

고온고압 열수력 실험장치 피동잔열제거시스템의 열전달 특성 및 자연순환 성능에
관한 실험적 연구

Experimental Studies on Heat Transfer Characteristics and Natural
Circulation Performance of PRHRS of the High Temperature and High
Pressure Thermal-Hydraulic Test Facility

박현식, 최기용, 조석, 박준경, 이성재, 송철화, 정문기

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

고온고압 열수력 실험장치 피동잔열제거시스템(PRHRS)의 열전달 특성 및 자연순환에 대한 실험이 수행되었다. 특히 PRHRS의 자연순환 성능, PRHRS 열교환기와 비상냉각탱크 내부에서의 열전달 및 일차계통 내부의 열수력적 거동이 상세히 고찰되었다. 증기발생기 이차측, 이차계통, 및 피동잔열제거시스템에 걸쳐 형성되는 자연순환회로에서 안정적인 자연순환이 형성되었다. PRHRS 열교환기와 비상냉각탱크 내부를 통한 열전달은 자연순환을 가능하게 할 만큼 충분하였다. 또한 실험 결과는 PRHRS의 작동에 의해 일차계통의 노심붕괴열이 충분히 제거되고 있음을 보여준다.

Abstract

Several experiments are performed to investigate the heat transfer characteristics and natural circulation performance of passive residual removal system (PRHRS) of the high temperature and high pressure thermal-hydraulic test facility. Especially the natural circulation performance of PRHRS, the heat transfer characteristics of PRHRS heat exchangers and emergency cooldown tank (ECT), and the thermal-hydraulic behavior of the primary loop are investigated in detail. The coolant flows steadily in the natural circulation loop which is composed of the steam generator (SG) primary side, the secondary system, and the PRHRS. The heat transfers through the PRHRS heat exchanger and ECT are sufficient enough to enable the natural circulation of the coolant. Also the experimental results show that the core decay heat are sufficiently removed with the operation of the PRHRS.

1. 서론

고온고압 열수력 실험장치[1, 2]는 SMART-P[3]를 기준원전으로 하며, 높이비가 1/1, 면

적비가 1/96, 체적비가 1/96인 열수력 종합효과 실험장치이며, 온도 및 압력은 SMART-P의 정상상태 및 과도사고 조건을 모의할 수 있도록 설계되었다. SMART-P에 대한 자세한 기술 사양 및 설계 기준은 참고문헌 [3-5]에 자세히 나타나 있다. 본 연구는 고온고압 열수력 실험장치 피동잔열제거계통(PRHRS, Passive Residual Heat Removal System)의 열전달 특성 및 자연순환 성능 실험에 관한 것이다. 피동잔열제거계통 실험은 각 출력에 따른 정상상태 운전을 수행한 후 노심 모의 히터의 전원 공급을 중단하고, 펌프를 정지시키면서 시작된다. 피동잔열제거계통이 작동되면 증기발생기 이차측, 이차계통의 증기배관 및 급수배관과 더불어 피동잔열제거계통은 자연순환 회로를 구성한다.

본 실험의 첫 번째 목표는 피동잔열제거계통의 자연순환 성능을 파악하기 위하여 순환회로 내부의 자연순환 및 압력강하 특성을 고찰하는 것이다. 주요 측정변수는 자연순환 유량과 순환회로의 여러 주요 부분에서의 압력, 온도, 및 구간별 압력 강하이다. 또한 자연순환 회로 내의 여러 주요 위치에서의 과열도가 계산되어졌다. 두 번째 목표는 피동잔열제거계통 열교환기(HX, Heat Exchanger)와 비상냉각탱크(ECT, Emergency Cooledown Tank)의 열전달 특성을 고찰하는 것이다. 열교환기 내부의 유체 온도, 외부의 표면 온도 및 압력 변화로부터 열교환기를 통한 전체적인 열전달 특성이 파악되었으며, 비상냉각탱크를 통해 흐르는 냉각수의 온도 변화로부터 비상냉각탱크의 냉각 특성이 분석되었다. 주요 측정변수는 응축 열교환기 표면의 온도, 비상냉각탱크 내부의 온도 분포, 및 냉각탑과 냉각수의 입/출구 온도이다. 또한 피동잔열제거계통 열교환기를 통한 열전달량이 계산되어졌다. 세 번째 목표는 피동잔열제거계통이 작동될 때의 일차계통의 거동을 고찰하는 것이다. 주요 측정변수는 일차계통의 주요 위치에서의 압력, 온도, 및 유량이다.

2 고온고압 열수력 실험장치 피동잔열제거계통

2.1 피동잔열제거계통의 구성

피동잔열제거계통은 사고가 발생했을 경우 노심 및 압력용기가 과열 및 과압되는 것을 방지하는 계통이다. 그림 1은 피동잔열제거계통의 개략도 및 계측기 부착 위치를 보여준다. 고온고압 열수력 실험장치의 피동잔열제거계통은 1 train의 냉각계통으로 이루어져 있고, 비상냉각탱크, 응축 열교환기, 보상탱크 및 밸브와 배관으로 구성된다. 또한 정상운전시 열기관을 냉각시키기 위한 보수냉각펌프가 별도로 설치된다.

자연순환에 의해 유입된 증기가 PRHRS 열교환기 내부에서 응축되면서 비상냉각탱크로 응축열을 전달하며, 응축열은 비상냉각탱크를 통해 흐르는 기기냉각수에 의해 제거된다. 이차계통의 증기 배관에서 분기된 배관은 비상냉각탱크 내부에 설치된 열교환기의 상부 헤더로 연결된다. 과열 증기는 열교환기 튜브를 지나면서 응축되어 하부 헤더로 모였다가 계통 배관을 거쳐 이차계통의 급수 배관으로 다시 들어간다.

그림 2와 3은 각각 피동잔열제거계통 열교환기의 개략도와 단면도를 보여준다. PRHRS 열교환기는 비상냉각탱크 내부에 수직으로 설치되며, 열교환기의 기울기가 변경될 경우에도 유지 및 보수가 용이하게 기기가 배치되었다. 열교환기는 6 개의 튜브와 상부 및 하부 헤더로 구성되었다. 각 열교환 튜브는 Inconel-600으로 제작되었으며, 길이는 1200 mm, 내경은 13 mm, 외경은 18 mm이다. 열교환기 튜브 벽에는 열전대가 부착되어 튜브 온도가 측정되며 상부와 하부 헤더에서의 압력 및 온도가 측정되도록 측정 포트가 설치되었다.

