

## RIA(Reactivity Induced Accident)해석을 통한 MASTER코드의 신뢰성 검증

정 동 철, 정 일 섭, 조 병 오, 박 진 하, 박 찬 오

한국원자력연구소

### 요 약

최근, 한국원자력연구소에서 개발된 3차원 노심 거동분석 코드인 MASTER<sup>[1]</sup>는 노심의 정상 및 과도상태에서 기존의 다른 코드와 비교해서, 보다 정확하면서 빠르게 노심 분석을 할 수 있다. 특히, 노심의 과도상태에서의 해석을 위해서는 간단한 입력체계와 신뢰할 수 있는 결과가 기대되었는데, 기존의 CE사와 KWU사의 코드체계인 ROCS/HERMITE 및 MEDIUM/PANBOX는 과도상태에서의 노심 분석을 위해 1차원 및 3차원 과도해석 코드와의 연계로 인한, 부수적인 입력작성 및 정확도를 유지하기 위한 많은 Tuning 작업이 요구되나 MASTER 코드는 정상 및 과도상태에서의 노심 분석을 동시에 할 수 있어, 적은 노력으로 정확한 계산결과를 기대할 수 있다. 그래서, 과도상태에서 MASTER 코드의 신뢰성을 검증하기 위하여 IAEA Benchmark 계산 및 영광1호기의 5주기 노심을 대상으로 RIA(Reactivity Induced Accident) 분석을 수행하였다. 본 연구에서는, 미임계 노심에서의 Bank Withdrawal 사고와 전출력 및 영출력에서의 Rod Ejection 사고를 대표적인 RIA사고로서 연구를 수행하였으며, 그 결과를 기존 KWU사 코드인 PANBOX로 수행된 NSAR(Nuclear Safety Analysis Report)<sup>[2]</sup>의 결과와 비교하였다. 결과에 의하면, MASTER 코드는 그 정확도를 충분히 신뢰할 수 있으며, NSAR 분석 시에 사용된 균정수, 코드의 해석 방법론 및 초기조건의 불일치성으로부터 기인된 약간의 차이 외에는 PANBOX의 계산결과와 유사하였다.

### 1. 서 론

MASTER 코드는 최근 한국원자력연구소에서 개발된 것으로 노심의 정상 및 과도상태에서 보다 빠른 계산과 향상된 정확성 및 쉬운 입력체계를 바탕으로 향후 노심 핵설계에 사용될 것으로

