

## TASS 1.0의 1차원 확산 모델을 이용한 전출력 제어봉 인출 사고 해석

이병일, 최재돈, 윤한영, 김희철, 이상용  
한국원자력연구소

### 요 약

국내 Westinghouse형 및 CE형 가압 경수로의 Non-LOCA 및 성능 분석을 수행할 수 있는 범용 전산 코드 TASS 1.0 코드를 한국원자력연구소에서 개발하였다. TASS 1.0의 노심 출력 계산은 Point Kinetics 모델과 1차원 확산 모델이 함께 내장되어 있어 축방향 출력 분포가 변하는 반응도 관련 사고 및 주증기관 파단 사고들에 대해서는 1차원 확산 모델을 사용하여 노심의 출력 계산이 가능하도록 개발되었다. 1차원 확산 모델의 적용 가능성 및 효과를 평가하기 위하여 Westinghouse형 발전소인 고리 3호기 7주기 및 CE형 발전소인 영광 3호기 1주기 전출력 제어봉 인출 사고에 대한 비교 분석 계산을 수행하였다. 비교 분석 계산 결과 1차원 확산 모델이 Point Kinetics 모델에 비해 DNBR 관점에서 보다 많은 운전 및 열적 여유도를 확보함이 판명되어 반응도 관련 사고 해석에서의 TASS 1.0 1차원 확산 모델의 개선 효과를 입증하였다.

### 1. 서 론

최근 들어 고연소도 및 고능축 핵연료 개발, 반응도 관련 사고 인허가 기준 강화, 차세대 및 신형로 개발 등과 같은 원자력 발전소 설계 환경의 변화에 대처하기 위하여 보다 많은 운전 및 열적 여유도의 확보가 필요하게 되었으며 이를 위하여 노심의 축방향 출력 분포를 계산하여 Non-LOCA 및 성능 분석을 수행할 수 있는 범용 전산 코드 TASS 1.0을 한국원자력연구소에서 개발하였다 [1]. TASS 1.0의 열수력 모델 중 원자로 냉각재 계통 모델의 지배 방정식은 물 및 물과 증기의 혼합체에 대한 2개의 질량 보존 방정식과 2개의 에너지 보존 방정식, 그리고 물과 증기의 혼합체에 대한 1개의 운동량 보존 방정식 등 다섯 개의 일차원 보존 방정식으로 이루어져 있다. 전출력 제어봉 인출 사고의 비교 분석 계산을 수행하기 위하여 이용한 고리 3호기 및 영광 3호기의 원자로 냉각 계통은 노드별로 질량 및 에너지를 가지는 제어 체적 및 이를 연결하여 주는 유로로 구성되며 노드 구조는 그림 1 및 2에 제시하였다. 한편, 증기 발생기 모델은 물리적 특성에

따라 Downcomer, Riser 및 Riser 상단을 포함한 습분 분리기, 그리고 Steam Dome의 3부분으로 나누어 단순화된 모델을 세웠다. 노심 출력 계산 모델은 과도 상태시 축방향 분포가 변하는 반응도 관련 사고 및 주증기관 파단 사고 등을 Point Kinetics 모델로 해석하면 지나친 보수성이 포함되므로 정확한 과도 상태의 노심 출력 계산이 가능한 1차원 확산 모델을 추가하여 TASS 1.0을 개발하였다. 여기서 1차원 확산 모델은 한국원자력연구소에서 개발한 ONED90[2]을 기본으로 하였으며 축방향 출력 분포에 대한 TASS 1.0의 균질 노드와 ONED90의 비균질 노드의 입출력을 연계하기 위하여 Spline 기법을 이용하였다. 본 논문에서는 추가된 TASS 1.0의 1차원 확산 모델의 예측 능력을 평가하기 위하여 과도 상태시 축방향 출력 분포가 변하는 사고인 전출력 제어봉 인출 사고에 대한 비교 분석 계산을 수행하였다. 비교 분석 계산의 대상 호기로는 고리 3호기 7주기 BOC 및 영광 3호기 1주기 BOC이며 각각의 초기 조건들은 표 1에 나타나 있다.

