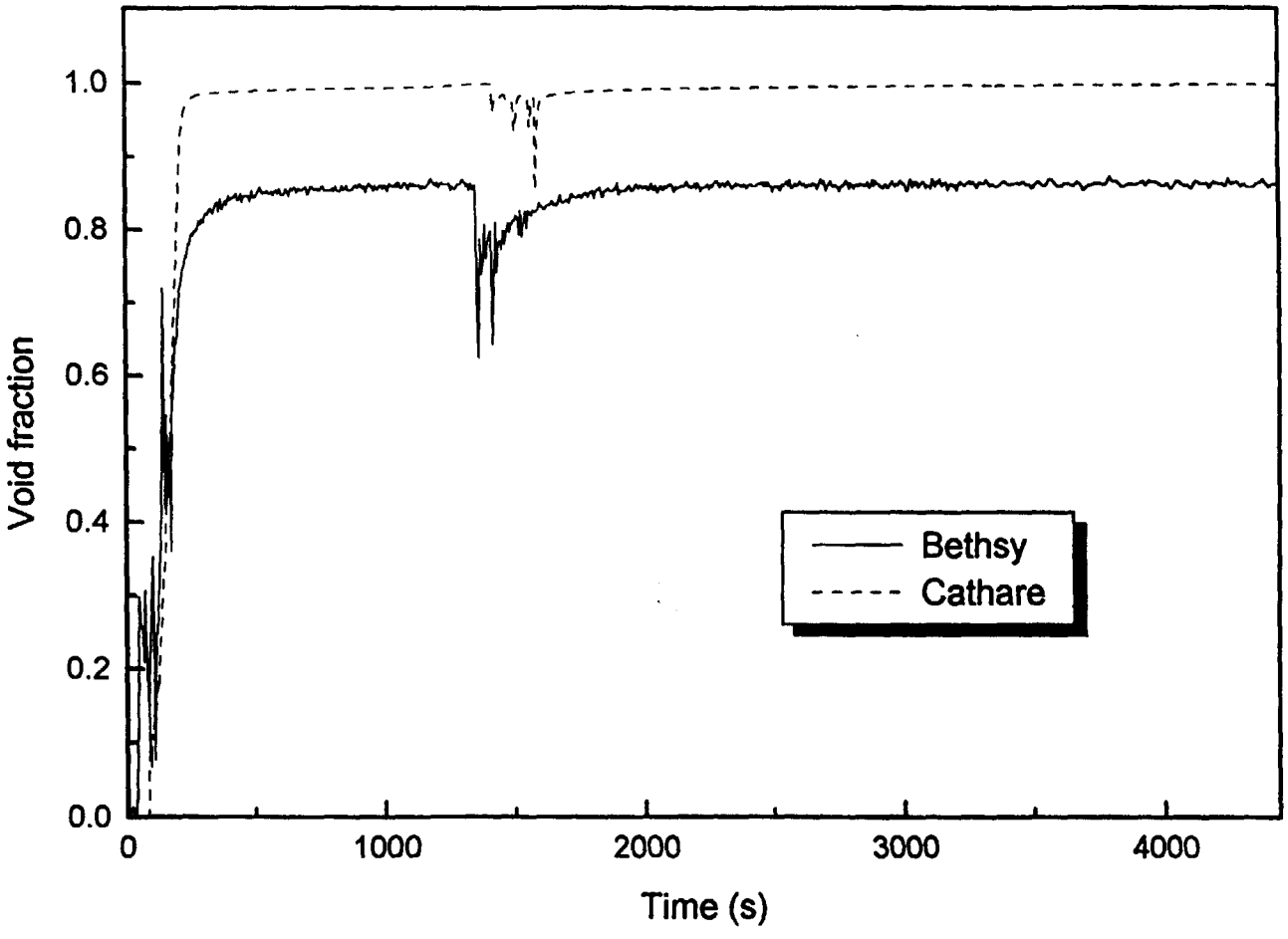

그림 38. Void fraction in cold leg 1

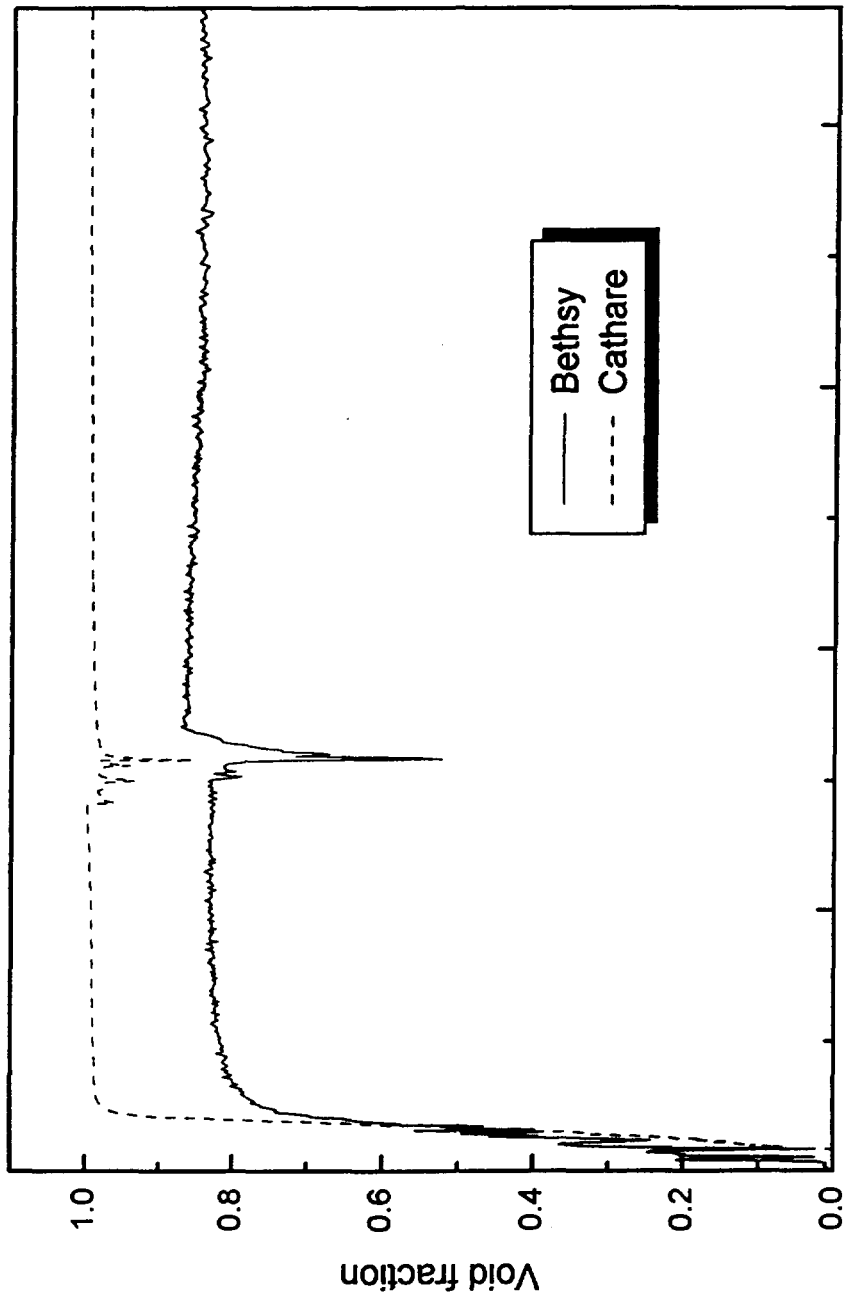

그림 39. Void fraction in cold leg 2

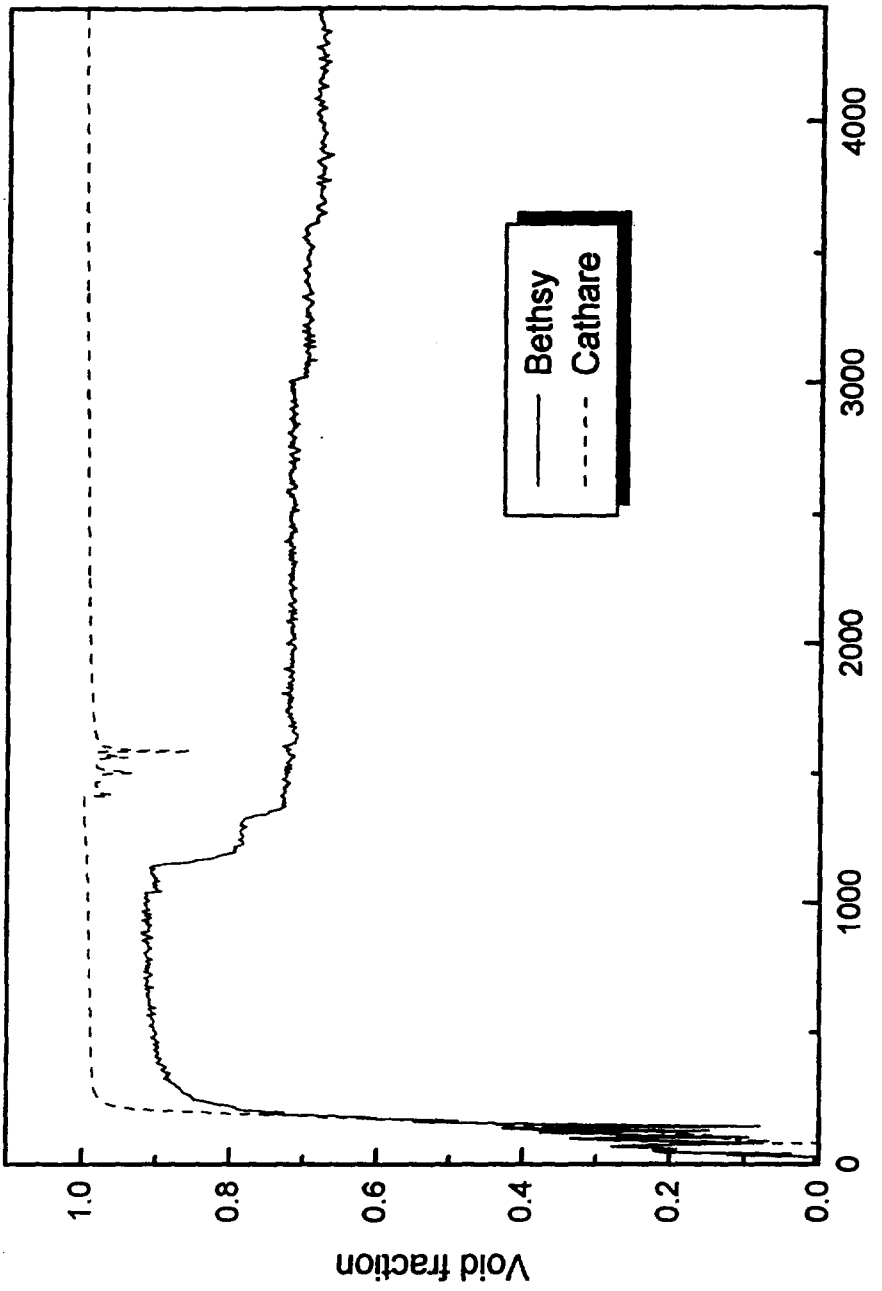

그림 40. Void fraction in cold leg 3

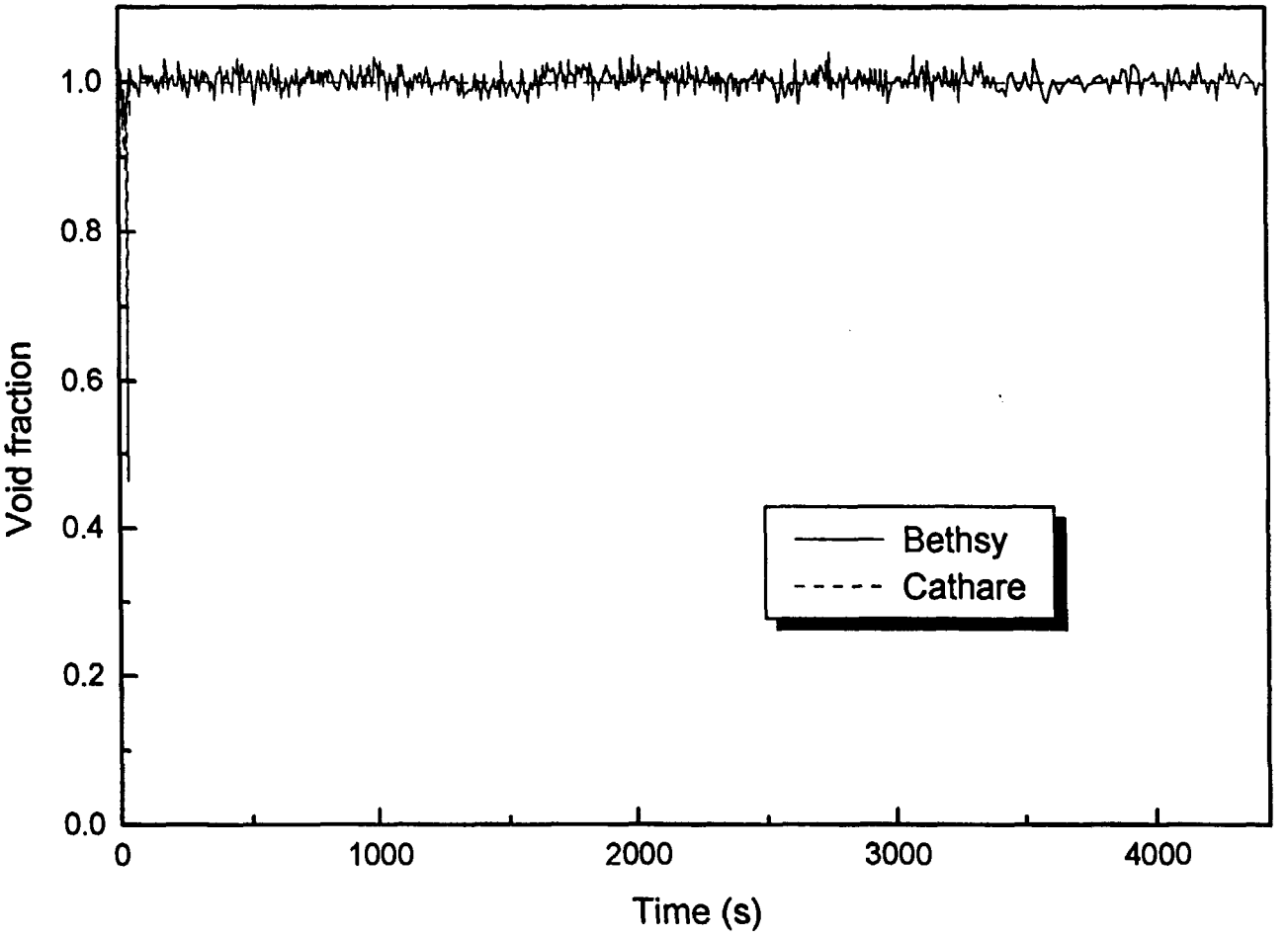

그림 41. Void fraction in surge line

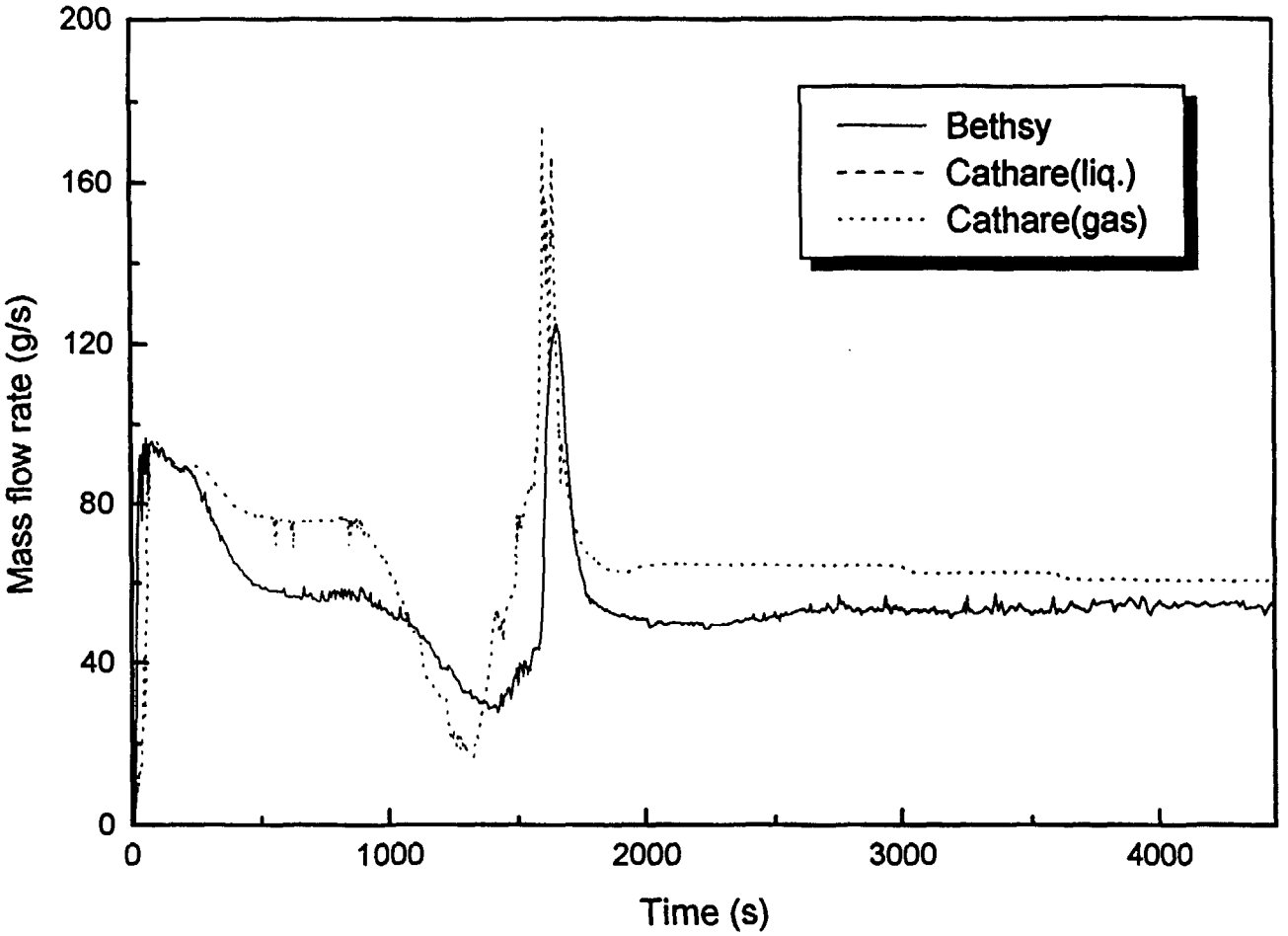

그림 42. Pressurizer manway mass flowrate

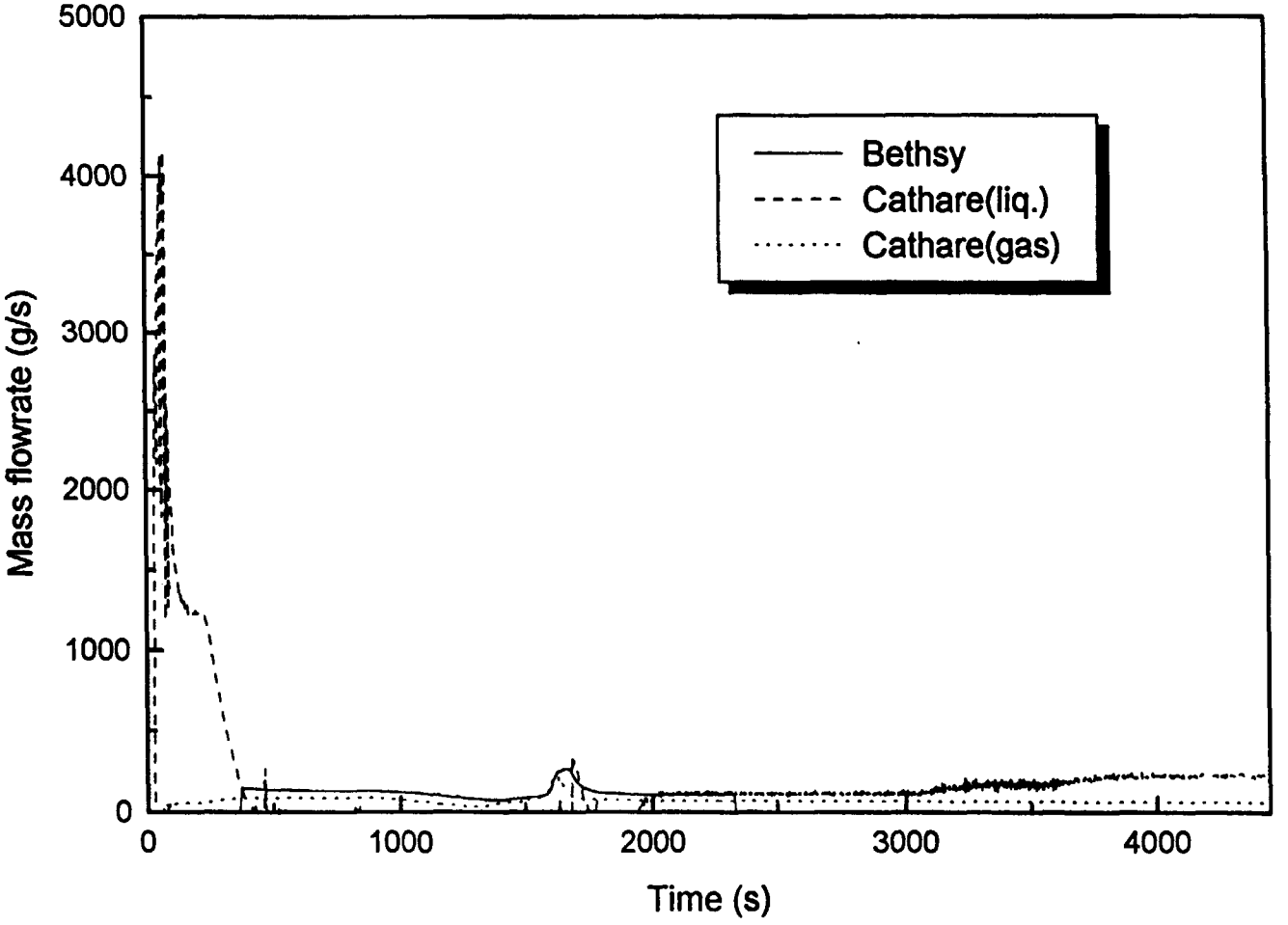

그림 43. SG manway mass flowrate

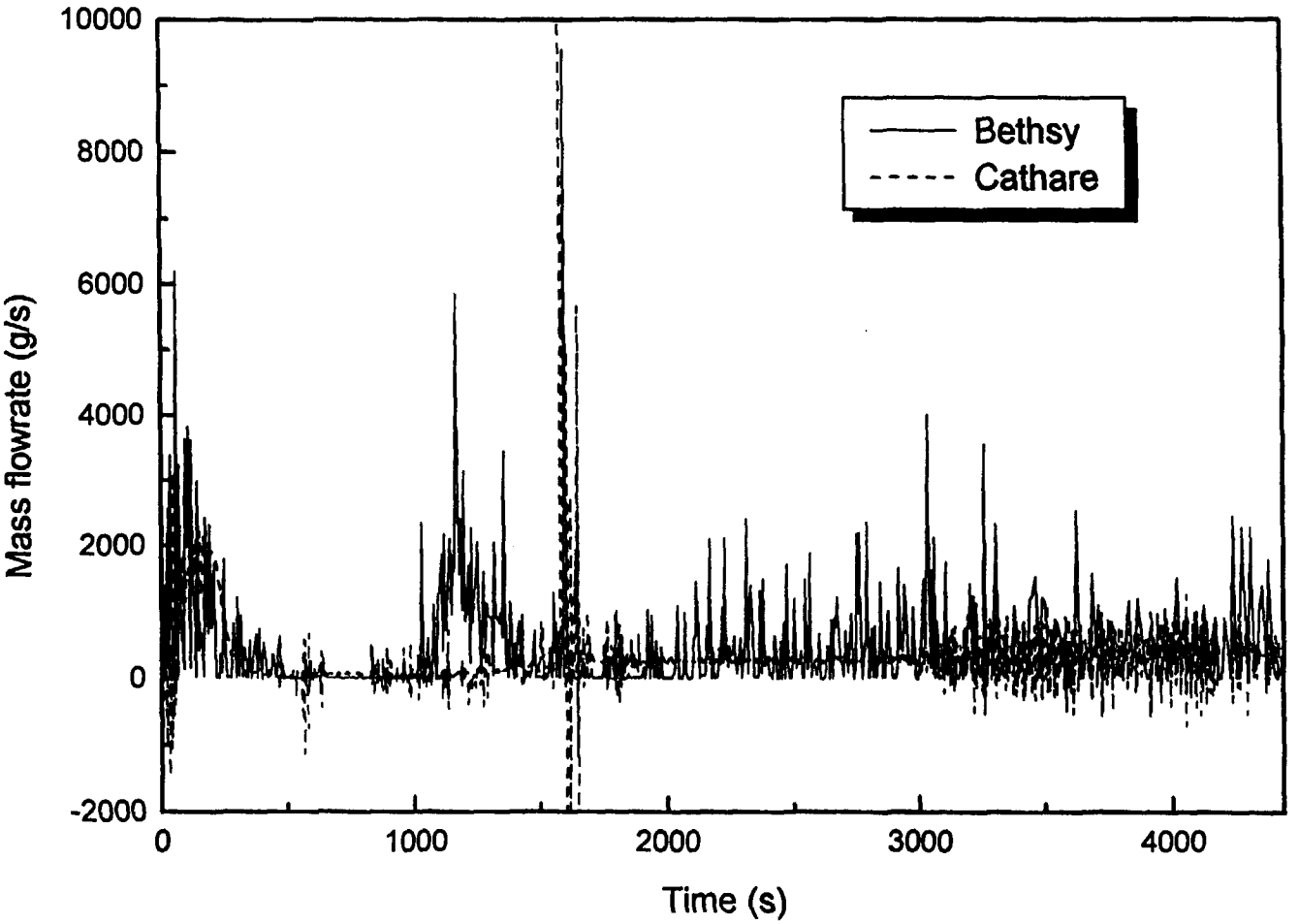

그림 44. Downcomer mass flowrate

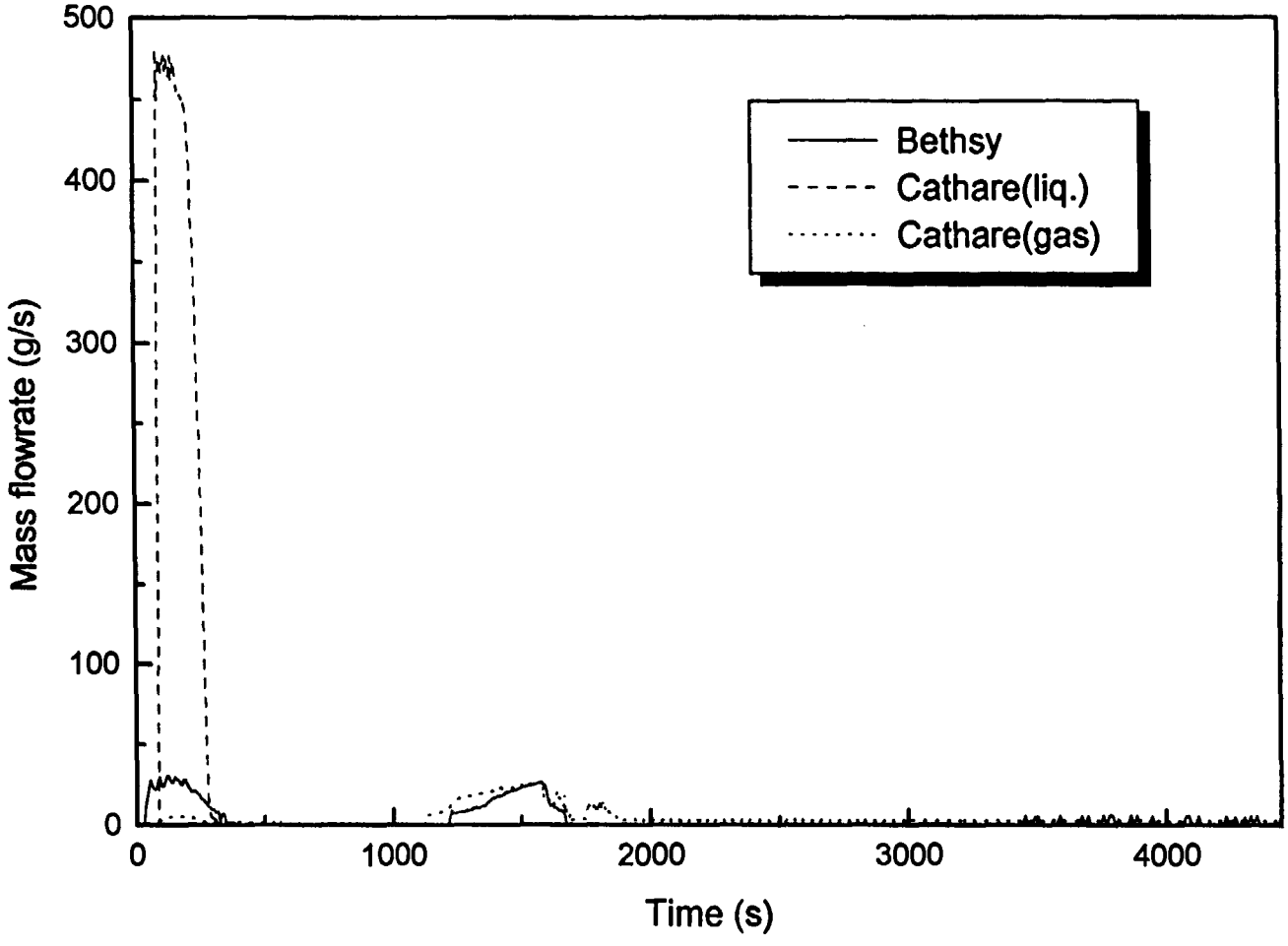

