

영광 3호기 자연대류 시험 분석을 통한 TASS 1.0 코드 검증

엄길섭, 이병일, 김희철, 심석구

한국원자력연구소

정한영, 이방진

한국전력공사

요 약

실제 발전소의 거동을 정확히 예측하여 코드 내장모델의 적합성을 증명하는 것은 원전계통 분석코드 검증에 필수적이다. 이를 위하여 코드 분석결과와 비교할 만큼 측정정보가 충분한 영광 3호기 자연대류 시험을 선택하여 모의하였다. 사용된 원전계통 분석코드는 KAERI에서 최적 코드로서 개발한 TASS 1.0 코드이며, 운전인의 조치 및 증기우회밸브의 오동작 등이 고려되었다. 분석 결과, TASS 1.0 코드가 실제 발전소에서 수행된 자연대류 시험을 모의할 수 있으며, 아울러 최적코드로서 사용될 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

자연대류 시험 목적은 크게 네가지로 분류된다. 즉,

- 95% 이상의 부하가 감발되어도 (즉, 터빈 정지) 원자로출력 감발계통 (Reactor Power Cutback System)의 작동 없이 발전소가 안정한 고온대기 상태에 도달할 수 있는 능력을 확인하고,
- 터빈 정지 및 원자로 정지 후 증기우회 제어계통 (Steam Bypass Control System), 주급수 제어계통 (Feedwater Control System) 및 가압기 압력 및 수위 제어계통 (Pressurizer Pressure and Level Control System)들이 작동됨을 확인하며,
- 원자로출력 감발계통이 작동하지 않을 때, 이분의 보호계통 (Diverse Protection System)이 터빈 정지 신호에 따라 원자로를 정지시킬 수 있는지를 확인하고,
- 모든 주냉각제 펌프가 정지되어도, 출력 대 유량의 비율이 1 보다 작은 직렬한

자연대류 유량이 형성되어 노심을 냉각시킬 수 있음을 확인하는 것이 자연대류 시험의 목적이다.

아울러, 자연대류 시험이 만족해야 할 기준들은 다음과 같다.

- 터빈 정지 및 원자로 정지 후, 원전계통은 아래와 같은 제어계통의 적절한 작동으로 고온대기 상태로 안정되게 천이되어야 한다.
 - o 가압기 압력 제어계통은 가압기 압력을 1825 psia 이상으로 유지해야 하고, 가압기 수위 제어계통은 가압기 수위를 25 % 이상으로 유지해야 한다.
 - o 주급수 제어계통은 증기발생기 수위를 광역수위는 38.5% 이상, 협역수위는 90.8% 이하로 유지해야 한다.
 - o 증기우회 제어계통은 증기압력을 913 psia - 1250 psia 영역에서 유지시켜야 한다.
 - o 일/이차 계통의 안전밸브들은 개방되어서는 안된다.
 - o 안전주입 신호나 보조급수 주입 신호가 발생되어서는 안된다.
- 원자로출력 감발계통 작동 없이도, 터빈 정지가 발생하면 여분의 보호계통에 의해서 원자로 정지가 발생되어야 한다.
- 모든 주 냉각제 펌프들이 정지되더라도, 출력 대 유량의 비율이 1 미만이 되는 적절한 자연대류 유량이 형성되어야 한다.

한편, TASS 1.0 코드는[1] Westinghouse형 원전 뿐 만 아니라 CE형 원전에 대해서도 과도현상 안전성 분석을 수행할 수 있는 범용 최적코드로서 개발되었으며, 1차원 2군 확산모델을 사용하고 있어 축방향 출력분포가 변화하는 과도현상들도 분석할 수 있는 코드이다. 최적 분석코드 모델의 검증은 위해서는 발전소 실제 거동과 비교하는 것이 필수적이며, 이를 위하여 1995년 2월에 수행된 영광 3호기 시운전 시험 중에서 코드 분석결과와 비교 가능할 만큼 측정자료가 충분한 자연대류 시험을[2] 선택하여 모의하였다. TASS 1.0 코드 내장모델의 검증은 참고문헌 [1]에 상세히 기술되어 있다.

