

SMART 설계를 위한 VISTA ITL을 이용한 원자로냉각재유량완전상실사고 모의시험

민병연, 박현식, 신용철, 이성재

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 대덕대로 989번길 111

bymin@kaeri.re.kr

1. 서론

원자로냉각재 유량 완전 상실(Complete Loss of RCS Flow, CLOF) 사고는 원자로 냉각재 유량의 완전 상실을 유발시키는 예상운전 과도상태로서, 출력 운전모드에서 예상치 않게 모든 원자로냉각재펌프(RCP, Reactor Coolant Pump)로 공급되는 전원이 상실되어 운전 중인 원자로냉각재펌프가 정지됨으로써 일차측 강제순환 유량이 완전히 상실되는 사고이다. 이 경우 원자로냉각재펌프의 정지는 노심출구 온도의 급격한 증가를 유발시킨다. 이는 다시 일차계통 냉각수의 부피 팽창과 함께 가압기 압력의 증가를 일으킨다. 가압기의 압력이 고압력(HPP, High Pressurizer Pressure) 설정치 등에 도달하면 원자로는 정지된다. 원자로가 정지되면 증기발생기는 터빈과 격리되어 피동잔열제거계통(PRHRs, Passive Residual Heat Removal System)에 연결되고, 이후부터 노심에서 발생하는 붕괴열은 피동잔열제거계통을 통한 자연순환에 의해 제거된다. 이러한 냉각재 유량 완전 상실사고시 강제순환 유량의 상실로 핵비등이탈율(DNBR, Departure from Nucleate Boiling Ratio)은 감소하게 되고, 사고 전 기간에 대해 최소핵비등이탈률 및 원자로냉각재계통의 최대 압력이 허용 기준 이내에서 유지됨을 보여야한다. 본 논문에서는 VISTA ITL 시험장치, Sequence of Event 및 시험에서 얻어진 주요 측정값과 시험 결과를 기술하였다.

2. 시험 및 방법

2.1 시험장치

VISTA ITL의 SMART-330 대비 길이비 및 유량 면적비는 각각 1/2.77 및 472.9이고, 부피비는 1/1310이다. 기준 길이와 유동 단면적으로는 각각 노심-증기발생기 중심간 높이차 및 Active core의 유동 면적을 채택하였다. VISTA ITL은 3단계 척도법[1]에 따라 축척되었으며, 주요한 VISTA ITL의 척도해석 결과는 다음과 같다.

- 기준 원전: SMART-330
- 척도해석 방법론: 3단계 척도법
- 길이 척도비: 1/2.77 (기준: Core-SG 높이차)
- 면적 척도비: 1/472.9
- 체적 척도비: 1/1310

2.2 Sequence of Event

원자로냉각재 유량 완전 상실사고 모의시험은 노심출력 103%에서는 먼저 미리 설정된 조건에서 정상상태 운전을 유지하다 정해진 Sequence of Event에 따라 원자로냉각재 유량 완전 상실사고 모의시험을 수행하였다. 표 1은 원자로냉각재 유량 완전 상실사고 모의시험의 Sequence of Event를 보여준다. 정상상태 운전조건에서 원자로냉각재펌프로 공급되는 전원이 상실되어 운전 중인 원자로냉각재펌프가 정지됨으로써 일차측 강제순환 유량이 완전히 상실되며 이와 동시에 일차계통 압력이 상승하기 시작한다. 일차계통의 압력이 가압기 고압력(HPP, High Pressurizer Pressure) 설정치에 도달하면 1.1초 지연시간(이하 SMART 기준) 후에 원자로 정지신호(Core Trip Signal)가 발생된다. 원자로 정지신호와 동시에 소의전원 상실이 발생되고, 터빈이 정지되며, 급수유량이 중단된다. 추가적인 0.5초 지연시간 후에는 제어봉 삽입이 시작된다. HPP 설정치는 Nominal 조건에서의 값인 16.53 MPa로 설정하였다. HPP가 발생한 이후 1.1 초 후에 급수 저유량에 의한 피동잔열제거 작동신호(PRHRAS)가 발생하면, 증기발생기는 주증기 격리밸브 및 급수 격리밸브의 차단에 의해 터빈과 격리되고, 피동잔열제거계통의 출구 격리밸브의 개방으로 피동잔열제거계통에 연결된다. 이때 주증기 격리밸브 및 급수 격리밸브의 완전차단 시간은 20 초이고, 피동잔열제거계통의 입구 및 출구 격리밸브의 완전개방 시간은 5초로 가정하였다.

3. 결과 및 토의

표 2는 원자로냉각재 유량 완전 상실사고 모의 시험 CLOF에서의 주요 사건 전개 과정이다. 원자

로냉각재펌프의 정지로 펌프의 Coastdown이 발생되면, 사고 발생 11 초 후에 가압기의 압력이 가압기 고압력(HPP) 정지 설정치 압력인 16.53 MPa에 도달하여 가압기 고압력에 의해 원자로 정지신호가 340 초에 발생하였다. 이와 동시에 급수유량은 공급이 중단되었으며, 노심 출력은 원자로 정지가 되면서부터 급격히 감소한다. 피동잔열제거 작동신호(PRHRAS)는 원자로냉각재펌프의 정지 후 13 초에 이루어졌으며, PRHR 격리밸브의 개방은 PRHRAS 발생 4 초 후인 17 초에 이루어지고, 급수관 및 주중기관 격리밸브의 폐쇄는 PRHRAS 발생 9 초 후인 26 초에 이루어졌다.

