

VISTA ITL을 이용한 정상상태에서의 피동잔열제거계통 성능시험: 출력 100%

민병연, 박현식, 신용철, 최남현, 이성재
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 대덕대로 1045
bymin@kaeri.re.kr

1. 서론

스마트 원자로의 피동잔열제거계통 (PRHRS, Passive Residual Heat Removal System)은 SMART 플랜트의 사고 시 원자로에서 발생하는 잔열과 구조물이 포함하고 있는 열을 제거하기 위한 최종 열침원(heat sink)이다. 피동잔열제거계통은 안전계통으로 단일고장을 고려하여 안전등급의 기기로 설계되어 있다. VISTA-ITL 시험장치를 이용하여 피동잔열제거계통 성능을 평가하기 위한 시험항목을 선정하였다 [1]. 본 실험은 SMART 플랜트의 모든 운전 조건을 고려한 원자로 정지 시 피동잔열제거계통의 성능을 시험하는 것이다. 즉 PRHRS 성능시험은 100% 출력 운전 조건에서 PRHRS가 작동할 때의 정상상태 PRHRS 성능시험을 모의하는 사고조건 PRHRS 성능시험으로서 SMART 원자로 PRHRS가 정상상태 조건에서 작동되었을 경우의 계통의 전반적인 열수력 현상 파악을 통해 정상상태에서의 PRHRS 설계의 건전성과 성능을 검증하며, PRHRS 설계 코드의 예측 능력을 검증하는데 있다.

2. Test Matrix

본 시험은 기동운전 및 출력운전 중 원자로가 정지될 경우 PRHRS의 성능을 평가한다. 원자로 출력 100% 운전조건에서 원자로 출력이 잔열수준으로 감소하고, 급수유량이 정지되면서 피동잔열제거계통이 작동할 때 계통의 성능을 평가한다. 시험의 초기 조건 및 잔열 수준을 표 2-1에 제시하였다. VISTA-ITL은 장치의 고유 설계 특성으로 급수 온도가 50℃로 제한되므로, 시험에서는 SMART의 정상급수 온도 200℃ 대신에 50℃를 급수온도로 설정하였다. VISTA-ITL의 출력은 축적된 SMART 출력의 100%를 모의하며, 급수유량을 조절하여 증기발생기 출구에서의 과열도를 SMART와 동일한 30℃ 이상을 유지하도록 한다.

Table 2.1. Test Matrix.

| | | |
|------------------|---------------------------------|-------|
| Primary system | SG Inlet Temp., (℃) | 323 |
| | SG Outlet Temp., (℃) | 296 |
| | Pressurizer Pres./Level (MPa/%) | 15/70 |
| | RCS Flowrate (kg/s) | 2.61 |
| | Decay Power (%) | 5/3/1 |
| Secondary system | SG Inlet Temp., (℃) | 50 |
| | SG Outlet Temp., (℃) | > 30 |
| | SG Inlet Press, (MPa) | 6.0 |
| | SG outlet press, (MPa) | 5.2 |
| | Feeswater flowrate, (kg/s) | 0.15 |

3. 결과 및 토의

표 3.1은 100% 출력 운전 중 원자로정지에 의한 PRHRS-SS-N1에서의 주요 사건 전개 과정이다.

Table 3.1. Test results of major sequence.

| Event | DAS time (s) | After Trip (s) |
|-----------------------|--------------|----------------|
| Initial steady-state | - | - |
| Trip signal | 94 | 0 |
| Feed waste Pump stop | 94 | 0 |
| RCP Coastdown | 95 | 1 |
| Core power, 5% | 96 | 2 |
| PRHR actuation signal | 109/112 | - |
| PRHRS IV open | 110/114 | 16/20 |
| MSIV/FIV close | 125/124 | 31/30 |
| Quasi-Steady State | 190 | 96 |
| Core powers, 3% | 780 | 686 |
| Quasi-Steady State | 900 | 806 |
| Core powers, 1% | 1401 | 1307 |
| Quasi-Steady State | 1540 | 1446 |

정상상태 유지 후 운전감독관의 지시에 의해 원자로 정지신호(DAS 시간: 94초)가 발생하였고, 곧 바로 운전원에 의해 수동으로 급수유량 공급이 중단되었고, 원자로냉각재펌프는 관성서행(DAS 시간: 95초)을 시작하였다. 피동잔열제거계통 작동신호(PRHRAS)

가 발생되면서 PRHRS 격리밸브의 개방이 원자로 정지 후 16/20 초(DAS 시간: 111/114 초) 후에 이루어졌고, 급수관 및 주증기관 격리밸브의 폐쇄는 원자로 정지 후 30 초에 이루어졌다. PRHRS 격리밸브의 개방 후 급수관 및 주증기관 격리밸브의 폐쇄까지는 수동운전에 의한 밸브 개방 및 폐쇄, 신호 전달의 지연에 기인하여 약 10 초 소요되었다.