2. 자연대류 시험 모의 방법

자연대류 시험 모의를 위해 TASS 1.0 코드의 입력자료들은 표 1에 도시된 자연대류 시험초기 조건들에 맞도록 마련되었다. 자연대류 시험 실측자료는 영광 3호기 현장에서 Historical Data Log Report로부터 관심시간 동안 5초 간격으로 수집되었다. 한편, 주 냉각제펌프 및 주급수 펌프들은 운전원이 시험 중 시험절차에 따라 수동 정지시켰다. 영광 3호기에 대한 TASS 1.0 코드의 기본 입력자료를 생산할 때 화화 및 체적 제어계통은 모델링에서 제외되었으며, 주급수 제어계통

모델은 출력운전 중에만 적용될 수 있도록 마련되었는 바 고온대기 상태의 시험조건을 모사할 수 있도록 입력을 마련하였다.

따라서, 자연대류 시험을 TASS 1.0 코드로 모의함에 있어, 증기우회밸브의 개방 거동, 충전 및 유출유량 및 주급수 유량은 발전소 실제 거동에 따라 시간에 따른 유량으로 입력하였으며, 아울러 주냉각재 펌프의 정지에 대한 운전원의 조치도 해당 시각으로 입력하였다 (그림 1, 2, 3, 4). 발전소 거동에 따른 TASS 1.0 코드의 입력은 주 냉각재 펌프가 정지될 때 까지의 증기발생기 압력 거동들이 서로 일치되도록 준비되었으며, 한편, TASS 1.0 코드 모의계산은 터빈 정지시점 부터 45분 동안 수행되었다.

3. 자연대류 시험 모의 결과

자연대류 시험 동안 발생되었던 주요 사건들을 표 2에서 TASS 1.0 모의 결과와 비교하였으며, TASS 1.0 코드가 모의한 주요 계통변수들의 거동양상들을 그림 1부터 11 까지 발전소 실측치와 같이 나타내었다. 전반적으로 TASS 1.0 모의 결과가 주냉각재 펌프가 정지될 때 까지 (638초 - 654초) 발전소 시험 실측치와 매우 유사한 것으로 나타났으나, 그 이후로는 다소 다른 계통 거동들이 관측되었다.

먼저 노심출력의 경우, TASS 1.0 코드에서는 노심의 잔열을 계산하는 반면, 발전소의 증성자속 계측기는 원자로의 정지 후 잔열을 계측할 수 없는 까닭에 노심의 잔열 만큼의 차이를 보이고 있다 (그림 6).

한편, 그림 1에서 관측되듯이 터빈 정지후 증기유량은 발전소 실측치가 모의계산 결과보다 높게 나타나고 있다. 그러나, 일반적으로 영출력에서의 증기유량의 계측은 큰 오차를 포함하고 있어 신뢰도가 떨어지고, 만일 터빈 정지후 계측된 증기 유량이 사실이라면 10% 출력에 해당되는 열침원이 존재하는 것이므로 일/이차 계통은 지속적으로 냉각되어야 하는데 실제적으로 증기우회밸브들이 후에 추가로 개방되는 등 감압되지 않고 있다. 더우기, TASS 1.0 코드로 모의한 증기 발생기 압력은 실측치와 유사하므로, 터빈 정지 후 증기우회밸브를 통해 누출되는 증기유량을 제외한 발전소의 증기유량 실측치는 거짓 신호로 판단된다.

아울러, 발전소 실측자료에서는 주급수 펌프가 완전히 정지되는 시점 (1859 초) 훨씬 이전에 주급수 유량이 공급되지 않는 것으로 관측되고 있어 (~1200 초), 주급수 유량을 분석에 필요한 경계조건으로서 입력시킨 TASS 1.0로 모의된 증기발생기 수위의 증가는 발전소 실측치보다 낮게 관측되고 있다 (그림 7). 이는 급수유량 계측기가 계측하지 못한 유량이 1200 초 이후에도 증기

발생기로 계속 유입된 것으로 추측된다.