Table 1. Major sequence of CLOF test.

Event	Trip Signal and Set-point	
	SMART	VISTA ITL
Transient occurs	Pump Coastdown	
Reach HPP set-point	HPP(=16.53 MPa)	
HPP reactor trip signal	HPP+1.1 s	HPP+0.66 s
PRHR actuation signal	HPP+1.1 s	HPP+0.66 s
Control rod insert	HPP+1.6 s	HPP+0.96 s
PRHR IV open	PRHRAS+5.0 s	PRHRAS+3.0 s
MSIV/FIV close	PRHRAS+15.0 s	PRHRAS+9.0 s

Table 2. Test results of major sequence.

Event	DAS time (s)	After Trip (s)
Pump Coastdown	328	0
Reach HPP set-point	339	11
HPP reactor trip signal	340	12
- FW Stop	340	12
PRHR actuation signal (PRHSAS)	341	13
Reactor Trip	341	13
PRHR IV open	345	17
MSIV/FIV close	354	26

Fig 1(a)은 CLOF 사고 시 노심의 출력을 보여주고 있다. 원자로냉각재펌프의 정지 후급격히 감소함을 보여주고 있다.

Fig. 1(b)은 원자로냉각재시스템의 압력을 보여주고 있다. 원자로냉각재 유량 완전 상실사고의 경우 원자로 정지는 가압기 고압력에 의하여 이루어진다. 가압기 압력은 원자로냉각재 유량 완전 상실사고 발생 직후 발생하는 노심 출구 온도의 상승에 의해 일차계통 냉각재의 부피 팽창으로 인하여 증가하고, PRHRAS가 가동되면서 빠르게 감소하는 경향을 보였다.

Fig 1(c)은 RCS 유량으로서 원자로냉각재펌프 Coastdown 시작 후 17 초에 PRHRAS 작동 신호가

발생되면서 RCS 유량은 사고 초기에 급격히 감소하였으며, 이후 자연순환에 의해 일정한 유량을 형성하였다. 자연순환 유량은 실험 종료 시점까지 원자로냉각재펌프에 의한 강제순환 정격 유량(2.62 kg/s) 대비 12.0%에 해당되는 약 0.315 kg/s를 유지하였다.

Fig. 1(d)은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 이차계통의 유량을 보여주고 있다. RCP 정지 후 13 초에 PRHR 작동 신호가 발생되었으며 피동잔열제거계통의 격리밸브가 작동되면서 수 초 이내에 자연순환이 이루어졌다. 자연순환 유량은 과도기간을 거쳐 안정화된 후 일정한 속도로 시험 종료 시까지 0.016 kg/s로 정격 급수 유량(0.150 kg/s) 대비 10.6 %로 공급되었다.

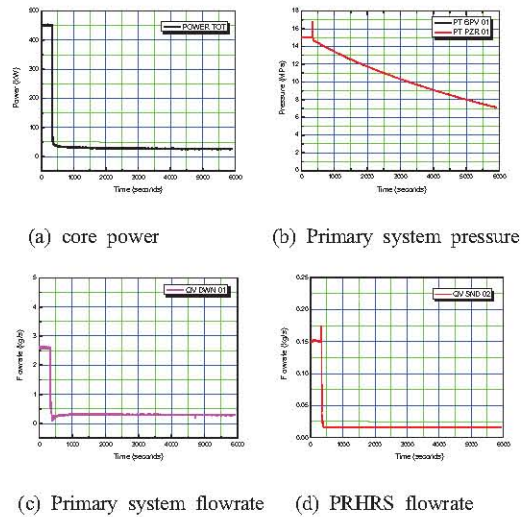


Fig. 1. Test results of the major parameter.

4. 결론

정상상태 조건은 시험요건서에 제시된 시험 초기 조건을 만족시키도록 운전되었으며, 노심 출력, 펌프 Coastdown, 히터 트립 및 잔열복선 인가, 급수 중단, PRHR의 작동이 CLOF 시나리오에 따라 적절히 모의되었다. 원자로냉각재시스템을 순환하는 자연순환 유량은 정격 유량(2.62 kg/s) 대비 12.0%에 해당되는 약 0.315 kg/s를 유지하였으며, PRHR 자연순환 유량은 이차계통 정격 유량 대비 10.6 %로 공급되어 안정적인 자연순환 유동이 형성되었다.

5. 참고문헌

[1] M. Ishii and I. Kataoka, "Similarity Analysis and Scaling Criteria for LWRs Under Single Phase and Two-Phase Natural Circulation", NUREG/CR-3267, ANL-83-32, 1983.