

## 대용량 피동형원자로의 안전계통 성능 분석

김성오, 황영동, 정병렬, 최철진, 정법동, 장문희

한국원자력연구소

### 요 약

피동형원자로 AP600을 참조발전소로하여 설정된 1000MWe급 대용량 피동형원자로의 계통개념에 대한 안전계통 성능 평가 및 코드의 적용성 평가를 목적으로 RELAP5.MOD3코드를 사용하여 대형냉각재상실사고를 모의 해석하였다. 피동형 안전계통으로 축압기, CMT, IRWST를 모델하였으며 가압기에 연결된 1단계부터 3단계까지의 자동감압밸브계통을 모델링 하고 4단계 자동감압밸브계통은 각 루프의 고온관에 연결되어 있는 것으로 모델링 하였다. 피동형 안전계통의 모델이 향상된 RELAP5/MOD3.2와 그 이전의 코드인 RELAP5/MOD3.1의 냉각재상실사고 모의계산결과 원자로내의 압력변화, 노심냉각수 주입유량 및 핵연료 피복재 온도 거동이 거의 유사하게 나타났으며 1000MWe급 대용량 피동형원자로의 안전계통은 냉각재 상실사고시 충분한 노심냉각능력을 가지는 것으로 분석되었다.

### 1. 서 론

피동형 원자로는 능동형 원자로와는 달리 사고시에 중력과 밀도차이에 의해 작동되는 자연대류 방법과 압축공기와 같이 외부전원이 필요 없는 계통과 기기로 구성되어 있기 때문에 원자로용기 및 격납용기 등의 크기에 제한을 받아 용량이 작은 300~600MWe급의 중소형으로 개발되고 있다. 중소형 피동형원전은 우수한 안전성 확보기술에 의한 높은 안전성 확보와 계통의 신뢰도 향상에 의한 운전성 및 경제성 향상에도 불구하고 용량이 작은 단점으로 인하여 전력사업자들이 피동형원전의 건설을 회피하는 주요 요인이 되고 있다. 따라서 피동형원전의 용량에 따른 단점을 극복하기 위해서는 중소형의 피동형원자로는 가지는 장점을 최대한 유지하면서 용량격상이 가능한 피동형원전의 출력증대에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 신형원자로 계통개념 연구[1]에서 선정된 1000MWe급 피동형원자로의 안전계통의 성능평가를 목적으로 미국의 INEL에서 개발한 RELAP5.MOD3 코드를 이용하여 냉각재상실사

고에 대한 분석을 수행하였다. 계통개념연구에서는 Westinghouse사의 AP600을 참조노형으로하여 AP600이 보유한 장점을 최대한 유지하도록 1000MWe급 대용량 피동형원전(KP1000)의 계통개념이 설정되었으며, 또한 RELAP5/MOD3의 피동형원자로 열수력해석에의 적용성 평가 및 안전계통 설계인자들의 변화에 따른 민감도 분석 등 관련 연구가 수행되었다[2]. 본 연구에서는 이들 선행연구결과를 바탕으로 계통개념연구에서 설정된 1000MWe급 대용량 피동형원전의 설계기준사고 중 비상노심냉각계통의 성능을 결정하는 대형냉각재상실사고를 RELAP5/MOD3코드를 이용하여 해석하고 그 결과를 분석하여 대용량 피동형원자로의 안전계통에 대한 성능을 평가 하였다.

## 2. 분석모델

### 2.1 계통구성 및 작동개념

대용량 피동형원자로(KP1000)의 기본설계개념은 AP600과 유사하게 피동형 안전설비를 포함한 원자로냉각재 계통으로 구성된다. 원자로냉각재계통은 3-loop로 구성되어 있으며 용량증대에 따라 원자로 용기의 크기가 증대되었다. 노심은 피동형 안전계통의 설계특성을 고려하여 저밀도 노심으로 구성되며 원자로 용기는 193개의 핵연료 집합체를 사용하는 웨스팅하우스사 4-Loop 발전소와 동일한 크기로 설정하였다. 증기발생기는 I-690 재질의 튜브를 사용하고 증기발생기 관막힘율이 10%에서도 이차측의 증기압이 780 psia이상이 유지되도록 크기가 결정되었다. 원자로냉각재계통 온도제어는 저온관의 온도를 일정하게 유지하고 고온관의 온도를 출력에 따라 변화시켜서 비교적 완만한 Sliding Tavg를 갖는 방법을 채택하였다. 안전설비는 피동안전주입계통, 피동잔열제거계통, 안전감압계통, 피동격납용기 냉각계통 등으로 구성되어 있으며 사고시 격납용기 내부로 방출된 에너지는 금속재격납용기를 통하여 최종 열침원인 대기중으로 열을 방출하도록 설정하였다. 대용량 피동형원전의 계통구성 및 작동개념은 참고문헌[1]에 상세히 기술되어있다.