또한 그림 8에서 관측되듯이, 주 냉각제펌프가 정지한 이후에 TASS 1.0 코드로 모의한 고온관 온도는 발전소 실측치(~1200초) 보다 빨리 침투값으로부터 감소하기 시작하는 것으로 나타났다(~900초). 그러나, 이 시간 동안 TASS 1.0 코드가 계산한 저온관 온도는 발전소 실측치와 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있으며(그림 9), 또한 노심잔열의 변화도 거의 없다. 따라서, 고온관 온도에 영향을 미칠 수 있는 인자는 노심 상부에서의 유동모델 인 것으로 판단되었다. 즉, 이 시간 중 TASS 1.0 코드가 모의한 노심 상부에서의 유동변수들을 자세히 검토해 보면, 강제순환 유동(주 냉각제펌프 운전)의 경우에는 원자로 하향유로에서 노심덮개로 냉각제가 이동하나, 자연 대류 유동(주 냉각제펌프 정지)의 경우 오히려 반대 방향의 유동이 형성됨이 관측되었다. 따라서, 이러한 노심 상부에서의 유동변화가 고온관 온도의 차이를 야기시키는 것으로 추측된다.

한편, TASS 1.0 코드는 가압기 압력 및 수위를 다소 높게 모의하나, 시간에 따른 변화 양상은 매우 유사하게 모의함이 관측되었다(그림 10, 11).

마지막으로 그림 12에서는, 주 냉각제펌프가 정지된 후에 형성된 자연대류 유동을 TASS 1.0 코드가 모의한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 관측되듯이, 모의된 출력 대 유량의 비율이 1 미만으로서 발전소 시험 수행동안 자연대류에 의해 노심이 냉각되고 있음을 확인할 수 있었으며, 한편 시험 종료 후 측정된 출력 대 유량 비율과 비교해서 20% 이내에서 일치하는 계산결과를 (표 2) 얻었다.

4. 결 론

결론적으로, TASS 1.0 코드가 자연대류 시험 결과를 매우 유사하게 모의함을 관측하였으며, 이에 따라 TASS 1.0 코드의 최적 계통분석코드로서의 적합성을 검증하였다. 그러나, 주냉각제 펌프가 정지되어 원자로 용기에 유입되는 냉각제의 유량이 매우 적을 경우에 원자로 용기 내부에서 역방향 유동이 형성되어 발전소 실측자료와 부분적인 차이를 보이므로, 저 유량시 원자로용기 내부에서의 냉각제 유동에 대해 상세히 연구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 심석구 외, "원전 계통분석코드 TASS 개발," KAERI/RR-1468/94, 1995. 7. 20.
2. Test Procedure for PAT Turbine Trip (without RPCS), 3S-I-000-25, Rev. 0.

표 1. 영광 3호기 자연대류 시험의 초기조건

| 주요인자 | 값 |
|-------------|----------------|
| 노심 출력 | 98.61 % |
| 노심 입구 온도 | 565.295 F |
| 일차냉각재 유량 | 36665 lbm/s |
| 주냉각재 펌프속도 | 1192.6 rpm |
| 가압기 압력 | 2237 psia |
| 가압기 수위 | 17.7 ft |
| 증기 발생기 압력 | 1111.5 psia |
| 증기 발생기 수위 | 38.591 ft |
| 주급수 엔탈피 | 432.27 Btu/lbm |
| 노심 제어 계통 | 자동 |
| 가압기 압력 제어계통 | 자동 |
| 가압기 수위 제어계통 | 수동 |
| 주급수 유량 제어계통 | 수동 |
| 증기 우회 제어 계통 | 수동 |