그림 45. Upper head bypass mass flowrate

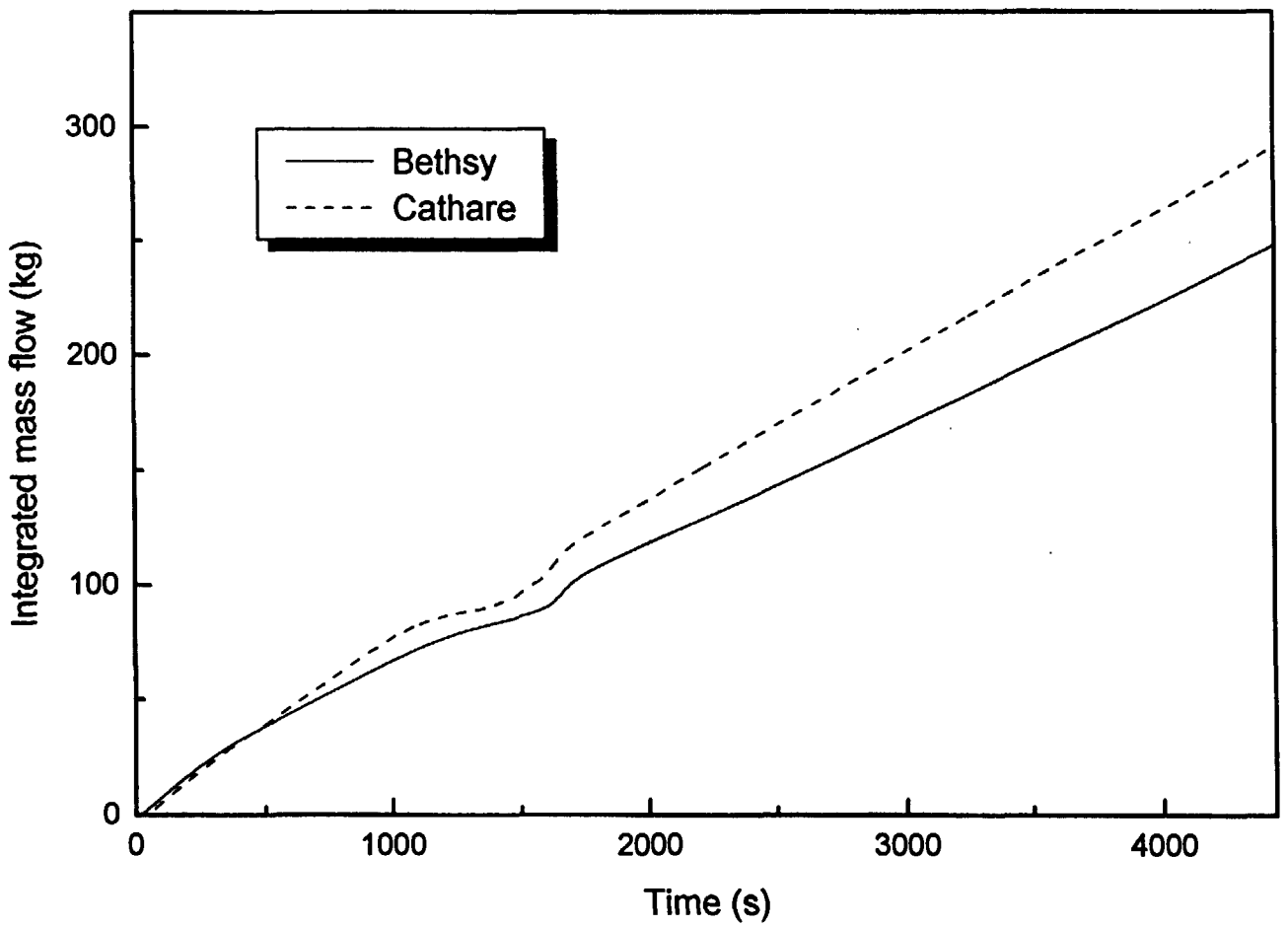

그림 46. Integrated mass flow through pressurizer manway

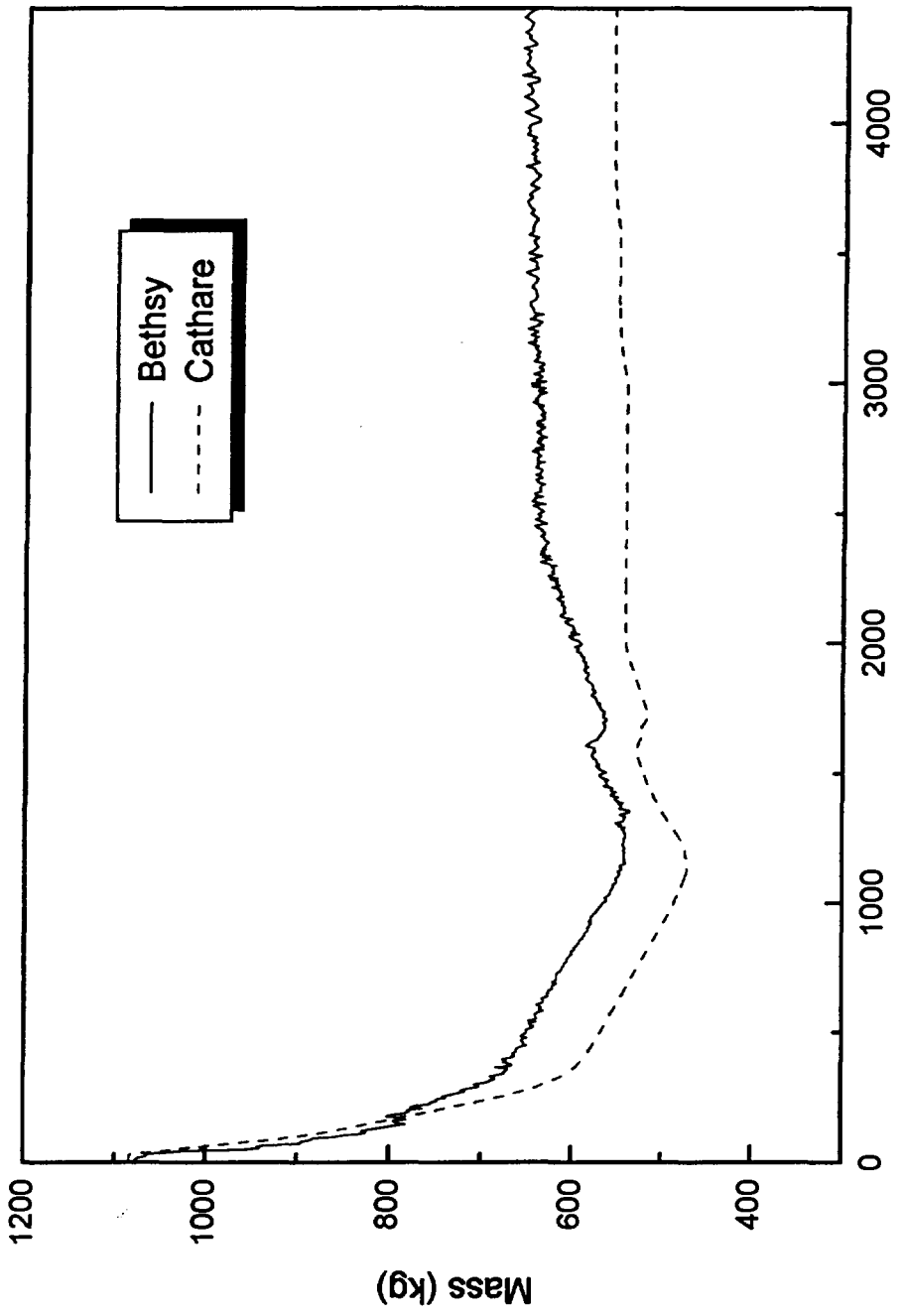

그림 47. Total mass in RCS

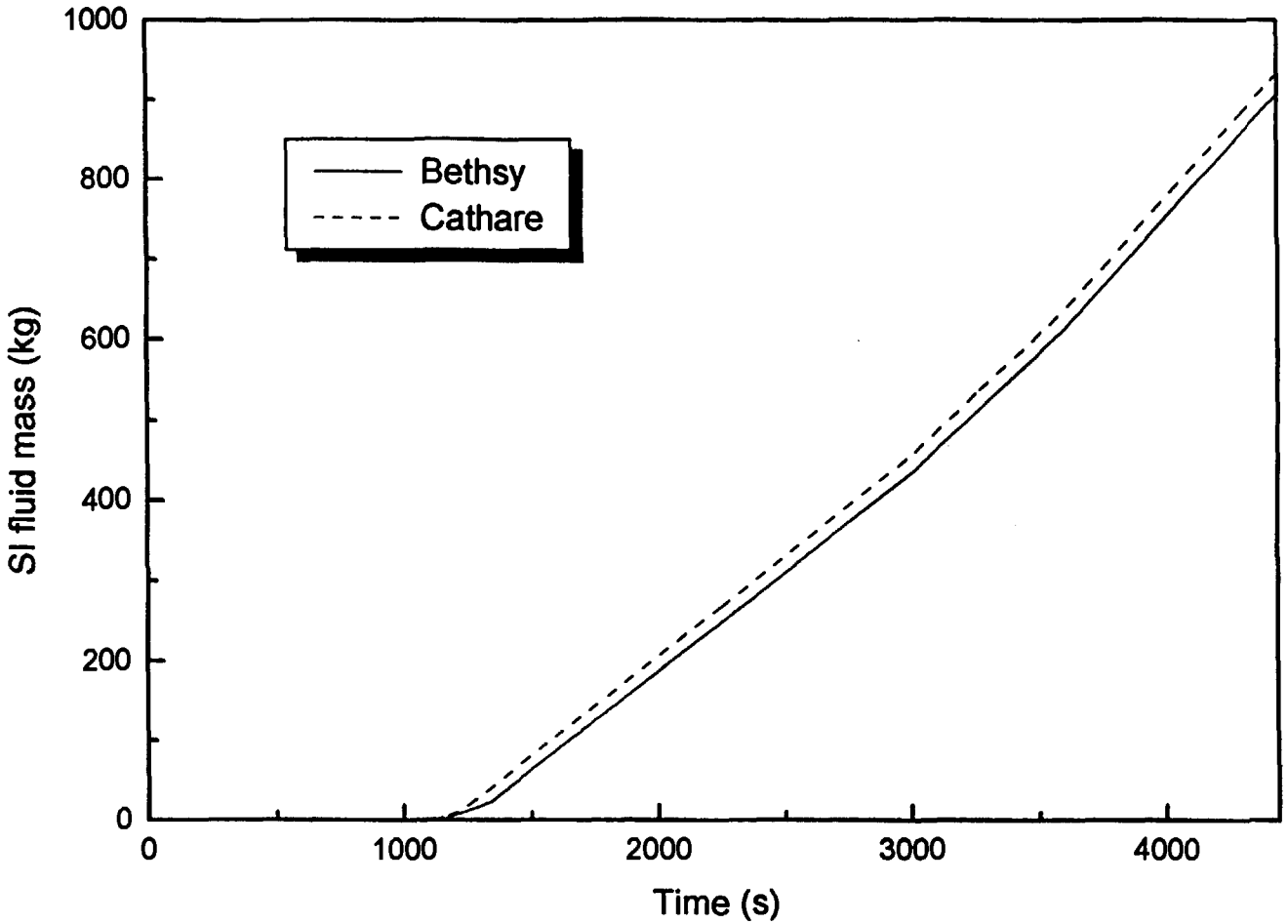

그림 48. Integrated SI fluid mass flow

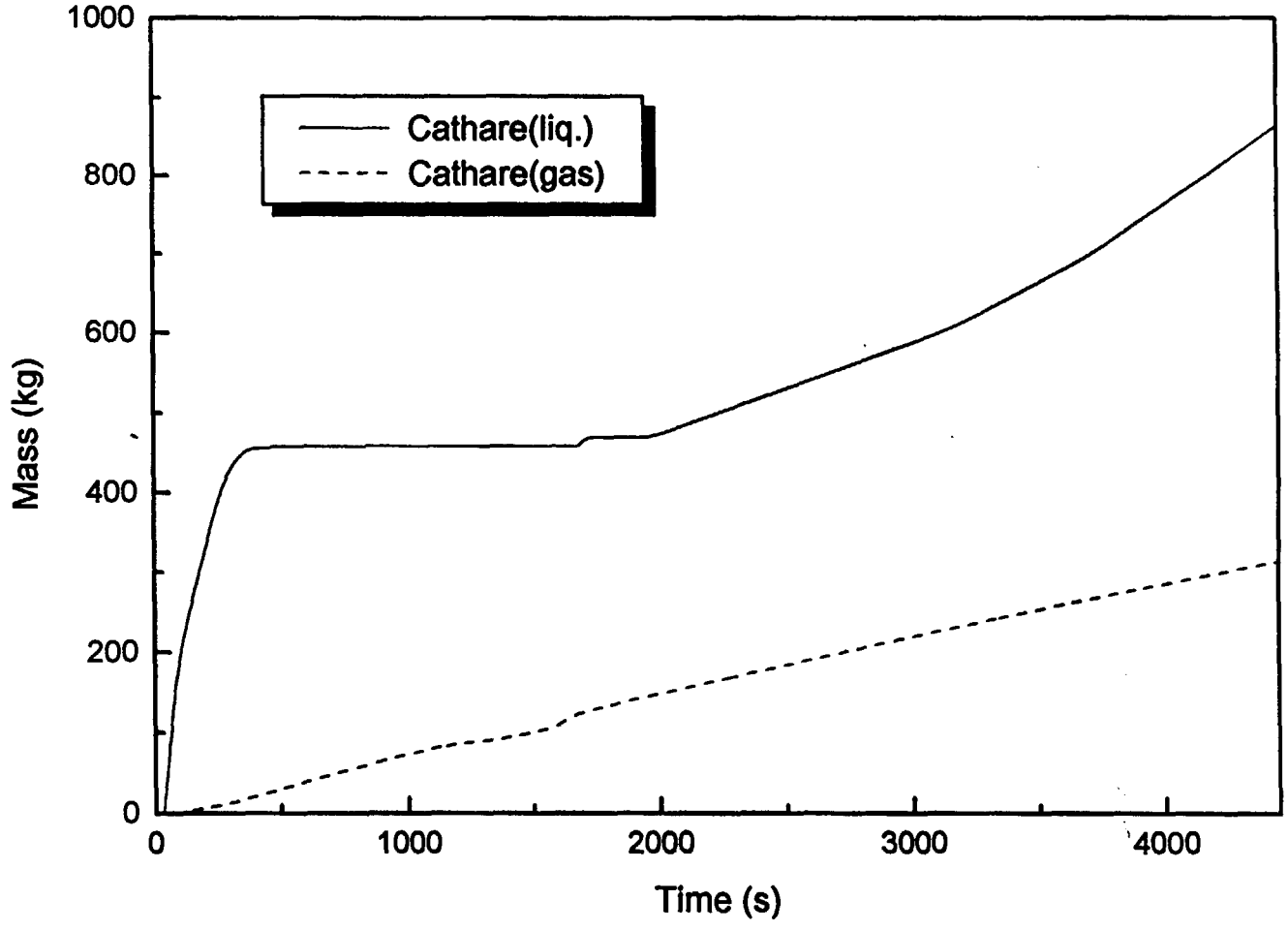

그림 49. Integrated mass flow through SG manway

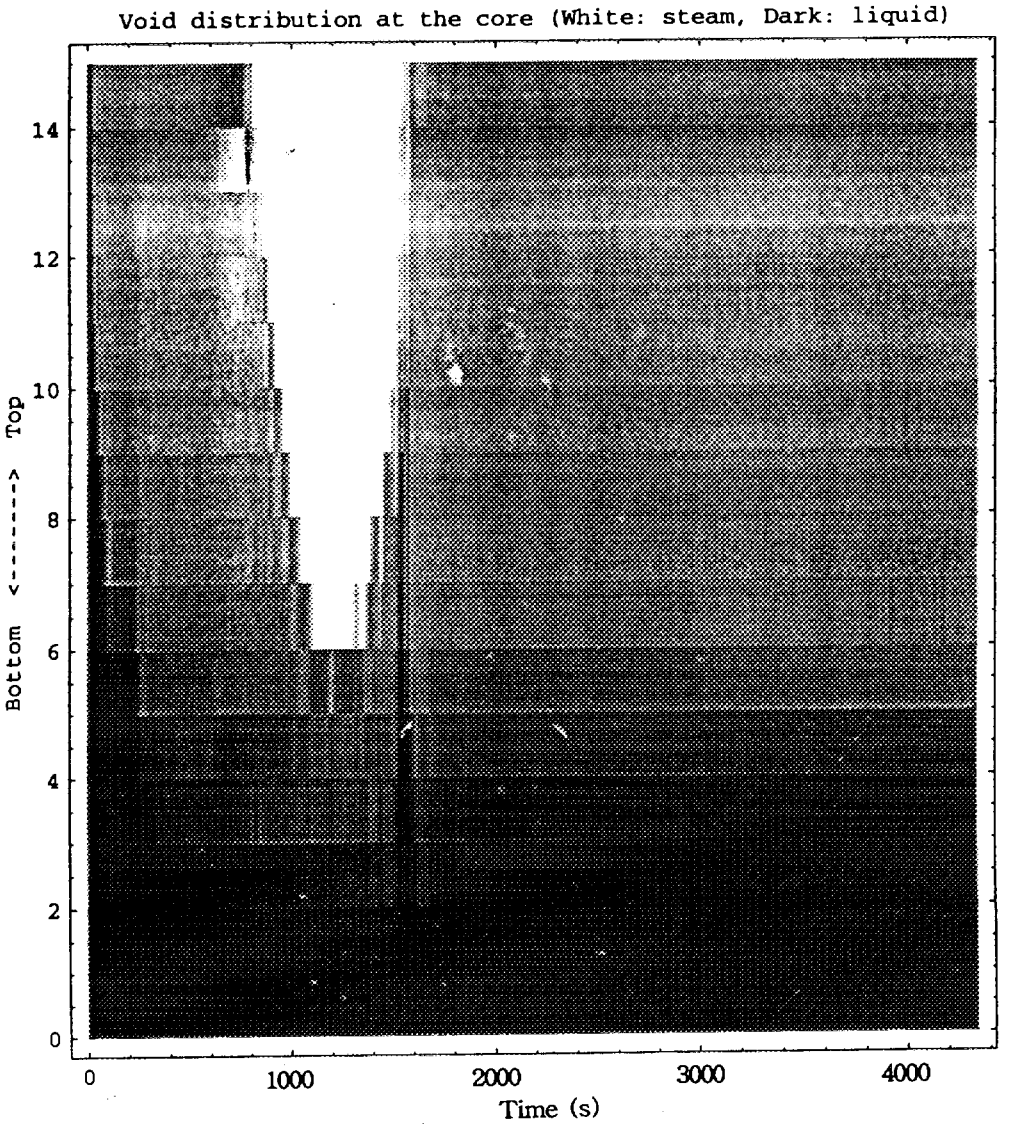

그림 50. Void distribution in the core

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-863/97			