2.2 자연순환 회로의 구성

원자로 불시정지 후 노심 정지신호에 의하여 이차계통의 증기 및 급수 격리밸브가 닫히고, 피동잔열제거계통의 우회밸브가 열리면서 피동잔열제거계통이 작동된다. 그림 4는 피동잔열제거계통의 자연순환 회로를 보여준다. 그림 4에 자연순환 회로 내의 압력, 온도 및 차압의 측정 위치가 나타나 있다. 이차계통의 증기관을 나온 증기는 비상냉각탱크 내부의 열교환기에서 냉각 및 응축되며, 이 물은 증기발생기의 급수관으로 재순환되어 증기발생기의 이차측을 통과하면서 일차계통을 냉각시킨다. 이차계통 및 피동잔열제거계통에서의 자연순환은 증기발생기 이차측, 이차계통 증기배관, 피동잔열제거계통 증기배관, 응축 열교환기, 피동잔열제거계통 응축수 배관 및 이차계통 급수배관의 순서로 진행된다.

3. Test Matrix

정상상태 운전 조건에서 노심 모의 히터의 전원공급이 중단되고 펌프가 정지되면 자연순환 실험이 시작된다. 총 9회의 PRHRS 자연순환 실험이 수행되었다. 표 1은 PRHRS 자연순환 실험의 Test Matrix이다. 6회의 실험은 붕괴열이 모의되지 않은 경우의 실험이다. 자연순환 실험이 수행되기 전의 정상상태에서 노심 모의 히터의 전원 공급량은 정격 전원의 10, 25, 36, 50, 75, 및 100 %이었으며, 일차계통 내부의 유량은 각각 정격 유량의 36, 50, 100, 100, 100, 100 %이었다. 3회의 실험은 붕괴열이 모의된 경우의 실험이다. 자연순환 실험이 수행되기 전의 정상상태에서 노심 모의 히터의 전원 공급량은 정격 전원의 36, 50, 및 75 %이었으며, 일차계통 내부의 유량은 모두 정격 유량의 100 %이었다. 그림 5는 PRHRS 작동 중의 노심 붕괴열에 대한 모의 결과를 보여준다. 노심 붕괴열의 모의를 위해 ANS73 curve가 사용되었고, 열손실은 10.25 kW로 주어졌으며, 정격 전원은 682.3 kW이었다.

4. 계측 변수

PRHRS의 열교환기, 증기배관과 급수배관, 증기발생기 이차측과 이차계통의 증기배관과 급수배관, 일차계통의 압력용기, 배관, 및 증기발생기 일차측에 계측기가 설치되었다. 표 2에 나타난 바와 같이 자연순환 유량, PRHRS와 이차계통의 압력, 온도와 차압, 응축 열교환기의 표면 온도, 비상냉각탱크 내부의 유체 온도, 냉각탑(Cooling Tower)의 입/출구 온도, 냉각수의 입/출구 온도와 유량, 일차계통의 압력과 유량, 및 증기발생기 일차측의 압력과 온도를 측정하기 위하여 전체 46 개의 계측기가 사용되었다.

5. 실험 결과

피동잔열제거계통이 작동되면, 증기발생기 이차측에서의 비등과 피동잔열제거계통 응축 열교환기에서의 응축에 의한 온도차에 의하여 계통 내부 유체는 자연순환을 하게 된다. 실험 결과를 Test ID가 H-P50-Q100-D-PRHR인 경우를 중심으로 설명하고자 한다. H-P50-Q100-D-PRHR의 실험은 노심 붕괴열이 모의된 실험으로써 정상상태에서 노심 모의 히터에 공급되는 전원과 피동잔열제거계통이 작동되기 전의 이차계통의 급수 유량은 각각 정격 전원 및 유량의 36 %이었고, 일차계통 내부의 유량은 정격 유량의 100 %이었다. 모든 실험 결과는 실험 초기조건이 다른 몇 경우를 제외하고는 각 변수의 시간에 따른 변화가 초기 이차계통 급수 유량 및 공급 전원량과는 큰 관련성이 없는 것으로 나타났다.

측정된 변수는 표 2에 나타난 바와 같다. 계측된 온도와 압력 데이터로부터 피동잔열제거계통 및 이차계통에서의 과열도가 계산되었으며, 비상냉각탱크 내부 열교환기를 통한 열교환량의 변화가 계산되었다.

5.1 자연순환 성능 분석

피동잔열제거계통에서 자연순환 성능은 일차계통으로부터의 잔열 제거를 위한 가장 주요한 열수력 현상이다.

그림 6은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통의 자연순환 유량을 보여준다. 초기에 고온고압 열수력 실험장치의 일차계통 및 이차계통은 정상상태로 운전된다. 피동잔열제거계통이 작동되면서 초기에 급격한 유량의 변동이 있고, 몇 초 이내에 자연순환이 이루어진다. 이후 자연순환 유량은 일정한 속도로 감소하는 경향을 보여 준다. 자연순환 유량의 최대값은 약 0.03 kg/s이었다.

그림 7은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통 열교환기 내부의 압력을 보여준다. 초기에 대기압 상태에 있던 계통 압력은 피동잔열제거계통의 작동과 동시에 급격히 상승하였으며, 최대값에 도달한 이후에 점차적으로 감소한다. 초기에는 자연순환 유량과 냉각능력이 매우 크기 때문에 계통압력이 급격하게 떨어지나, 시간의 경과와 함께 자연순환 유량과 냉각 능력이 감소하기 때문에 압력의 하락율은 점차적으로 감소한다. 자연순환 회로 내부의 최대 계통압력은 약 62 bar이다. 노심 붕괴열이 모의된 경우 최대 압력은 노심 붕괴열이 모의되지 않은 경우보다 약 10 bar 상승하였으며, 시간의 경과에 따른 전체적인 압력 거동은 서로 비슷하다.

그림 8은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통의 여러 위치에서의 온도를 보여준다. 피동잔열제거계통 증기 배관에서의 온도(TC-RHS-01)는 약간 과열된 상태를 유지하고 있으며, 그 경향은 계통압력의 거동과 잘 일치하고 있다. 기타의 열전대가 보여주는 온도 거동은 과열 증기가 열교환기를 통과하면서 응축되고, 응축된 물은 과냉 상태에 있다는 것을 보여준다. 노심 붕괴열이 모의된 경우 피동잔열제거계통의 여러 위치에서의 온도 변화는 노심 붕괴열이 모의되지 않은 경우와 비슷한 경향을 보이면서, 온도는 전체적으로 약간 높은 값을 유지한다.