### 2.2 분석 모델

그림 2는 대용량 피동형원전의 비상노심냉각계통의 성능을 평가하기 위하여 설정한 분석모델로서 3개의 루프를 각각 독립적으로 모델링하였다. 각 루프에 고온관, 증기발생기, CMT, 축압기 및 2개의 저온관과 두개의 펌프를 모델 하였으며 증기발생기는 출구측 플레넘을 둘로 나누어 각각 캔드모터를 사용하는 펌프의 입구측과 연결하였다. 루프1에는 가압기와 가압기에 연결된 1단계부터 3단계까지의 자동감압밸브계통을 모델링 하였으며 4단계 자동감압밸브계통은 각 루프의 고온관에 연결되고, 가압기 방출관과 DVI 라인 사이에 IRWST를 모델링 하였다. 원자로용기는 하부 플레넘, 노심, 반사재, 핵연료 안내관, 상부 플레넘 및 원자로 헤드를 각각 모델 하였으며

Downcomer는 주입된 냉각수의 우회현상과 이에 따른 냉각수의 노심내 주입량의 감소를 고려하기 위하여 원주형 방향으로 3개의 Section을 도입하고 서로 Cross Flow Junction으로 연결하였다. 원자로심은 20개로 모델하였으며 평균노심 채널 외에 고온채널을 모델하여 각각 Cross Flow Junction으로 연결하여 Mixing 영향을 고려할 수 있게 하였다. 핵연료 및 IRWST의 열교환기는 물론 주요 기기를 구성하는 열 구조물도 함께 모델하였다.

### 2.3 가정 및 초기조건

정상상태의 원자로 열출력은 3,125MWt로 가정하였으며 붕괴열 모델로는 1.2배의 ANS73 모델이 사용되었다. 노심의 열구조물은 1개의 고온핵연료봉, 263개의 핵연료봉으로 구성된 고온핵연료 다발과 192개의 평균핵연료 다발로 모델링 되었으며 축방향 출력분포는 1.55 chopped cosine shape을 가정하였다. 정상상태시 1개의 고온관 유량은 10,307 lbm/sec, 노심의 우회유량은 전체원자로 유량의 약 7.46%로 가정하였다. IRWST는 격납용기 대기에 노출되어 있으며 액체체적은 350,000 gal으로서 온도는 90°F로 가정되었다. CMT는 100°F의 냉각수가 2000ft<sup>3</sup>로 채워져 있는 것으로 가정하였다. 과단부위의 배출유량계수는 과냉각, 포화, 과열증기상태에 대하여 모두 1.0의 값이 적용되었다.

### 3. 해석결과 및 분석

대용량 피동형원자로 KP1000의 안전계통 성능 평가를 위하여 저온관이 완전과단되는 대형냉각재 상실사고를 대상으로 분석하였다. 최신 version인 RELAP5 MOD3.2는 Reflood Option을 사용하는 경우 계산에 실패하였기 때문에 Reflood 모델을 사용하지 않고 계산을 수행하였다. Reflood 모델을 사용하는 경우와의 해석결과를 비교하기 위하여 RELAP5/MOD3.1에 의한 병행계산을 수행하였다. 그러나 RELAP5/MOD3.1의 경우 재관수의 시작과 함께 격납용기를 모의한 volume의 비응축성 기체가 과단부위를 통해 원자로내로 유입되어 계산의 실패가 발생하므로 격납용기모델에는 비응축성 기체가 존재하지 않는 것으로 가정하여 계산을 수행하였다. 이들 해석 결과를 비교한 결과 원자로내의 압력변화, 노심냉각수 주입유량 및 핵연료 피복재 온도 거동이 매우 유사하게 계산되었으며 별다른 차이점을 발견하지 못하였다. 대용량 피동형원자로 KP1000은 능동형 원자로 보다 노심열출력비가 낮기 때문에 안전설비에서 주입된 냉각수가 과단부위로 우회되는 유량이 감소하고 노심으로의 유동이 보다 잘 형성되어 효과적으로 노심을 냉각하였기 때문에 재관수시 핵연료 피복재 온도가 원출시보다 훨씬 작게 상승하였다. 따라서, 핵연료 피복재에 대한 이차원 열전달 모델로 특성되는 재관수 모델의 영향이 미미하였다.