## 2. 계산 절차

### 2.1 1차원 확산 모델의 적응 계산

1차원 확산 모델의 적응 계산은 1차원 코드의 출력인 핵적 인자들을 특정 상태의 설계치와 잘 일치하도록 하는 적응 인자의 계산으로 제어 반응도가 적응, 출력 적응, 제어봉가 적응으로 나누어져 있다. 그 과정은 1차원 코드의 임계 상태를 계산한 후 구해진 제어 반응도가, 축방향 출력 분포, 제어봉가등과 설계치들을 비교하여 기준을 만족하지 않을 때에는 새로운 적응 인자들을 추측하여 1차원 코드의 임계 상태 계산을 반복하여 기준을 만족하는 적응 인자들을 구한다.

### 2.2 초기화 계산

TASS 1.0의 1차원 확산 모델을 사용하여 정상 상태를 만들기 위해서는 TASS 1.0의 계통 해석 모델과 2.1에서 구해진 적응 인자를 적용한 노심 출력 계산 모델간의 초기화 계산이 필요하다. 초기화 계산의 과정은 먼저 표 1의 초기 조건들을 이용하여 TASS 1.0의 정상 상태를 계산한다. 계산 결과 구해진 열수력 인자(핵연료봉 온도, 냉각재 온도, 냉각재 밀도)들을 이용하여 1차원 코드의 정상 상태를 계산하고 그 출력들인 열수력 인자들을 TASS 1.0에서 구해진 열수력 인자들과 비교하여 기준을 만족하지 않을 때에는 1차원 코드에서 새로 계산된 축방향 출력 분포, 봉산 농도, 제어봉 위치 등을 입력으로 하여 TASS 1.0의 정상 상태를 반복 계산을 수행하여 열수력적으로 안정한 상태의 초기 조건을 결정한다[1].

### 2.3 과도 현상 분석

TASS 1.0의 1차원 확산 모델의 적용 계산을 위하여 Westinghouse형 발전소로 고리 3호기 7주기 BOC, CE형 발전소로 영광 3호기 1주기 BOC를 대상으로 하여 과도 상태시 축방향 출력이 변하여 Point Kinetics 모델로는 정확한 예측이 힘든 반응도 관련 사고인 전출력 제어봉 인출 사고에 대한 분석을 수행하였다. 전출력 제어봉 인출 사고는 제어봉 구동 장치의 고장으로 인하여 D군 제어봉이 삽입 한계치로부터 최대 인출 속도로 인출하여 양의 반응도가 삽입되어 노심 출력이 증가하는 사고로 본 논문에서는 Point Kinetics 모델과 1차원 확산 모델을 각각 사용하여 비교 계산을 수행하였다.