Fig. 1은 PRHRS-SS-N1 모의시험 시 노심의 출력을 보여주고 있다. 노심 출력은 5%, 3%, 1%로 낮추는 각 시점에서 감소함을 보여주고 있으며, 측정된 출력 곡선은 목표로 한 노심 출력을 제대로 모사하였다. Fig. 2는 원자로 냉각재 계통의 압력을 보여주고 있다. 100% 정상상태 노심출력에서 5%로 노심출력을 인가하면 압력은 일시적으로 급격히 변동한 후 PRHRS 계통의 작동에 의해 서서히 감소하는 경향을 보였다. 1,243초 (DAS 시간: 1,337초)에서의 빠른 압력강하는 가압기 히터의 자동 정지에 의한 것이다. 가압기 수위가 0.4 m 이하로 내려가면 가압기 히터는 자동으로 정지된다. 종료 시점의 일차계통 압력은 10.07 MPa이었다. Fig. 3은 노심 입구의 원자로 냉각재 유량으로서 원자로냉각재펌프에 의해 정상상태 시 2.54 kg/s로 공급되고 있다. 5% 노심출력 인가 후 원자로냉각재 펌프가 정지되면서 원자로 냉각재계통 유량이 급격히 감소하는 것을 보여준다. PRHRS가 가동되면서 자연 순환유량이 생성되기 시작하였으며 초기의 자연순환유량은 0.283 kg/s 이었으며 실험종료 시 약 0.253 kg/s로 유지되었다. Fig. 4는 피동잔열제거 계통이 작동되었을 때의 이차계통의 유량을 보여주고 있다.

피동잔열제거계통이 작동되면서 초기에 급격한 유량의 변동이 있고, 몇 초 이내에 자연순환이 이루어진다. 자연순환 유량의 초기 최대값은 약 0.0161 kg/s로 정격 급수 유량(0.15 kg/s) 대비 10.7%로 공급되었으며, 점차 감소하여 실험 종료 시에는 정격 급수 유량의 10.3%에 해당되는 0.0154 kg/s로 최종 공급되고 있다.

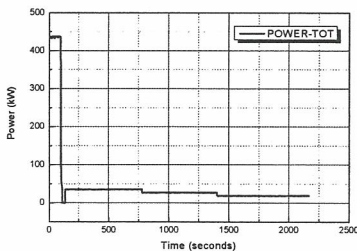


Fig. 1. Core power.

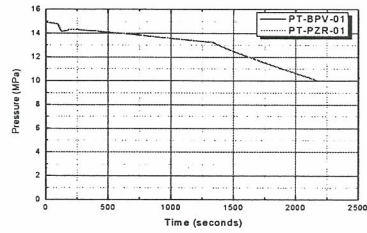


Fig. 2. Primary system pressure.

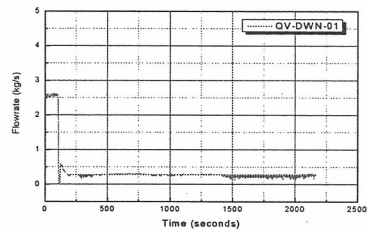


Fig. 3. Primary system flow rate.

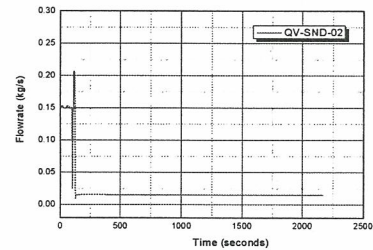


Fig. 4. Secondary system flow rate.

3. 결론

실험 데이터는 시험요건서에 제시된 허용오차 범위 내에서 적절히 측정되었으며, 정상상태 조건은 시험요건서에 제시된 시험 초기 조건을 만족시키도록 운전되었다. PRHRS 자연순환 유량은 이차계통 정격 유량 대비 최대 10.7%로 공급되어 안정적인 자연 순환 유동이 형성되었다. 100% 출력에서 PRHRS가 작동되는 조건에서 PRHRS의 건전성 및 성능을 확인할 수 있었다. 히터 출력을 5%에서 3%와 1%로 낮출 경우에도 자연순환 유량은 안정적으로 형성되었다.

4. 참고문헌

- [1] 박원식 외, VISTA ITL을 이용한 SBLOCA 검증시험 시험절차서, 751-TF440-001, 한국원자력연구원, 2010.