

## SMART 연구로 가열운전 해석

이성욱, 정영중, 김희철

대전시 유성구 덕진동 150, 한국원자력연구소 lesw@kaeri.re.kr

### 1. 서론

현재 원자력연구소에서는 330MW 일체형 원자로 SMART [1]의 실증을 위한 연구로인, 65MW 급의 SMART 연구로를 개발하고 있다. SMART 연구로는 SMART 와 유사하게 주냉각재펌프, 증기발생기, 가압기등의 주요 기기들이 원자로용기내에 위치해 있는 일체형원자로이다.

SMART 연구로는 그 특성상 주냉각재펌프가 상용로에 비해 작아서 상용로처럼 펌프열을 이용한 가열운전이 불가능하다. 유일한 대안은 노심에서 발생하는 열을 이용하는 것이고, 이를 위해 노심기동운전-가열운전이라는 고유한 운전절차를 취하고 있다.

노심기동운전을 통해 노심을 임계상태로 만들고 이후 노심에서 생산되는 열을 이용해 냉각재의 온도를 출력운전이 가능한 상태로 높이는 것이 가열운전이다.

본 논문에서는 SMART 연구로를 위해 제시된 가열운전 개념과 절차 [2], 그리고 일체형원자로 성능 및 안전해석코드인 TASS/SMR [3]을 이용하여 SMART 연구로의 특성을 분석하였다.

### 2. 가열운전 개념

가열운전은 기본적으로 노심에서 발생하는 열을 이용하여 냉각재의 온도를 높이는 운전이다. 이를 위해 이차측은 정격유량의 5%인 급수유량을 일정하게 흐르게 하여 일차측 정격출력의 5%에 해당하는 열을 항상 제거할 수 있도록 한다.

이때 노심에서 발생하는 출력을 5% 이상으로 설정하면 이차측으로 제거되고 남은 열이 냉각재의 가열에 쓰이게 된다.

가열운전이 진행되는 동안 이차측은 과냉상태이던 급수가 일차측으로부터 전달되는 열을 흡수하여 증기발생기에서 비등이 발생하고, 가열운전 후반기에는 증기발생기로부터 과열증기가 생산된다. 이렇게 이차측의 열수력학적 상태가 변하면 열전달의 특성이 많이 바뀌게 되고 일차측의 냉각재 온도 증가율에도 영향을 미친다. 그런데 구조물들의 열적 피로도 측면에서 보면 되도록 일차측의 가열율이 일정하게 유지되는 것이 좋다. 이를 위해 이차측에 비등이 발생하는 시점에 출력 설정값을 바꾸어 주면 가열율이 많이 바뀌는 것을 방지할 수 있다.

현재 가열운전의 개념에는 두가지의 보조운전이 필요하다. 하나는 원자로 상부공동(Upper

Annular Cavity : UAC)의 수위제어운전이고, 나머지 하나는 원자로냉각재계통 가압을 위한 질소충진운전이다.

SMART 연구로에서는 가열운전시 냉각재 온도 상승에 의한 팽창 효과를 고려하여 UAC 의 일부까지만 냉각재를 채워놓고 운전을 시작한다. 이때 UAC 를 너무 많이 비우면 그 아래 주냉각재펌프의 냉각재흡입구가 노출될 위험이 있어 최소한 60%정도의 수위는 유지하여야 한다. 그런데 이 상태로 그대로 가열운전을 수행하게 되면 가열운전이 끝난 후 중앙공동(End Cavity : EC)이 물로 가득 찰 가능성이 있기 때문에, 가열운전이 시작되고 냉각재의 온도가 180°C 이하일 때는 UAC 의 수위를 60%로 유지하기 위해 냉각재를 배수하면서 운전을 진행한다.

또 수위제어를 위해 냉각재의 배수가 이루어지기 때문에 냉각재의 온도는 계속 올라가는 반면에 냉각재의 압력은 많이 상승하지 않는다. 따라서 자칫하면 냉각재의 비등이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 냉각재의 온도가 180°C 가 되면 가스실린더를 통해 질소를 주입하여 원자로 냉각재계통을 가압시키게 된다.

### 3. TASS/SMR 을 이용한 가열운전 모의 결과

SMART 연구로의 가열운전을 모의하기 위한 TASS/SMR 모델이 그림 1 과 같다.

가열운전은 모의해야 할 시간 자체가 길고, 또 계통이 극심한 과도상태를 겪으므로 계산시간이 오래 걸린다. 따라서 모의를 위한 계통의 구성을 최대한 단순하게 하여 그림과 같이 36 개의 노드와 39 개의 유로를 가진 모델로 구성하였다.

해석은 노심기동운전이 완료된 시점에서 시작된다. 초기의 출력 설정값은 5%로 하고 냉각재의 온도가 180°C 에 도달하면 6.5%로 바꾸어 주었다. 총 모의 시간은 35000 초로 하였다. 가열운전중 노심의 출력이 40% 이상으로 증가하면 원자로 정지신호가 발생하기 때문에 노심 출력은 40% 이하로 유지되어야 한다.