### 3. 계산 결과

TASS 1.0에서는 노심 출력 계산을 사용자의 필요에 따라 1차원 확산 모델과 Point Kinetics 모델을 사용할 수 있게 되었다. 1차원 확산 모델은 Point Kinetics 모델에 비해서 보다 정확한 예측을 함으로써 안전성 분석 측면에서 열적 여유도를 더 많이 확보할 수 있을 것으로 판단되며 이에 대한 적용 계산을 전출력 제어봉 인출 사고에 대하여 수행하였다. 일반적으로 MDNBR(Minimum DNB Ratio)의 결정 인자로는 노심 열속, 냉각재 온도, 냉각재 유량, 가압기 압력 등이며 노심 열속과 온도는 높을수록 유량과 압력은 낮을수록 MDNBR이 감소하게 된다. 계산 결과 냉각재 유량을 제외한 나머지 인자들은 노심 출력 계산 모델에 따라 비교적 많은 차이를 보였으며 그 비교 결과는 그림 3 및 4에 나타난 바와 같이 1차원 확산 모델을 사용한 경우의 노심 출력, 냉각재 온도, 가압기 압력들이 더 낮게 예측되었다. 즉 1차원 확산 모델을 사용한 경우에 노심 출력과 냉각재 온도는 MDNBR이 높아지는 방향으로 예측되었고 가압기 압력은 MDNBR이 낮아지는 방향으로 예측되었다. 이러한 차이를 정량적으로 해석하기 위하여 고리 3호기는 DNBR 민감도 분석 결과[3]를 이용하여 100초에서의 DNBR 변화량을 Point Kinetics 모델을 사용한 경우와 1차원 확산 모델을 사용한 경우에 대하여 각각 계산하였다. 고리 3호기 7주기의 DNBR 변화량은 Point Kinetics 모델의 경우 -22.7 % 이고 1차원 확산 모델의 경우 -15.0 % 로서 1차원 확산 모델을 사용한 경우가 Point Kinetics 모델을 사용한 경우보다 7.7 % 높은 DNBR 값을 예측함을 알 수 있었다. 마찬가지로 영광 3호기 1주기의 경우는 열수력 계산 코드인 CETOP-D[4]를 사용하여 계산한 결과 DNBR 변화량은 Point Kinetics 모델의 경우 -10.7 % 이고 1차원 확산 모델의 경우 -8.3 % 로서 1차원 확산 모델을 사용한 경우가 Point Kinetics 모델을 사용한 경우보다 2.4 % 높은 DNBR 값을 예측함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문은 TASS 1.0의 노심 출력 계산 모델인 1차원 확산 모델의 적용 가능성과 1차원 확산 모델의 개선 효과를 전출력 제어봉 인출 사고 해석을 수행하여 운전 및 열적 여유도의 확보를 보여주는 것을 그 목적으로 하였다. 그 결과 전출력 제어봉 인출 사고 해석시 Point Kinetics 모델에 비해 고리 3호기 7주기의 경우 7.7 %, 영광 3호기 1주기의 경우 2.4 %의 DNBR 여유도가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 정량적인 개선 효과 이외에도 운전 중 또는 사고 해석시 시간에 따른 축방향 출력 분포를 계산할 수 있으며 급격한 축방향 출력 분포의 변화가 예상되는 제어봉 이탈 사고의 해석이 가능해 졌다.

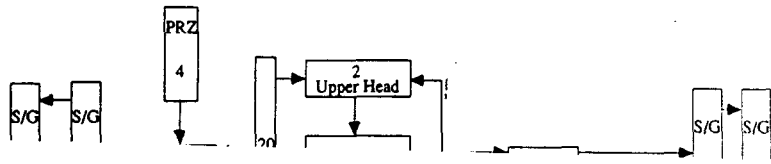
향후 TASS 1.0이 CE형 및 Westinghouse형 발전소의 인허가와 재장전을 위한 범용적 Non-LOCA 사고 해석 코드로서 사용될 수 있기 위해서는 모든 반응도 관련 사고와 주증기관 파단 사고에 대한 초기 조건 민감도 분석 및 적용 계산이 수행되어야 하겠다.

#### 참고 문헌

- [1] 심석구 외, "원전 계통 분석코드 TASS 개발," 한국원자력연구소, KAERI/RR-1468/94, 1995.
- [2] 장종화 외, "1차원 확산 코드 ONED90," KAERI/TR-353/93, 1993.
- [3] Mistelberger, K.S.Sung, "Determination of Design Limit DNBR's for Joint Design Fuel," B323/89/e419a, 6/690.
- [4] "CETOP-D Code Structure and Modeling Methods for Arkansas Nuclear One - Unit 2," CEN-214(A)-NP, July 1982.