그림 9는 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통의 여러 구간에서의 차압을 보여준다. DP-RHS-01, DP-RHS-02 및 DP-RHS-03은 각각 응축수 배관, 열교환기 및 증기 배관에서의 차압이다. 계측된 차압($\Delta P_{\text{measured}}$)은 마찰에 의한 차압($\Delta P_{f, \text{loss}}$)과 수두 차이에 의한 차압(ΔP_{head})의 합이며, 식 (1)로 표현된다.

$$\Delta P_{\text{measured}} = \Delta P_{f, \text{loss}} + \Delta P_{\text{head}} \quad (1)$$

실험에서 증기발생기로부터 발생된 고온의 증기는 증기 배관을 통해 열교환기로 유입된다. 실험결과는 유입된 증기가 열교환기 내부에서 모두 응축이 되어 액체로 바뀌는 것을 보여준다. 열교환기 내부에서 유량이 가장 큰 경우는 초기 상태인 경우이다. 초기에 계통압력은 약 62 bar까지 급격하게 상승하고 난 후 완만히 감소하고, 포화상태에 있는 것으로 판단된다. 초기상태에서 마찰에 의한 압력강하는 단상으로 흐른다고 가정했을 때, 증기와 응축수인 경우에 각각 최대 109.3 Pa와 3.6 Pa이었다. 또한 응축수 배관에서의 마찰에 의한 압력강하는 최대 917.1 Pa로 계산되었다. 즉 열교환기 내부와 응축수 배관에서는 유속이 비교적 작고, 액체 상태에 있기 때문에 마찰에 의한 압력강하는 아주 작은 값을 보인다. 따라서 응축수 배관과 열교환기 내부에서 계측된 차압은 대부분이 수두 차이에 의한 차압인 것으로

판단된다.

열교환기 내부에서 측정된 차압은 피동잔열제거계통이 작동되면서 초기에 약 4 kPa까지 빠른 속도로 상승하고, 이후 차압은 완만히 상승한다. 피동잔열제거계통이 작동되기 전에 응축 열교환기는 모두 물로 채워져 있었다. 따라서 피동잔열제거계통이 작동되면서 열교환기 내부의 응축수가 초기에 약 50 cm까지 빠른 속도로 빠지고, 이후에 열교환기 내부의 응축수가 완만한 속도로 모두 방출되는 것으로 예상된다.

응축수 배관에서 측정된 차압은 피동잔열제거계통이 작동되면서 초기에 약 18 kPa까지 급격히 상승하고, 약간의 요동이 발생한 이후에는 완만히 하강한다. 피동잔열제거계통이 작동되기 전에 응축수 배관은 열교환기와 마찬가지로 모두 물로 채워져 있다. 피동잔열제거계통이 작동되면서 응축수 배관의 물이 초기에 약 1.8 m 정도 배수된다. 열교환기의 하부 헤더로부터 오는 응축수에 의해 응축수 배관이 조금씩 채워진다.

증기 배관에서는 차압계의 High와 Low의 위치가 같은 높이에서 측정되었기 때문에, 수두 차이에 의한 차압은 발생하지 않으며, 측정된 차압은 마찰에 의한 차압이라 볼 수 있다. 증기 배관에서의 마찰에 의한 압력강하는 유량이 가장 큰 초기 상태에서 1 kPa 미만으로 계산되었으며, 측정 결과는 증기 배관에서의 차압이 1 kPa 미만임을 보여주고 있다.

그림 10은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 이차계통의 압력을 보여준다. 초기에 37 ~ 40 bar의 운전 조건에 있던 계통 압력은 피동잔열제거계통의 작동과 함께 증기 공간의 확대로 압력이 급격히 감소한다. 이후 증기발생기에서 발생된 증기에 의해 압력이 회복되고 자연순환이 이루어지면서 다시 압력은 점차적으로 떨어진다. 압력이 회복된 이후의 압력 거동은 피동잔열제거계통의 압력 변화와 일치한다.

그림 11은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 이차계통의 여러 측정 위치에서의 온도를 보여준다. 이차계통의 급수 배관은 항상 과냉 상태를 유지하고 있으며, 이차계통의 증기 배관은 초기에 과열 상태에 있다가 점차적으로 포화상태에 도달한다.

그림 12는 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 이차계통의 여러 구간에서의 차압을 보여준다. 이차계통의 급수 배관을 통한 차압, 및 증기발생기의 이차측과 증기 배관에서의 차압은 아주 작은 값을 보인다.

그림 13은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통의 여러 측정 위치에서의 과열도를 보여준다. TC-RHS-03과 TC-RHS-05는 각각 열교환기의 상부 헤더와 하부 헤더에 위치한 열전대이고, 과열도 계산을 위한 기준 압력은 각각 PT-RHS-01과 PT-RHS-02에 의해 측정되었다. 유체의 상태가 상부 헤더에서는 약간 과열되었거나 포화상태의 증기임을 보여주고 있고, 하부 헤더에서는 과냉각된 상태의 응축수임을 보여 준다. 따라서 응축 열교환기 내부의 열이 비상냉각탱크를 통해 흐르는 기기냉각수에 의해 효과적으로 제거되고 있다. 노심 붕괴열이 모의된 경우 피동잔열제거계통 내부 과열도는 노심 붕괴열이 모의되지 않은 경우와 비슷한 경향을 보이나, 노심 붕괴열이 모의된 경우 피동잔열제거계통의 압력이 높기 때문에 하부 헤더의 과냉각도가 노심 붕괴열이 모의되지 않은 경우보다 높게 유지된다.

그림 14는 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 이차계통의 여러 측정 위치에서의 과열도를 보여준다. TC-SG2-22와 TC-SND-01은 각각 증기발생기의 이차측 출구와 이차계통의 증기 배관에 위치한 열전대이고, 과열도 계산을 위한 기준 압력은 각각 PT-SG2-06과 PT-SND-01에 의해 측정되었다. 초기에는 유체가 과열상태를 유지하고 있다. 피동잔열제거계통이 작동되고, 자연순환이 발생되면서 유체의 과열도가 초기에 조금 상승하다가 일정시

간이 흐른 이후에는 과열도가 하강하면서 포화상태로 천이한다. 노심 붕괴열이 모의된 경우 이차계통 내부 과열도는 노심 붕괴열이 모의되지 않은 경우보다 초기에 낮게 유지되며, 특히 증기발생기 증기측 출구(TC-SG2-22)에서는 일정 기간 동안 포화상태를 유지한다. 이후 증기발생기 내부의 물이 모두 기화됨에 따라 증기발생기 내부가 이상 상태가 되고, 차차 증기발생기 증기측 출구와 증기 배관에서의 과열도가 높아진다.

5.2 열전달 특성 분석

피동잔열제거계통에서 자연순환이 발생되면 피동잔열제거계통 열교환기는 최종적인 열제거원으로써의 역할을 한다.