이들 해석결과를 바탕으로 피동형원자로의 대형냉각재 상실사고의 사고진행과정을 살펴보면 사고 직후 파단부위를 통한 과냉각상태의 냉각재 방출로 일차계통의 압력이 급격히 감소되며 압력이 포화상태까지 떨어지면 기포가 발생하여 압력감소율이 둔화된다. 가압기 압력이 설정치 이하로 떨어지면 안전주입 신호가 발생하여 CMT의 냉각수 주입이 개시된다. 일차계통압력이 더욱 감소하여 축압기 주입설정치 이하로 떨어지면 축압기의 냉각수가 DVI배관을 통하여 원자로용기내로 주입된다. 피동형원자로의 경우 대형냉각재 상실사고시 사고초기의 CMT로부터 주입되는 냉각수만으로는 노심을 충분히 냉각할 수 없으므로 축압기의 냉각수가 고갈되기 이전에 노심이 재관수 되어 핵연료가 냉각되는 상태를 보여야 하므로 분석시간을 축압기로부터의 냉각수 주입 이후 노심이 충분히 냉각될 때까지 수행하였다.

그림 2는 안전주입배관을 통한 주입유량에 대한 해석결과로서 가압기 저압력에 의하여 원자로가 정지되고 동시에 CMT 연결배관의 밸브가 개방되어 CMT 로 부터의 냉각수 주입이 개시되었다. 그러나 이 주입유량은 파단부위를 통한 냉각수 유출량에 비하여 매우 작아 노심의 냉각을 유지하기에 불충분하다. 노심에 기포가 발생하기 시작하면 압력감소는 다소 둔화되나 지속적인 파단유출로 인하여 압력이 계속 감소되어 결국 축압기로부터의 냉각수 주입이 개시된다. 이때 축압기로부터 주입된 냉각수는 다시 노심을 채우기 시작하며 핵연료는 냉각상태를 회복한다.

그림 3은 20개로 모델한 노심의 중심부위 3개 노드에 대한 핵연료 피복재의 온도거동으로서 파단발생 직후 blowdown시기에는 초기 핵연료내부의 저장에너지를 CMT로 부터 주입된 냉각수만으로는 충분히 제거할 수 없기 때문에 핵연료가 가열된다. 핵연료 내부의 잠열의 소진과 함께 CMT 및 축압기로부터의 냉각수 주입에 의하여 핵연료가 다시 냉각되지만 지속적인 파단유출로 인한 노심노출과 핵연료의 붕괴열에 의하여 피복재가 다시 가열되기 시작한다. 그러나 지속적인 냉각수 주입으로 인하여 결국 노심은 냉각수로 채워지게되며 핵연료는 냉각상태로 회복된다. 축압기 고갈이후에도 CMT로부터 냉각수 주입이 다시 개시되어 핵연료는 냉각상태로 유지되고 있음을 알 수 있다.

해석결과 KP1000의 경우 원자로 용기의 크기 증대, 저출력 밀도노심과 노심냉각수의 원자로 용기 직접 주입 등의 영향으로 대형냉각재 상실사고시 사고완화를 위한 노심냉각수의 주입이 원활하게 이루어 지고 있는 것으로 나타났다. 계산된 최대피복재 온도는 1231°F(939.1K) 로 blowdown 기간중에 나타났으며 노심냉각수의 주입이 원활하게 이루어져 재관수 기간중 핵연료의 가열정도는 미미하게 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 이들 결과는 파단부위의 배출유량계수  $Cd=1.0$ 으로 가정하여 해석한 결과로써 최종적인 결론을 위하여는  $Cd=0.4 \sim 1.2$  범위에 대한 민감도 분석이 필요하다.

#### 4. 결 론

가압경수형 피동형 원자로형인 미국 Westinghouse사의 AP600을 참조 발전소로하여 설정된 1000MWe급 대용량 피동형원자로 계통개념의 안전주입계통에 대한 성능 및 코드의 적용성 평가를 목적으로 RELAP5/MOD3코드를 사용하여 저온관이 파단되는 대형냉각재상실사고를 모의 해석하였다. RELAP5/MOD3.2의 경우 Reflood Option을 활성화 시키는 경우 계산실패가 발생하였으며 RELAP5/MOD3.1의 경우에는 격납용기의 비응축성 기체를 모의하는 경우 계산 실패가 발생하였다. Reflood 모델을 사용하지 않은 RELAP5/MOD3.2 계산결과와 비응축성 기체가 존재하지 않는 것으로 가정한 RELAP5/MOD3.1의 계산결과를 비교한 결과 원자로내의 압력변화, 노심냉각수 주입유량 및 핵연료 피복재 온도 거동이 거의 유사하게 나타났으며 냉각재 상실사고시 충분한 노심냉각능력을 가지는 것으로 계산되었다. 그러나 이 결과는 파단부위 방출계수  $C_d=1.0$ 의 경우로써 향후 방출계수  $C_d=0.4 \sim 1.2$  범위에 대한 민감도 분석을 수행할 계획이다.