제목/부제	Midloop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통내 방출유로가 있는 경우 중력주입을 이용한 사고완화에 관한 연구
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	김원석 (냉각재 상실사고 및 정지시 RHR 상실사고 해석모델개발 분야)
연 구 자 및 부 서 명	장원표 (냉각재 상실사고 및 정지시 RHR 상실사고 해석모델개발 분야)

출 판 지		발행기관	한국원자력연구소	발행년	1997. 6
페 이 지	81 p.	도 표	있음(v), 없음( )	크 기	26 Cm.
참고사항	'96 냉각재 상실사고 및 정지시 RHR 상실사고 해석모델 개발 과제				

비밀여부	공개(v), 대외비( ), __ 급비밀	보고서종류	기술 보고서
연구위탁기관		계약 번호	

초록 (15-20줄내외)

Mid-loop 운전중 잔열제거 기능 상실사고시 계통내 가압기 및 증기발생기 Manway가 열려있는 경우를 실험한 불란서 대형 실험 Bethsy 6.9b에 대해 CATHARE2 코드를 사용하여 모의 분석하였다. 본 연구의 목적은 이러한 사고 발생시 계통내 열수력 현상 이해 및 CATHARE2 코드의 예측 능력을 평가하는데 있다. 이 때 노심잔열은 정격출력의 1.3%인 370kW이며, 이차측은 3 Loop 모두 공기로 가득 차 있어 열전달이 이루어지지 않는 것으로 가정하였다. 계산결과는 다음과 같다. 계통압력은 초기에 증기발생기 Manway를 통해 실험보다 많은 량이 빠져나가면서 실험에 비해 낮게 예측하였으나 이 후 1600초에 발생한 Loop Seal Clearing 시점 및 이로인한 압력변화는 실험을 잘 모의하고 있다. 노심노출은 실험이 848초에 계산은 830초에 발생하여 계산이 18초 빨리 발생하였으며, 노심 Rod 온도에 따라 주입되는 중력주입도 계산이 13초 이른 1120초에 주입이 시작되었다. 또한 이 실험에서 확연히 알 수 있듯이 중력주입만으로는 노심노출을 막을 수 없어 강제주입이 공급되었고 이로인해 결국 노심은 다시 재워질 수 있었다. 결론적으로 실험과 계산을 비교할 때 국부적으로 약간의 차이가 있으나 전반적인 경향이나 열수력 현상들은 대체적으로 잘 모의하고 있다.

주제명키워드 (10단어내외)	CATHARE, BETHSY, 노심노출, 중력주입, 부분충수, 잔열제거기능상실