그림 15는 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통 열교환기 튜브 표면의 온도를 보여준다. TC-RHS-04(a), TC-RHS-04(b)와 TC-RHS-04(c)는 각각 응축 열교환기 튜브의 상부, 중간 및 하부 표면 온도이다. 모든 경우에서 열교환기의 상부에서의 온도가 100 °C 이상으로 측정되었으며, 이는 열교환기의 상부에서 비등이 있어나고 있다는 것을 보여준다. 열교환기 상부에서의 비등은 비상냉각탱크에 설치된 Sight Glass를 통해서도 확인되었다. 열교환기 튜브 중간 부분과 하부에서 표면 온도의 차이가 크지 않은 것은 열교환기 튜브 상부에서 대부분의 증기가 응축되어 튜브 중간 및 하부에서의 열전달량이 크지 않기 때문이다.

그림 16은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통 비상냉각탱크 내부의 온도 분포를 보여준다. 기기냉각수 온도는 열교환기의 하부에서는 높지 않지만, 열교환기의 상부에서는 온도가 약 50 °C부터 60 °C의 높은 온도를 유지한다. 열교환기 튜브 중간 부분과 하부 사이에서 유체 온도의 차이가 거의 없는 것은 열교환기 튜브로부터 전달되는 열이 적기 때문이다. 열교환기의 안쪽에서 측정된 유체 온도(TC-RHS-02(d))는 바깥쪽에서 측정된 유체 온도(TC-RHS-02(a))보다 크다.

그림 17은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 냉각탑의 입출구 온도를 보여준다. 냉각탑은 주냉각재펌프, 가압기, 급수열교환기 및 PRHRS 응축 열교환기의 냉각을 담당한다. 정상상태 운전에서는 냉각탑에서의 입출구 온도차가 일정하게 유지되는데, 이는 정상상태에서 냉각을 필요로 하는 주냉각재펌프에서 오는 열이 일정하기 때문이다. 피동잔열제거계통이 작동되면 냉각탑의 입출구 온도가 급격히 상승하는데, 이는 기기냉각수가 응축 열교환기를 통해 비상냉각탱크로 전달되는 열을 제거해야 하기 때문이다. 자연순환 유량의 감소와 열교환기를 통한 열전달량의 감소로 인하여 냉각탑 입출구 온도의 상승이 둔화되는 것을 볼 수 있다.

그림 18은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 비상냉각탱크의 입출구 온도를 보여준다. 냉각탑의 입출구 온도는 주냉각재펌프와 같은 다른 기기에 의해 영향을 받기 때문에, 별도로 비상냉각탱크 입출구의 온도 측정을 위한 열전대가 준비되었다. 본 실험에서는 TC-PZR3-18과 TC-PZR3-19가 사용되었다. 비상냉각탱크 출구의 온도가 먼저 상승하고, 온도가 상승된 냉각수가 냉각탑을 통과한 후에는 비상냉각탱크 입구의 온도가 따라서 상승된다. 비상냉각탱크의 입출구 온도도 열교환기를 통한 열전달량이 감소하기 때문에 온도의 상승이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 비상냉각탱크의 입출구 온도의 차이는 초기에 급격히 상승하고, 열전달량의 감소로 점차 감소된다.

비상냉각탱크 내부의 응축 열교환기를 통해 이루어지는 열전달은 열교환기 내부와 외부로 나누어 계산되었다. 열교환기 내부에서의 열전달은 자연순환 유량의 엔탈피 변화로부터 계

산되었고, 열교환기 외부인 비상냉각탱크에서의 열전달은 비상냉각탱크를 통과하는 기기냉각수의 온도변화로부터 계산되었으며, 계산식은 각각 식 (2)와 (3)과 같다.

- 응축열교환기 내부에서의 열전달 계산:

$$Q_{HX}(t) = \dot{m}_{HX} \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (2)$$

- 응축열교환기 외부에서의 열전달 계산:

$$Q_{ECT}(t) = \dot{m}_{ECT} \cdot C_p \cdot \Delta T = \dot{m}_{ECT} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

여기에서 Q , \dot{m} , h , C_p 와 ΔT 는 각각 열전달량, 유량, 엔탈피, 비열, 및 온도차를 나타내며, 아래 첨자 HX, ECT, in과 out은 각각 열교환기, 비상냉각탱크, 입구, 및 출구를 나타낸다.

그림 19는 계산을 통해 얻어진 비상냉각탱크 내부 열교환기를 통한 열교환량을 보여준다. 자연순환 유량의 엔탈피 변화로부터 계산된 열전달량은 열교환기를 통한 열전달량을 신속하게 반영하고 있으나, 비상냉각탱크를 통과하는 기기냉각수의 온도변화로부터 계산된 열전달량은 실제 현상보다 느린 반응을 보인다. 이는 비상냉각탱크를 통과해 흐르는 기기냉각수의 유체 속도가 최대 0.3 m/min으로 매우 느리기 때문이다. 그림 19에서 Q_{HX} 는 일정시간이 경과한 이후에 큰 변동을 보이고 있으며, 이는 열교환기로 유입되는 증기의 온도가 포화온도 이하로 떨어졌기 때문이다.

5.3 일차계통의 거동 분석

피동잔열제거계통 작동시에 보이는 일차계통의 거동은 PRHRS 실험의 주요한 관심사중의 하나로써 피동잔열제거계통의 전체적인 성능을 평가할 수 있는 주요한 실험자료이다. 일차계통에서의 압력, 온도, 및 유량이 측정되었다.

그림 20은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 일차계통의 압력을 보여준다. 일차계통의 압력은 피동잔열제거계통이 작동되는 초기에 급격히 하강한다. 이는 피동잔열제거계통의 작동과 함께 증기발생기를 통한 열전달이 급격히 상승하기 때문이다. 이후에는 안정적인 자연순환이 이루어지고, 자연순환량의 감소에 따라 압력강하의 속도는 점차 감소한다.

그림 21은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 증기발생기 일차측의 온도변화를 보여준다. 피동잔열제거계통이 작동되면서 증기발생기를 통해 초기에 급격한 열전달이 이루어지기 때문에 증기발생기 일차측의 온도는 급격히 하강하고, 이후 일차측의 온도는 서서히 감소한다. 몇몇 다른 경우의 실험에서는 일차측의 온도에 요동이 계속되었는데, 이는 증기발생기 일차측 열전달의 변화에 의해 일차측 온도에 요동이 생기기 때문인 것으로 보인다.

그림 22는 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 일차계통의 유량변화를 보여준다. 정격 유량이 36 %인 조건에서 피동잔열제거계통이 작동되었을 때는 일차계통 내부에서 초기에 유량이 형성되고, 형성된 유량은 크게 변화하지 않는다.