표 1. 전출력 제어봉 인출 사고 추가 조건

변 수	고리 3호기 7주기	영광 3호기 1주기
노심 출력, Mw	2775	2815
가압기 압력, psia	2250	2250
노심 유량, lbm/sec	31776	32860
저온관 온도, °F	558	564.5
냉각재 온도 계수, pcm/K	-22.12	0
도플러 온도 계수, pcm/K	-2.68	-2.82



그 립 2. TASS 1.0의 영광 3호기 1차계통 노드 구조

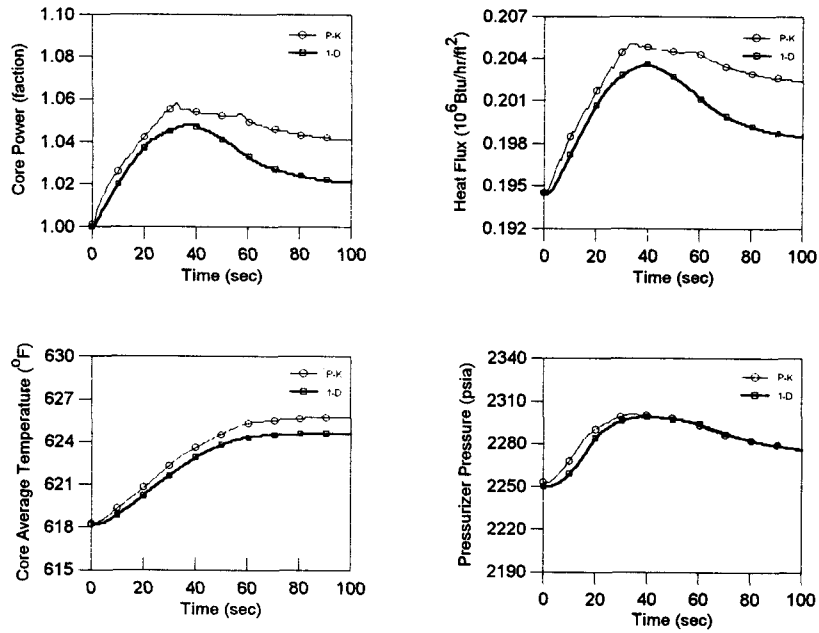


그림 3. 고리 3호기 전출력 제어봉 인출 사고 해석 결과

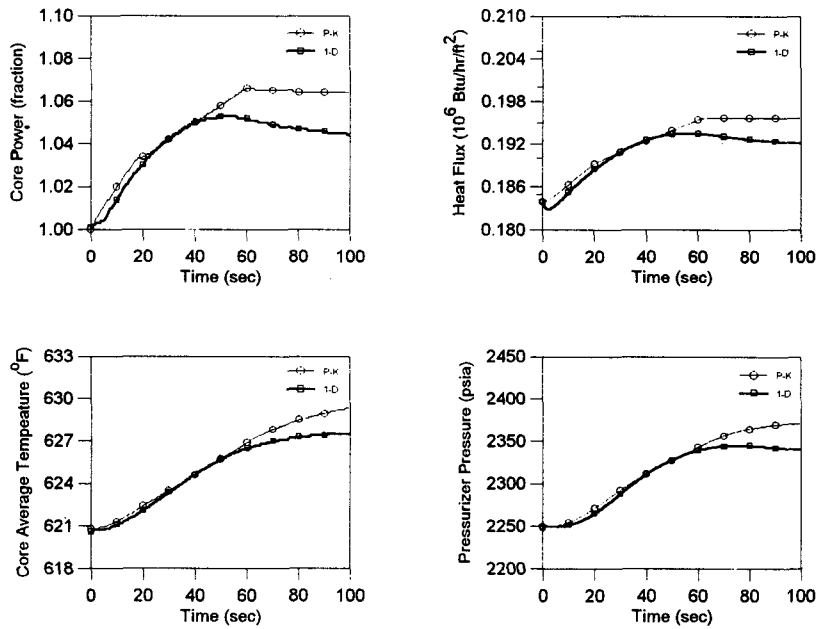


그림 4. 영광 3호기 전출력 제어봉 인출 사고 해석 결과