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-863/97			

Title/ Subtitle	A study on the potential to delay core damage using gravity drain under loss of RHR during midloop operation with RCS opening
Project Manager and Department	Kim, won-seok (Improvements on models associated with LOCA and loss of RHR accident during shutdown)
Researcher and Department	Chang, won-pyo (Improvements on models associated with LOCA and loss of RHR accident during shutdown)

Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1997, 6
Page	81 p.	Ill. & Tab.	Yes(v), No ( )	Size	26 Cm.
Note	'96 Improvements on models associated with LOCA and loss of RHR accident during shutdown project				
Classified	Open(v), Restricted( ), ___ Class Document			Report Type	Technical report
Sponsoring Org.				Contract No.	

Abstract (15-20 Lines)

The present study is to analyze an integral test, Bethsy test 6.9b, which represents loss of RHRS accident during mid-loop operation with pressurizer and SG inlet manway open using the best estimate code CATHARE2. The main purposes are to gain insights into the physical phenomena involved and to assess the capability of CATHARE2 prediction. In this work the following assumptions are used. The core power was maintained at a constant level at 1.3% of nominal power(370kW) throughout the transient. None of the three steam generators were used as heat sink for this test since they were full of air and isolated. Most of important physical phenomena in the experiment could be predicted by the CATHARE2 code. The pressure in the upper plenum is predicted lower until 300s after loss of RHR, because the SG manway flowrate is more than Bethsy at this time. But the time for loop seal clearing and pressure incresing were predicted well. The times of gravity and forced injections are calculated earlier by 13sec and 100sec. The core uncovery time in CATHARE2 calculation is estimated at 830sec, which is earlier by 18sec compared with 848sec in experiment. It is demonstrated that not only gravity drain but forced feed injection is required to prevent the core ucovery. Although some disagreements are found in the detailed phenomena, the code predicted reasonably well for the overall system behaviors.

Subject Keywords (About 10 words)	CATHARE, RELAP, core uncovery, gravity drain, midloop, loss of RHR