6. 결론

각 출력에 따른 정상상태 실험을 정해진 양의 공급 전원과 유량으로 수행한 이후 노심 모

의 히터와 주냉각재펌프가 정지되고, 이차계통의 격리밸브와 피동잔열제거계통의 우회배관이 작동되면서 피동잔열제거계통 실험이 수행되었다. 노심 붕괴열과 열손실은 노심 모의 히터에 정해진 전원을 투입함으로써 모의되었다. 피동잔열제거계통 열전달 특성 및 자연순환 실험에서는 PRHRS의 자연순환 성능, PRHRS 열교환기와 비상냉각탱크 내부에서의 열전달 및 일차계통 내부의 열수력적 거동이 고찰되었다.

전체적으로 증기발생기 이차측, 이차계통, 및 피동잔열제거계통에 걸쳐 형성되는 자연순환 회로에서 안정적인 자연순환이 일어난다. 계통 압력의 감소와 그에 따른 자연순환 유량의 감소로 피동잔열제거계통의 냉각 능력은 점차적으로 감소한다. 일차계통은 피동잔열제거계통의 작동과 함께 초기에 급격한 냉각이 이루어지고, 피동잔열제거계통의 냉각 능력 감소에 따라 차차 냉각 속도가 감소한다. 본 실험장치의 자연순환 회로에서 약 0.03 kg/s의 유량이 형성되었다. 이 유량은 이차계통 정격 급수 유량의 약 12 %에 해당된다. PRHRS 열교환기와 비상냉각탱크 내부를 통한 열전달은 자연순환을 가능하게 할만큼 충분하였다. 또한 노심 붕괴열과 증기발생기의 열제거로 발생하는 일차계통 내부의 자연순환 유량은 몇몇 경우에는 약간의 요동이 있지만, PRHRS의 작동에 의해 일차계통의 노심붕괴열은 충분히 제거되고 있음을 보여준다.

참고 문헌

- [1] 이성재 외, “고온고압 열수력 실험장치의 기본설계,” 10394-TE-RR840-02, Rev. 0, 2001.
- [2] K. Y. Choi, H. S. Park, S. Cho, C. K. Park, S. J. Lee, C. H. Song, and M. K. Chung, “Overall Thermal-Hydraulic Test Facility for System-Integrated Modular Advanced Reactor,” NURETH-10, Seoul, Korea, October 5-9, 2003.
- [3] 장문희 외, “일체형원자로(SMART) 기본설계 보고서,” KAERI/TR-2142/2002, 2002.
- [4] 이규형 외, “SMART 기본설계 성능평가,” KAERI/TR-2171/2002, 2002.
- [5] 양수형 외, “SMART 기본설계 안전성 평가,” KAERI/TR-2173/2002, 2002.

표 1. PRHRS 자연순환 실험의 Test Matrix

Test ID	Power (%)	Flow Rate (%)	Decay Heat
H-P10-Q36-PRHR	10	36	NA
H-P25-Q50-PRHR	25	50	NA
H-P36-Q100-PRHR	36	100	NA
H-P50-Q100-PRHR	50	100	NA
H-P75-Q100-PRHR	75	100	NA
H-P100-Q100-PRHR	100	100	NA
H-P36-Q100-D-PRHR	36	100	ANS73
H-P50-Q100-D-PRHR	50	100	ANS73
H-P75-Q100-D-PRHR	75	100	ANS73

표 2. PRHRS 자연순환 실험의 측정 변수와 계측기

측정 변수	계측기 ID (위치)	개수
자연순환유량	FE-SND-02 (이차계통 급수 배관) (at PT-SND-04, TE-SND-04)	1
PRHRS 압력	PT-RHS-01 (입구 증기 배관) PT-RHS-02 (하부 헤더) PT-RHS-03 (출구 응축수 배관 1) PT-RHS-04 (출구 응축수 배관 2)	4
PRHRS 유체 온도	TC-RHS-01 (입구 증기 배관) TC-RHS-03 (상부 헤더) TC-RHS-05 (하부 헤더) TC-RHS-06 (출구 응축수 배관 1) TC-RHS-07 (출구 응축수 배관 2)	5
PRHRS 차압	DP-RHS-03 (PRHRS 입구 증기 배관) DP-RHS-02 (PRHRS 열교환기) DP-RHS-01 (PRHRS 입구 응축수 배관)	3
이차계통 압력	PT-SND-04 (이차계통 급수 배관) PT-SG2-04 (증기발생기 급수측 입구) PT-SG2-06 (증기발생기 증기측 출구) PT-SND-01 (이차계통 증기 배관)	4
이차계통 온도	TC-SND-03 (급수공급탱크) TC-SND-04 (이차계통 급수 배관) TC-SG2-21 (증기발생기 급수측 입구) TC-SG2-22 (증기발생기 증기측 출구) TC-SND-01 (이차계통 증기 배관)	5
이차계통 차압	DP-SND-02 (이차계통 급수 배관) DP-SG2-04 (증기발생기 이차측) DP-SND-01A (이차계통 증기 배관 - 상부) DP-SND-01B (이차계통 증기 배관 - 하부)	4
일차계통 압력	PT-BPV-01 (일차계통 압력용기) PT-MCP-01 (일차계통 MCP)	2
증기발생기 일차측 압력	PT-SG1-01 (증기발생기 일차측 입구) PT-SG1-03 (증기발생기 일차측 출구)	2
증기발생기 일차측 온도	TC-SG1-01 (증기발생기 일차측 입구) TC-SG1-14 (증기발생기 일차측 출구)	2
열교환기 표면온도	TC-RHS-4a,b,c (열교환기 표면) (높이: 하부헤더 윗면 + 1170.5, 650.5, 130.5 mm)	3
ECT 내부 유체 온도	TC-RHS-2a,b,c (바깥 봉 두 개 사이) TC-RHS-2d,e,f (중앙 봉과 바깥 봉 사이) (높이: 하부헤더 윗면 + 1170.5, 650.5, 130.5 mm)	6
냉각탑 입/출구 온도	TC-CWS-01 (Cooling Tower 입구) TC-CWS-02 (Cooling Tower 출구)	2
냉각수 입/출구 온도	TC-PZR3-18 (비상냉각탱크 입구 배관) TC-PZR3-19 (비상냉각탱크 출구 배관)	2
냉각수 유량	FR-CWS-01 (at 0.1013Mpa, TC-CWS-02)	1