표 2. 영광 3호기 자연대류 시험 진행 과정

| 시간 (초) | | 사건 | 값 | |
|----------|-------|----------------|-----------|---------|
| TASS 1.0 | 실측치 | | TASS 1.0 | 실측치 |
| 0. | 0. | 터빈 정지 | | |
| 0. | 0. | 원자로 정지 | | |
| 1. | 1. | 최대 가압기 압력 | 2358 psia | No data |
| 3. | 3. | 증기우회밸브 1차 개방 | | |
| 6. | 6. | 증기우회밸브 1차 폐쇄 | | |
| 50. | 49. | 증기우회밸브 2차 개방 | | |
| 375. | 374. | 증기우회밸브 3차 개방 | | |
| 595. | 595. | 주냉각재펌프 1 정지 | | |
| 631. | 631. | 주냉각재펌프 2 정지 | | |
| 638. | 638. | 주냉각재펌프 3 정지 | | |
| 644. | 644. | 주냉각재펌프 4 정지 | | |
| 650. | 650. | 주급수펌프 02K 수동정지 | | |
| (-) | 1359. | 출력 대 유량 비율 | ~ 0.41 | ~ 0.47 |
| 2700. | 2684. | 시험 종료 | | |

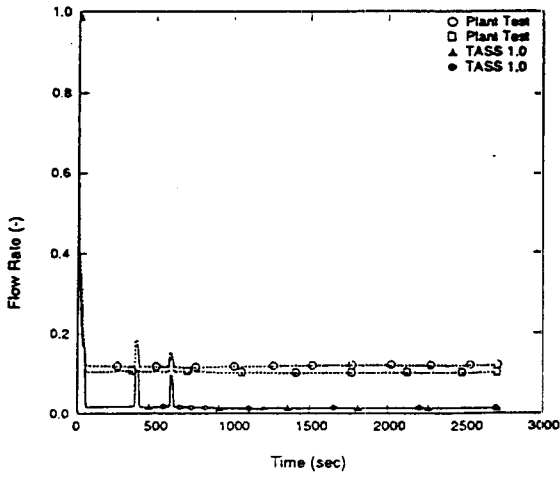


그림 1 증기발생기 증기유량

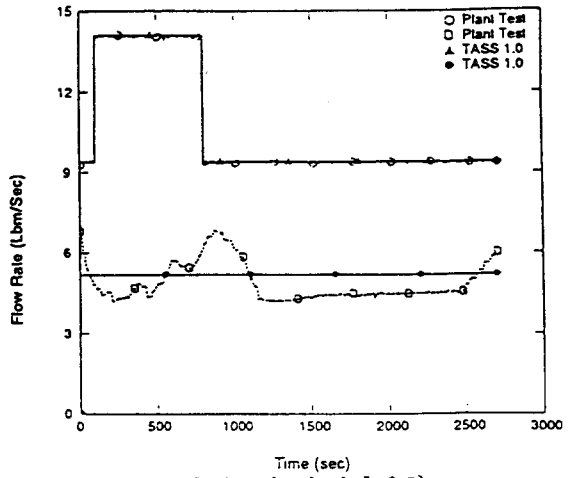


그림 2 충전유량 및 유출유량

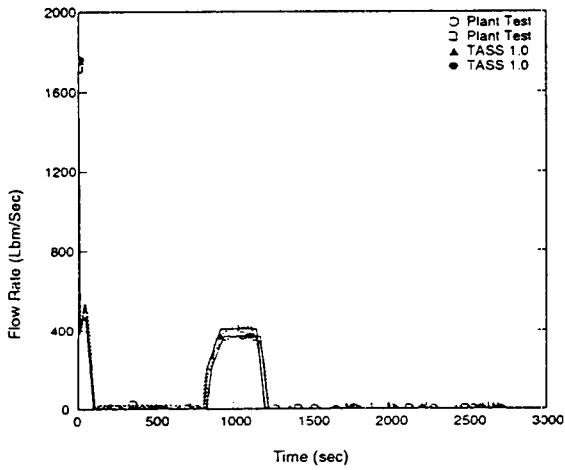


그림 3 주급수 유량

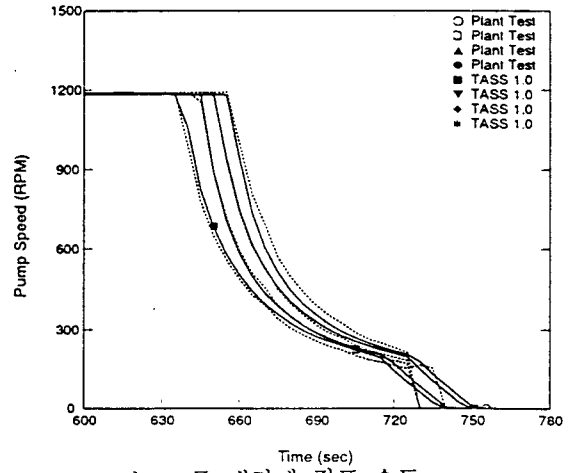


그림 4 주 냉각제 펌프 속도