기대되는 코드이다. 특히, 기존의 코드체계에서는 계산결과 값에 Bias 체계를 적용하여 핵설계 입력자료로 사용하나 MASTER는 Bias 체계 없이 신뢰할 수 있는 결과를 제공하는 것으로 CE형 및 Westinghouse형 노심을 통하여 이미 다른 연구<sup>[3,4]</sup>에서 입증되었다. MASTER에 사용되는 균정수는 이미 신뢰성이 입증된 바 있는 CASMO-3<sup>[5]</sup>로부터 생산된 것을 이용하며 이 CASMO-3는 기존의 DIT<sup>[6]</sup> 나 FASER<sup>[7]</sup>보다 다양한 형태의 핵연료 집합체에 적용 가능하며, 앞으로 널리 사용될 것으로 기대되는 코드이다. 그러므로 CASMO-3/MASTER 코드체계는 향후 한국형 원자로의 노심 해석에 사용 가능한 것으로 기대된다. MASTER 코드의 보다 큰 장점은 기존의 CE사나 KWU사의 핵설계 코드는 과도상태의 노심 분석을 위해 또 다른 코드와 연계되며 이것으로부터 노심 초기조건의 상이성은 피할 수 없다. 그러므로, 이러한 차이를 최대한 줄이기 위한 Tuning 작업 노력이 요구되는 반면에 MASTER는 간단한 입력체계를 가지면서도 정상 및 과도상태의 해석이 동시에 가능하므로 본 연구에서 과도해석 결과의 신뢰성이 입증되면, 향후 그 기대치를 상당히 높일 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 과도해석을 위해서, 코드 고유의 신뢰성을 검증하기 위한 IDEA Benchmark 계산 및 실제 노심에 적용 타당성을 확인하기 위한 RIA분석을 수행하였다. 대상 노심으로는 Westinghouse노심인 영광 1호기 5주기 노심을 선정하였으며, 비교대상 자료로서는 사고의 안전해석을 위한 일반 경계치 생산 및 Fast Transient동안 급격한 노심 출력의 변화 등을 묘사한 NSAR<sup>[2]</sup>을 선정함으로써 대상 노심의 선정에 보편성을 주었다. 그리고 가급적 노심의 초기조건은 NSAR과 일치시키고자 하였으나 방법론, 핵설계인자 및 사용코드의 차이로 인한 불일치성은 그대로 유지되었으며 단지 결과의 형태 및 추이를 중요시하였다. 특히, 사고 초기의 조건으로 제논분포, 제어봉가 및 첨두출력인자는 중요한 인자이나 계산결과(특히 출력변화)의 추이를 비교하는 것이 본 연구의 목적이므로 90% 정도의 일치만 유지하였다. 계산결과는 KWU사의 과도해석 코드인 PANBOX의 결과와 비교하였으나 이 코드 역시 계산상의 불확실도(uncertainty)는 무시할 수 없으므로, MASTER 결과와의 차이는 중요시하지 않았으며 반면에 계산결과의 시간에 따른 추이에 관심을 맞추었고, 특히 사고시의 실측 자료가 부족하므로 앞으로 다른 코드체계와의 많은 비교 계산이 요구된다. 본 연구에서는 사고대상으로서 ANS Condition II와 IV에 속하는 Bank Withdrawal 및 Rod Ejection사고를 대표적으로 선정하였다. 천이계산에 사용되는 MASTER코드의 중성자속 계산방법은 정상상태와 동일하다. Fuel Assembly 영역에서는 Nodal Expansion Method(NEM)과 Reflector 영역에서는 Nodal Integration Method(NIM), 중성자속 해를 빠른 시간 내에 구하기 위하여 Vectorized Red-Black Gauss Seidel 방법, Multi-level Coarse-mesh Rebalancing 방법 또한 Asymptotic Flux Extrapolation 방법이 사용되었다. 시간에 따른 중성자속 변화량을 예측하기 위해서는 Implicit Euler Method에 Frequency Transformation 방법을 병행하였으며 계산의 정확성을 유지하면서 계산시간을 크게 줄일 수 있도록 자동적으로 Time-step Size를 계산할 수 있는 방법을 사용하였다. MASTER 코드의 열수력 모델은 열수력 코드인

COBRA를 사용하여 계산되는데 이것은 MASTER 내부에 내장되어있다.

## 2. IAEA Benchmark 계산

MASTER 코드에 내장된 과도해석기능 고유의 신뢰성을 확인하기 위하여 주어진 노심 조건을 동일하게 설정하여 계산을 수행하는 Benchmark 계산이 필요하다. 본 연구에서는 LWR노심의 대표적인 검증계산인 IAEA Benchmark 계산을 기본으로 하여 MASTER 및 PANBOX코드의 과도 해석 결과를 표 1에서 비교하였다. 이 계산은, 1/4 노심에서 2군 중성자에너지 그룹 및 2개의 지발중성자 Precursor를 기본으로 모델링 되었으며 또한 Outer Iteration 계산을 위해  $10^{-5}$ 의 Convergence Criterion을 사용하였고 반경과 축방향의 Mesh Size를 각각 15cm와 30cm으로 선정하였다. 그리고, 자동적으로 Time-step Size를 계산할 수 있는 방법을 사용하였다.