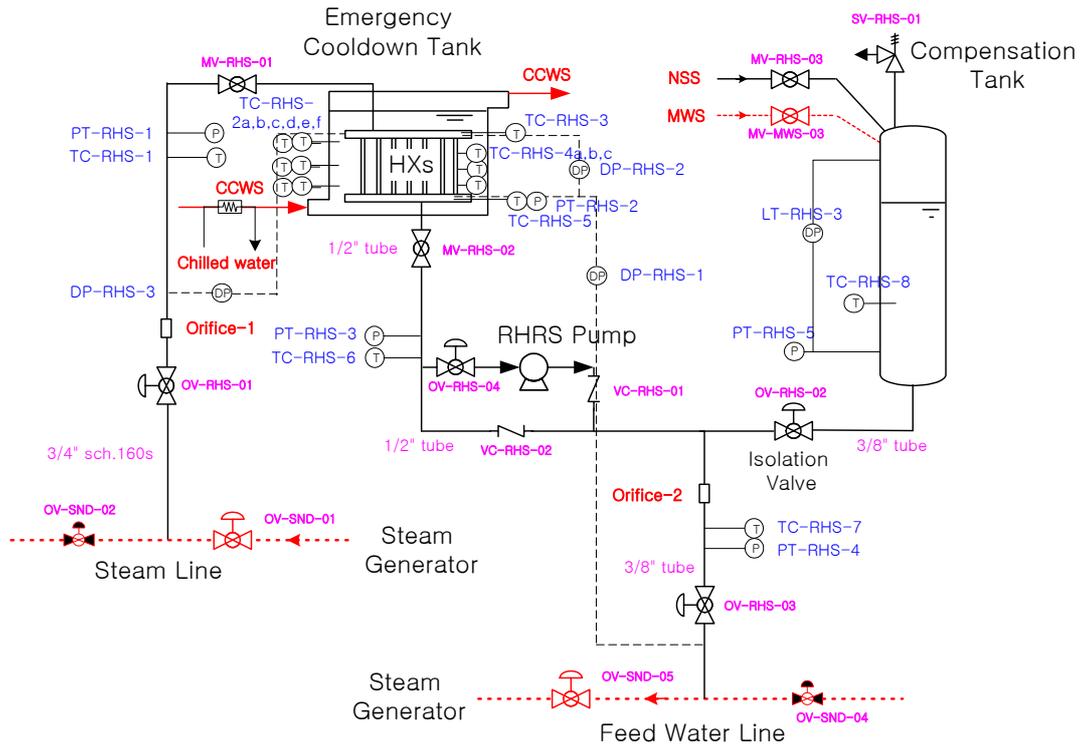


그림 1. 피동잔열제거계통의 개략도 및 계측기 부착 위치

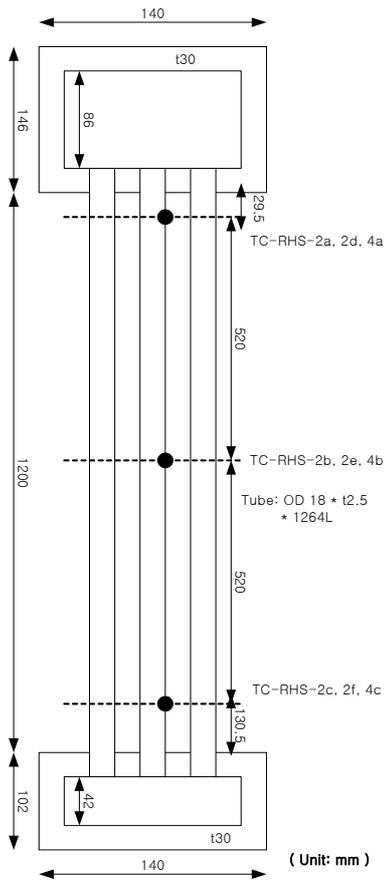


그림 2. 피동잔열제거계통 열교환기의 개략도

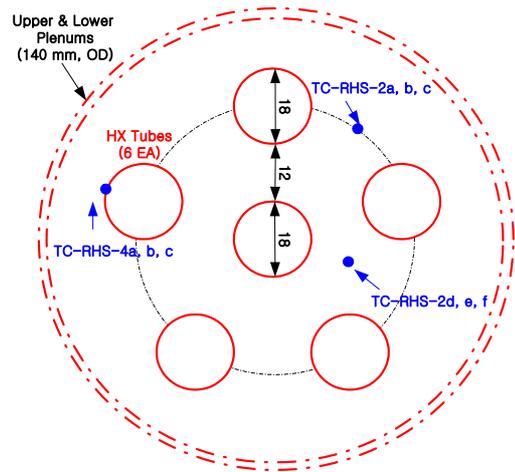


그림 3. 피동잔열제거계통 열교환기의 단면도

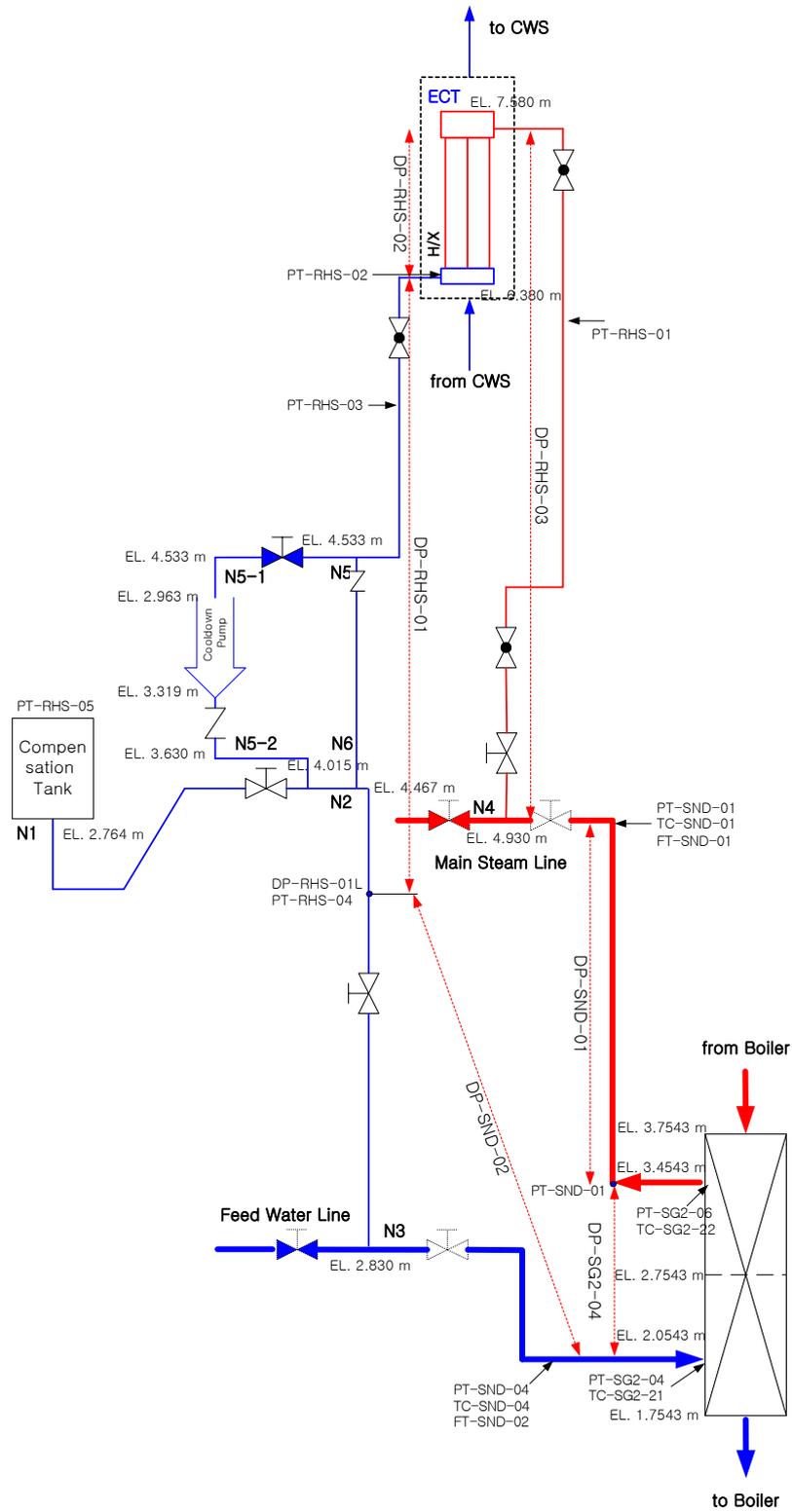


그림 4. 피동잔열제거계통의 자연순환 회로

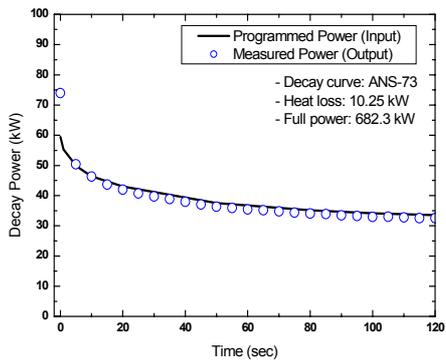


그림 5. PRHRS 작동중의
노심붕괴열 모의

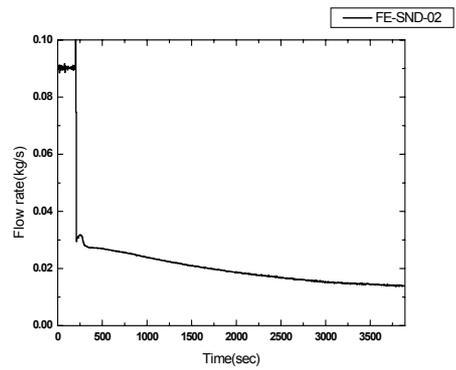


그림 6. PRHRS 자연순환에서의
자연순환 유량 변화

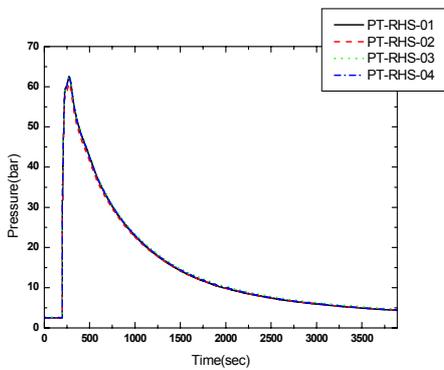


그림 7. PRHRS 자연순환에서의
압력 변화: PRHRS

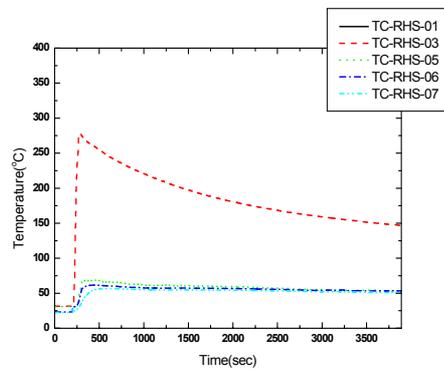