실제 플랜트에서는 가열운전중 이차측 증기발생기의 출구노즐에서의 증기압력이, 0.8MPa 이 되면 복수기 진공운전을 시작하고, 1.6MPa 이 되면 증기압제어계통을 작동하여 증기압의 제어를 시작한다. 하지만, 본 해석에서는 급수유량 및 온도와 터빈입구 증기압을 경계조건으로 사용했기 때문에 실제 발전소와 같은 증기의 거동을 기대할 수 없다.

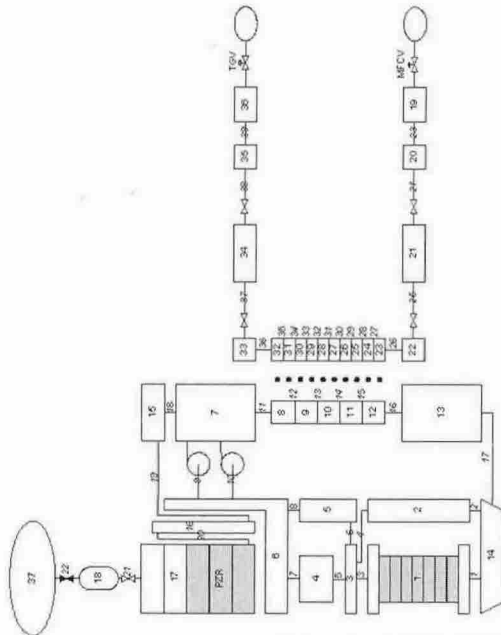


그림 1 SMART 연구로 가열운전 모의를 위한 TASS/SMR 모델

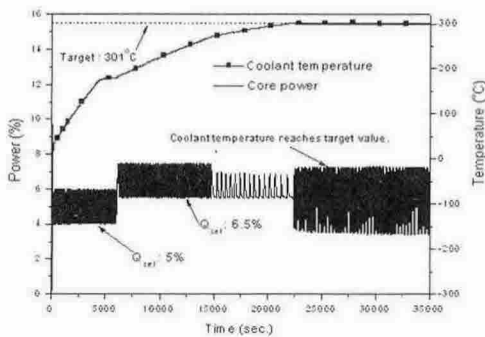


그림 2 SMART 연구로 가열운전 모의 결과 노심출력과 냉각재 온도의 변화

따라서 인위적으로 터빈 입구 유로에 밸브모형을 구성하여 냉각재온도가 180°C 이하일때는 증기노즐 출구 압력을 0.8MP, 이상일때는 1.6MP로 제어하도록 하였다.

그림 2 에는 가열운전 모의 결과가 나타나 있다. 운전시작 초기에 출력이 약 10% 정도까지 상

승하였다가 설정값인 5% 부근에서 진동하는 것을 볼 수있다. 이후 약 6000 초에 출력 설정값이 6.5%로 바뀐 것을 볼 수 있는데 이는 이 시간에 냉각재의 온도가 180°C에 도달했기 때문이다.

냉각재의 가열율을 보면 처음 약 5000 초까지는 기울기가 급하다가 완만한 상승을 하는 것을 볼 수 있다. 초기에는 이차측이 과냉상태라서 제거되는 열이 상대적으로 적기 때문에 냉각재 가열이 잘되는 것이다. 하지만 이차측에서 비등이 일어나게 되면 가열에 쓰일 열이 줄어들기 때문에 출력 설정값을 높였는데도 불구하고 가열율이 줄어들게 된다.

약 22000 초 (6 시간) 정도에 냉각재 온도가 목표값인 301°C에 도달한다. 전체적인 평균 가열율은 46.5°C/시간 이다.

#### 4. 결 론

TASS/SMR 코드를 이용한 가열운전 분석결과에 의하면 SMART 연구로는 가열운전중 경보값이나 원자로 정지신호의 발생없이 목표값에 도달할 수 있었다. 가열운전기간중 노심출력이 진동하는 것을 볼 수 있는데, 이는 출력 진동이 물리적 현상인지 코드의 계산상 문제인지에 대한 보다 상세한 분석이 요구된다. 만약 이 현상이 물리적 현상이라면 출력제어논리의 최적화를 통하여 개선할 수 있을 것이며, 이를 통해 SMART 연구로의 가열운전 최적화에 기여할 수 있을 것이다.

#### REFERENCES

- [1] 일체형원자로(SMART) 기본설계 보고서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2142/2002, 2002.
- [2] 서재광 외, SMRAT 연구로 원자로냉각재계통 가열운전절차 개발, KAERI/TR-2642/2003, 2003.
- [3] 윤한영 외, TASS/SMR 열수력 모델 기술서, KAERI/TR-1835/2001, 2001