

SMART 연구로의 이차계통에 의한 열제거감소사고 해석

김수형, 정영중, 김희철

305-353, 대전시 유성구 덕진동 한국원자력연구소 유체공학연구부, ksh@kaeri.re.kr.

1. 서론

SMART 는 원자력연구소에서 설계한 열출력 330 MWt 의 중소형 가압경수로이다. 'SMART 연구로 (SMART-P)'는 SMART 의 성능을 검증하기 위하여 설계하고 건설을 추진하는 연구용 원자로이다. SMART 연구로 안전관련 설계기준사고 중 이차계통에 의한 열제거 감소사고를 원자로 가압관점에서 해석하였다.

2. 본론

2.1 사고개요

이차계통에 의한 열제거 감소 사고는 어떤 원인에 의하여 증기발생기 또는 기기냉각계통을 통한 열제거가 감소하면서 원자로냉각재계통의 온도와 압력이 증가하는 사건 또는 사고이다. SMART 연구로에서 안전관련 설계기준사고로 정의되는 열제거감소 사건/사고는 다음과 같다.

- 외부부하상실
- 터빈정지
- 복수기진공상실
- 주증기격리밸브폐쇄
- 비비상교류전원상실
- 정상급수유량상실
- 원자로건물내/외부의급수계통배관파단
- 기기냉각계통유량상실

사건/사고가 발생하면 압력이 증가하여 원자로의 건전성을 위협하지만 원자로냉각재 온도증가에 대한 반응도 쾌환으로 원자로의 출력이 감소하게 된다. 임계열속비율(CHFR)은 압력이 증가하는 영향으로 계속 증가하여 안전에 위협이 되지 않는다. 따라서 이차계통에 의한 열제거감소사고 해석의 주 관점은 원자로냉각재계통과 이차계통의 최대압력이 설정치 이하로 유지되는가를 확인하는 것이다.

원자로의 열수력 거동을 해석하기 위하여 TASS/SMR 코드를 사용하였다[1]. TASS/SMR 코드는 기본적으로 Node 와 Path 를 이용하여 SMART 연구로를 모델하며 노심 출력 및 열속, 유체 온도, 압력, 유량 변화, 임계열속비율 등을 계산한다. 사건 해석시 원자로 노심에서의 임계열속비율 거동은 TASS/SMR 코드에 부프로그램 (DNBR)으로 내장된 SSF-1 임계열속비율 상관식을 사용하였다[2].

초기조건은 SMART 연구로의 운전영역에서 원자로냉각재계통의 첨두압력이 최대가 되는 초기조건을 선택하였고, 단일고장으로 가장 제한적인 단일고장을 선택하였다.

2.2 사고해석 결과

외부부하상실, 터빈정지, 복수기진공상실, 주증기격리밸브 폐쇄 사건은 증기 유량이 감소 하거나 상실되는 사고이다. 증기 유량이 상실되었을 경우 주증기 고압력으로 인한 원자로 정지가 발생하고 주증기 고압력신호로 인한 피동잔열계통의 작동으로 원자로냉각재계통의 열이 제거된다.

비 비상 교류전원 상실사건이 발생하면 증기우회 제어계통, 급수펌프, 급수제어계통, 주냉각재펌프 등의 작동이 정지된다. 원자로냉각재펌프의 저속에 의하여 원자로 정지가 발생하고 급수저유량신호에 따라 피동잔열제거계통의 작동으로 원자로냉각재계통의 열제거가 이루어진다.

기기냉각계통 유량 상실사건이 발생하면 기기 냉각계통 저유량신호에 의하여 원자로가 정지된다. 기기냉각계통에서 제거하는 열량이 증기발생기에서 제거하는 열량에 비하여 매우 작으므로 원자로 냉각재계통압력관점에서 큰 영향을 미치지 못한다.

2.2.1 정상 급수 유량 상실사건

정상 급수 유량 상실사건은 한 대 또는 두 대의 급수펌프가 상실되거나 급수제어계통의 잘못된 신호에 의하여 급수제어밸브가 폐쇄됨으로써 발생한다. 원자로정지는 가압기고압력에 의하여 발생한다. 가장 제한적인 단일고장은 피동잔열제거계통 한트레인폐쇄고장이다. 그리고 원자로정지시 가장 큰 반응도가 가지는 하나의 제어봉 집합체가 고착되어 작동하지 않는 것과 소외전원상실을 동시 사건으로 가정하였다. 급수는 사건 초기 순간적으로 0이 된다고 가정하였다.