그림 8. PRHRS 자연순환에서의
온도 변화: PRHRS

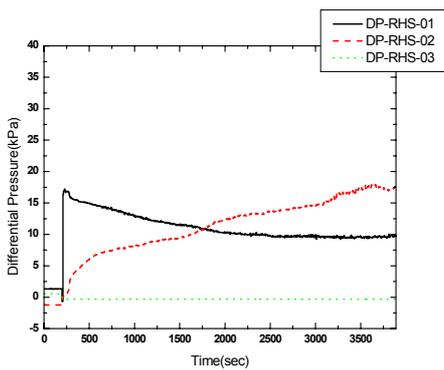


그림 9. PRHRS 자연순환에서의
차압 변화:
PRHRS

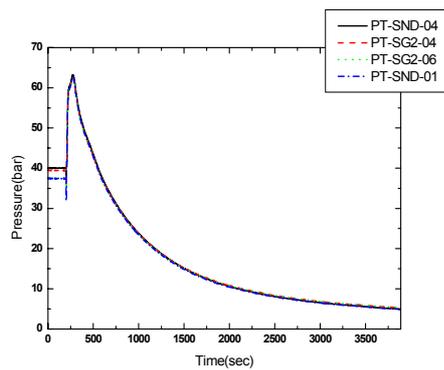


그림 10. PRHRS
자연순환에서의 압력 변화:
이차계통

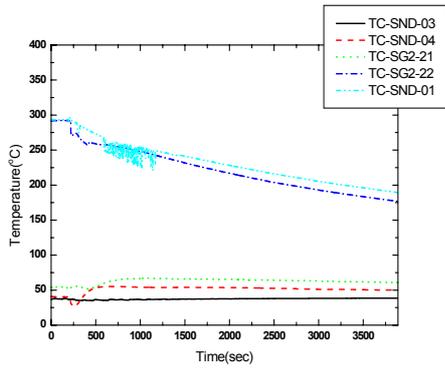


그림 11. PRHRS
자연순환에서의 온도 변화:
이차계통

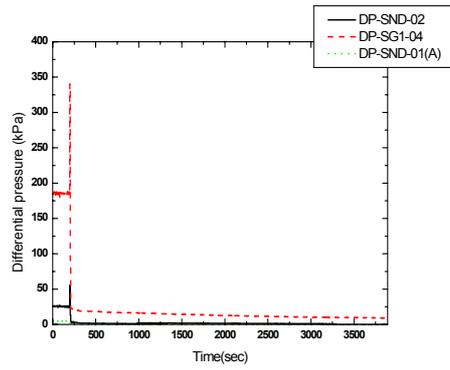


그림 12. PRHRS
자연순환에서의 차압 변화:
이차계통

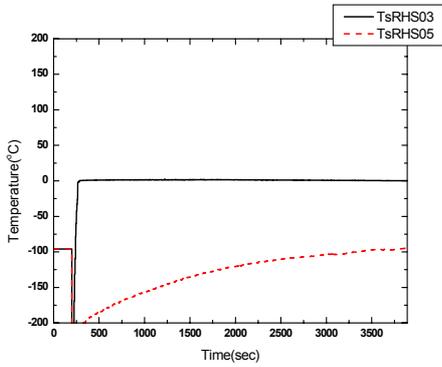


그림 13. PRHRS
자연순환에서의 과열도 변화:
PRHRS

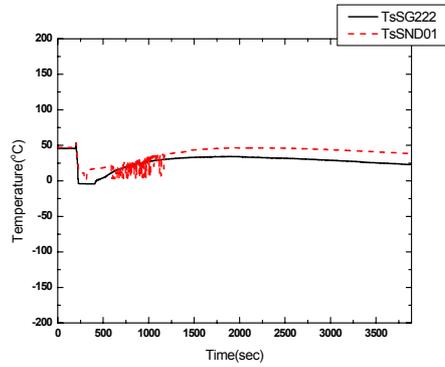


그림 14. PRHRS
자연순환에서의 과열도 변화:
이차계통

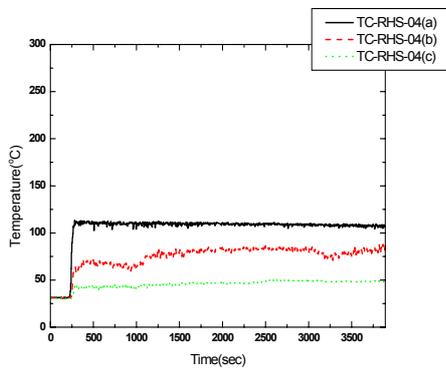