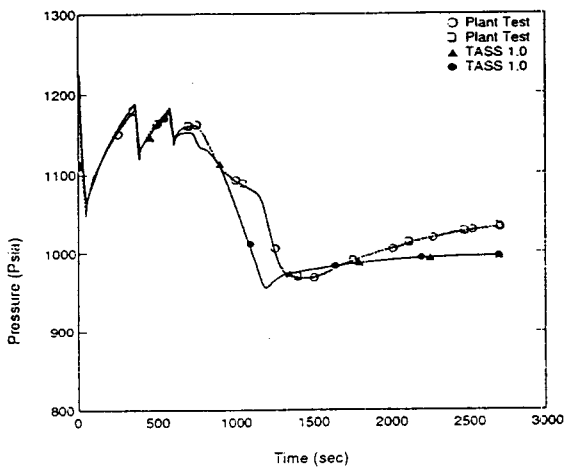


그림 5 증기발생기 압력

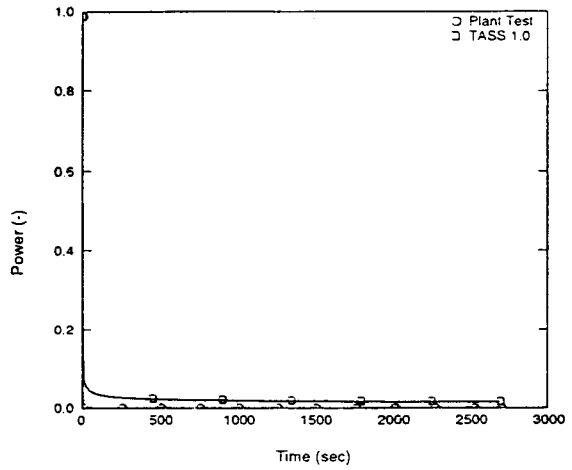


그림 6 노심 출력

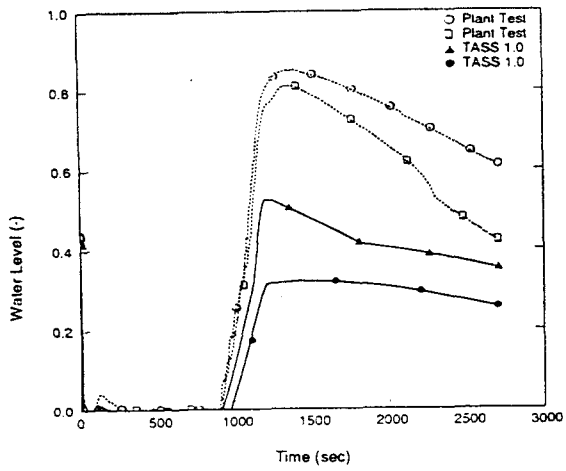


그림 7 증기발생기 수위

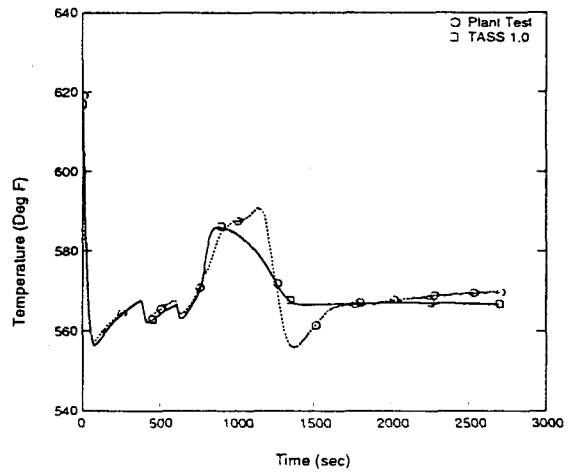


그림 8 고온관 온도

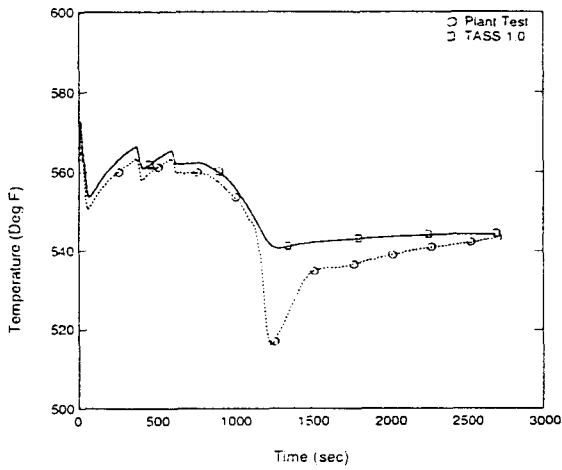


그림 9 저온관 온도

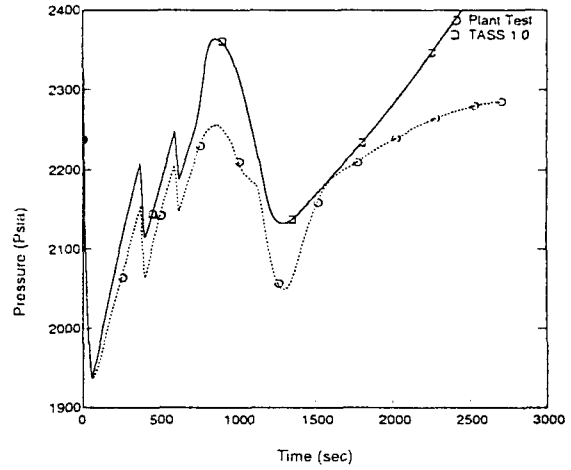


그림 10 가압기 압력

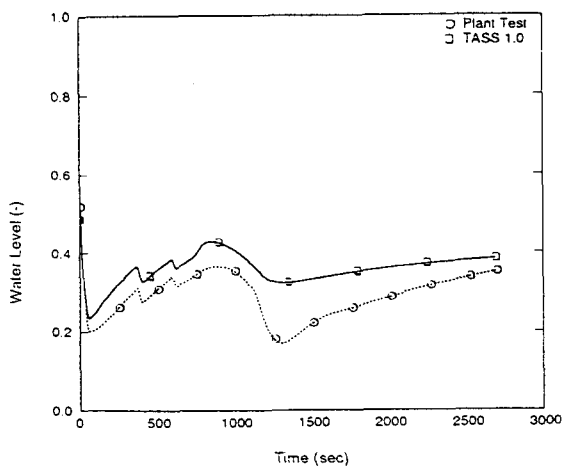


그림 11 가압기 수위

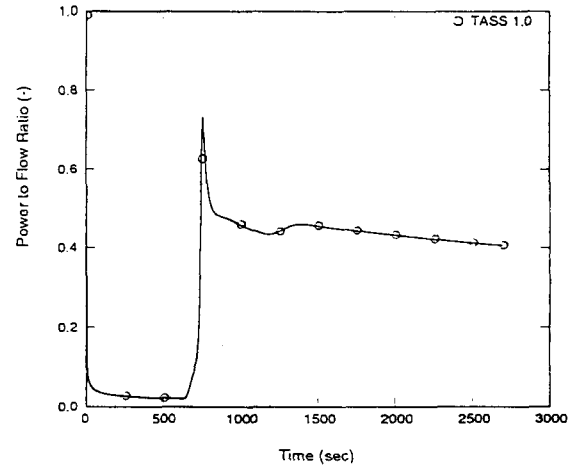


그림 12 노심출력 대 유량 비율