정상 급수 유량이 상실되고 8.87초에 가압기 고압력 설정치에 의한 원자로 정지신호가 발생하였다. 원자로냉각재계통 압력은 13.32초에 최대 압력 17.17 MPa 에 도달하였다. 증기발생기 압력은 사고 발생 후 301.93 초에 최대 압력 9.10 MPa 에 도달하였다. 원자로냉각재계통과 이차계통의 최대 압력이 18.7 MPa 보다 낮게 유지되었다. 최소 임계열속비율은 사고발생 이후 원자로냉각재계통 압력이 증가하기 때문에 과도 전 기간동안 초기값 이상으로 유지되었다.

2.2.2 급수계통 배관 파단사고

원자로건물 내/외부의 급수계통 배관 파단사고는 원자로건물 내부 또는 외부에 위치한 급수계통 배관의 부분 또는 완전 파단에 의하여 발생된다. 급수계통 배관이 파단되면 파단이 발생한 증기 발생기에 있는 유체가 파단면으로 역류하여 방출된다. 그러나 급수관의 각 구역배관(Section Pipe)에는 역류방지밸브(Check Valve)가 설치되어 있기 때문에 건전한 급수관의 유체는 파단면으로 역류하지 않는다. 파단이 발생하면 원자로 냉각재의 열을 충분히 제거할 수 없게 되어 냉각재의 온도와 압력이 증가하게 되어 원자로정지가 가압기 고압력 또는 주증기 저압력에 의하여 발생한다. 가장 제한적인 단일고장은 가압기안전밸브한개의 폐쇄고장이다. 그리고 원자로 정지시 가장 큰 반응도가를 가지는 하나의 제어봉집합체가 고착되어 작동하지 않는 것과 소외전원 상실을 동시사건으로 고려하였다. 보수적인 계산을 위하여 다음과 같은 가정을 추가 하였다.

- 파단된 증기발생기를 통한 열전달은 0이다.
- 파단된 증기발생기로 증기가 우회하지 않는다.
- 파단이 발생하면 급수유량은 상실된다.

원자로건물 급수계통 배관이 파단되어 증기발생기에 의한 열제거가 감소되면서 원자로 냉각재계통의 온도와 압력이 증가하여 14.31 초에 원자로 냉각재계통 최대압력 17.54 MPa에 도달하였다. 가압기안전밸브는 가압기의 압력이 17.51 MPa 이상이 되는 시점인 14.13 초에 개방되었다가, 가압기 압력이 13.86 MPa 이하로 떨어지는 16.12 초에 닫혔다. 건전한 증기발생기의 압력은 사고 발생 305.36 초 후에 최대압력 9.08 MPa에 도달하였다. 따라서, 원자로 냉각재계통과 이차계통의 최대압력이 18.7 MPa 보다 낮게 유지되었다. 임계열속비율은 사고발생 이후 원자로 냉각재계통 압력 증가로 인해 초기값 이상으로 유지되었다.

3. 결론

이차계통에 의한 열제거 감소사건의 해석결과를 그림 1에 나타내었다. 해석결과 급수배관 파단사고와 정상 급수유량 상실 사건이 원자로 냉각재계통의 압력 관점에서 가장 제한적인 것으로 나타났다. 모든 사건 및 사고는 사고 발생시 원자로 냉각재계통과 이차계통의 최대 압력이 18.7 MPa 보다 낮게 유지되므로 계통의 건전성이 보장되는 것으로 나타났다. 또한 최소 임계열속비율은 제한치인 1.3 이상으로 유지되었다.

참고문헌

- [1] 윤한영 외, TASS/SMR 열수력 모델 기술서, KAERI/TR-1835/2001
- [2] 황대현, SMART 연구로 노심에 대한 CHF 상관식 체계 개발, 기술보고서, 한국원자력연구소, 발간예정

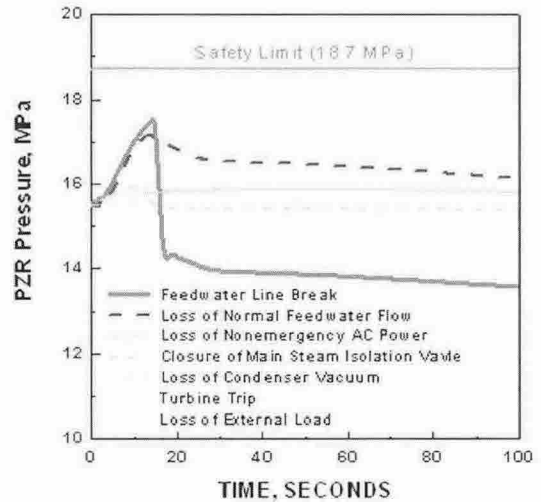


그림 1. SMART 연구로의 이차측에 의한 열제거 감소 사고의 가압기 압력 변화