그림 15. 열교환기의 표면 온도
분포

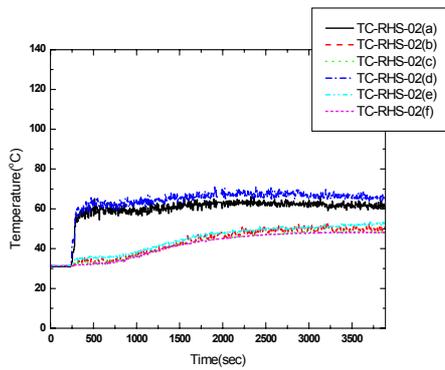


그림 16. 비상냉각탱크 내부의
온도 분포

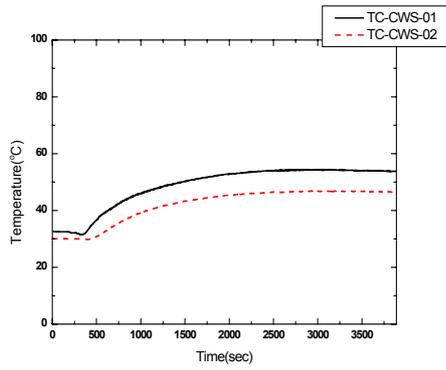


그림 17. 냉각탑의 입출구 온도 변화

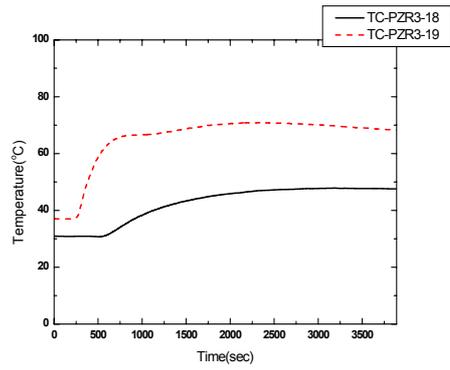


그림 18. 비상냉각탱크의 입출구 온도 변화

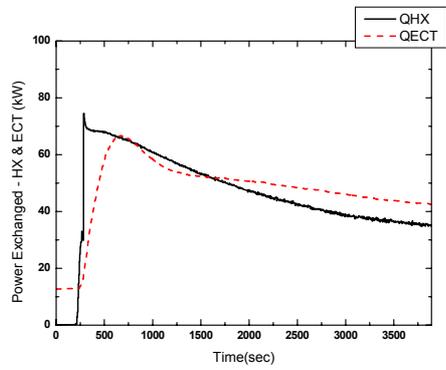


그림 19. 비상냉각탱크 내부 열교환기를 통한 열교환량

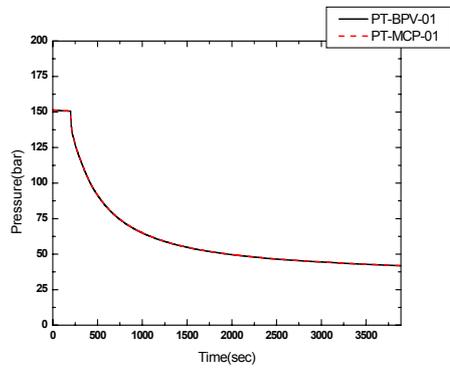


그림 20. PRHRS 자연순환에서의 압력 변화: 일차계통

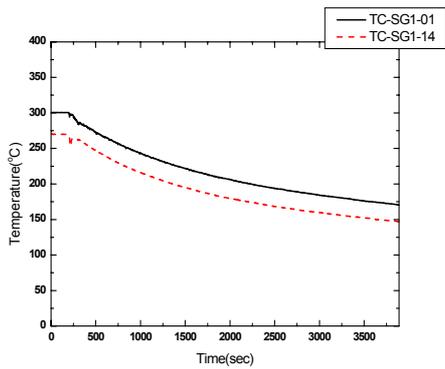


그림 21. PRHRS 자연순환에서의 온도 변화: SG 일차측

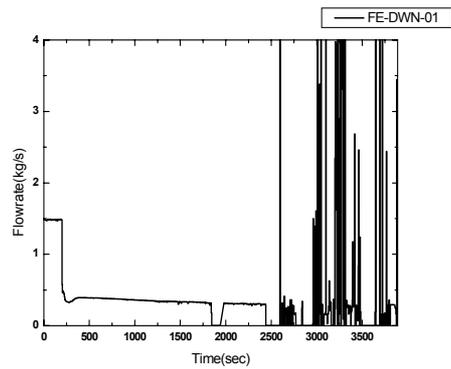


그림 22. PRHRS 자연순환에서의 유량 변화: 일차계통