#### 5. 참고 문헌

- [1] 장문희 등, "신형원자로 계통개념연구", KAERI/RR-1483/94, 한국원자력연구소, 1995
- [2] 장문희 등, "신형원자로 계통분석기술연구", KAERI/RR-1496/94, 한국원자력연구소, 1995

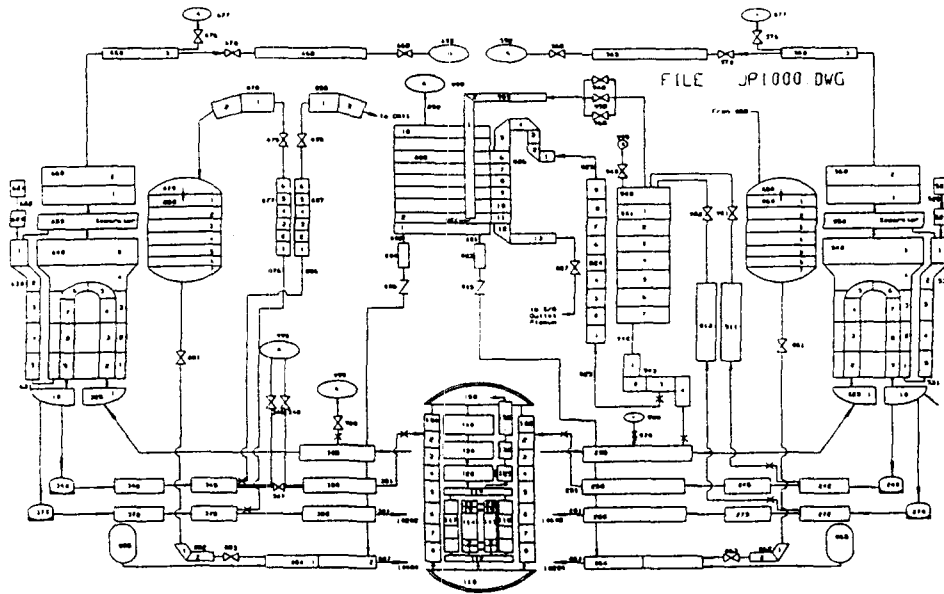


그림 1. 1000MWe급 피동형원전의 RELAP5 Nodalization

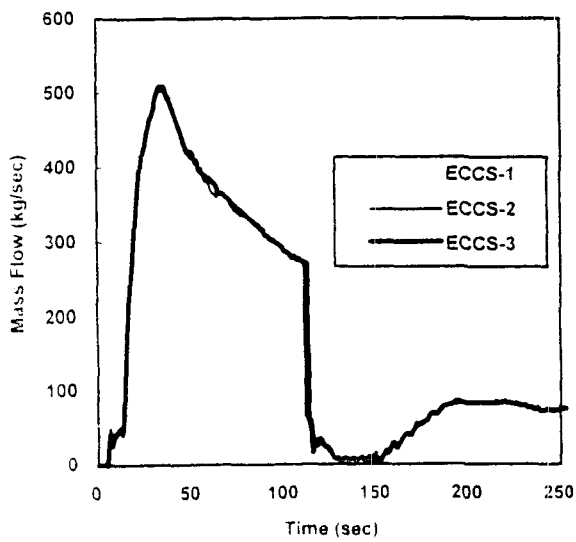


Fig. 2 Safety Injection Flow

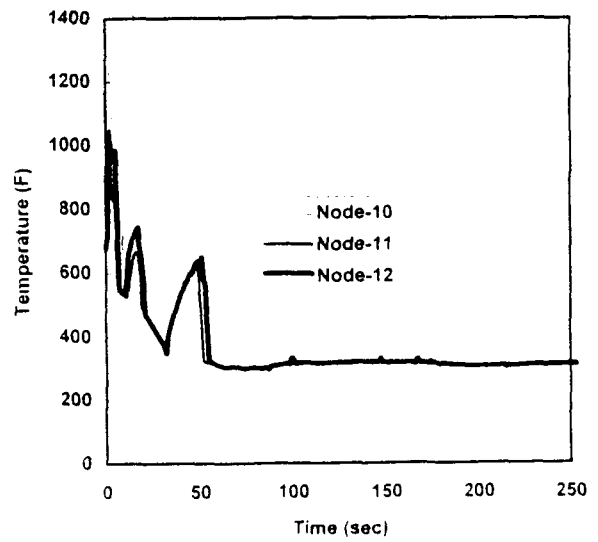


Fig. 3 Cladding Surface Temperature