## 3. RIA(Reactivity Induced Accident) 분석

RIA 분석을 위해 영광1호기 5주기까지 MASTER로 노심 연소 계산을 수행하였다. 분석을 위해 선정된 사고는 RCCA Bank Withdrawal 와 RCCA Rod Ejection 사고이다. Bank Withdrawal 사고는 임계와 미임계 노심의 사고로 나뉘어 지는데, 특히 짧은 시간동안의 출력변화를 보다 정확히 계산하는 것이 코드의 신뢰성을 좌우하므로 Bank Withdrawal 사고는 미임계 노심에서의 사고를 대상으로 하였으며, 또한 사고의 극대화를 위하여, 출력상승을 억제하는 감속재온도계수의 효과가 적은 BOC(Beginning of Cycle)에서 계산을 수행하였다. 사고시 노심에 최대의 반응도 주입을 유발하는 Bank는 4개의 Bank중 B와 C Bank이며 이 두 Bank가 미임계 노심에서 원자로 제어장치의 오류로 인하여 최대 속도로(1.9 cm/sec) 간격없이 동시에 인출되며 이때 출력상승이 전출력의 35%에 도달하였을 때 원자로는 자동으로 Trip되는데, 이때 노심에 주입되는 순간 반응도를 그림 1에서 PANBOX결과와 비교하였다. 마찬가지로 사고시 시간에 따른 전체 주입 반응도를 그림 2에서 비교하였다. 그림 3에서는 사고시 반경방향 집합체 침투출력인자의 변화를 보여주며 그림 4에서는 노심의 출력변화를 보여주었다. Rod Ejection 사고는 제어봉 집합체 구동장치의 기계적인 파손으로 인하여 제어봉의 순간적인 방출로 인한 노심내 국부적으로 과도한 출력상승 및 그로 인한 핵연료봉의 손상을 초래할 수 있는 사고로 정의된다. 이 사고는 영출력및 전출력의 BOC와 EOC(End of Cycle)에서 각각 분석하였으며 사고의 초기조건으로, 전출력에서는 D Bank만 완전히 삽입되어 있으며 영출력에서는 D와 C Bank는 완전히 삽입되어 있으며 또한 B Bank는 77 step(66 % 삽입)에 있는 것으로 보수적으로 가정하였다. 사고시 0.1초 동안의 짧은 시간에 D

bank가 완전히 방출되며 Bank Withdrawal 사고보다 더 짧은 시간동안의 노심 거동이 주요하므로 계산에서 노심의 Trip은 고려하지 않았다. 사고전 전출력에서 Rod Ejection 후 10초동안 노심의 출력 및 3차원 침투출력인자를 계산하여 BOC와 EOC에서 PANBOX 결과와 비교하여 그림 5와 6에서 제시하였다. 마찬가지로 그림 7과 8에서는 영출력 조건에서 비교하였다. 표 2에서는 사고후 10초동안 발생하는 최대 출력 및 최대 침투출력인자와 그것의 발생 시간 그리고 핵연료봉 중심부 및 피복재에서의 최대온도를 제시하였다.

#### 4. 논 의

표 1의 IAEA Benchmark 계산으로부터 MASTER 코드의 결과를 PANBOX 및 Reference의 그것과 비교할 때 노심의 과도해석에 대한 MASTER 코드의 계산 결과는 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다. 그림 1에서는 미임계 BWA(Bank Withdrawal Accident)시 영광1호기 5주기에서의 노심<sup>[10]</sup>에 주입되는 총반응도 주입량에 대한 반응도 주입율을 나타낸 것인데 MASTER가 PANBOX보다 반응도 주입율은 큰 반면에 총 반응도 주입량은 작다. 이것은 MASTER가 PANBOX보다 제어봉가는 상대적으로 높으며 사고 전 노심내 축방향의 제논분포가 서로 다름으로 기인된다. 이것은 그림 2에서도 마찬가지로 총 반응도 주입량은 큰 반면에 시간 간격은 짧게 나타나는 이유이다. 그림 3에서는 시간에 따른 반경방향의 침투출력인자를 시간에 따라 도식한 것인데 시간  $t=0$  sec(제어봉 A, B, C, D 완전삽입)에서 제어봉 B와 C가 동시에 4 cm/sec의 속도로 인출될 때, MASTER의 제어봉가가 크기 때문에 출력인자는 전체적으로 낮게 평가된다. 그러나, 이러한 사고 전 노심 초기조건의 차이에도 불구하고 노심의 출력변화는 그림 4에서와 같이 비슷하게 나타난다. 이것은 RIA와 같은 사고는 Fast Transient이기 때문에 노심의 조건이 약간 달라져도 순간적인 출력변동에 크게 영향을 주지 않는다. 그러므로 일반적으로 보수적인 노심조건으로 계산하는데 즉, 제어봉의 최대 인출속도를 Tech. Spec.에서는 1.9 cm/sec로 제한되어 있으나 MASTER나 PANBOX 모두 4.0 cm/sec로 계산한 이유도 여기에 있다. 단지 출력이 변화하는 시간은 서로 12초 정도의 차이를 두는데 이것은 사고 전 노심의 미임계값의 차이( $k_{master}=0.969605$ ,  $k_{panbox}=0.964427$ )에서 기인된다. Rod Ejection 사고는 0.1초 동안의 짧은 시간에 노심내 D 제어봉 중에 하나가 순간적으로 방출되는 사고이다. 그림 5에서 그림 8까지는 Rod Ejection사고시 주기초 및 주기말에 전출력과 영출력의 조건에서 출력변동을 MASTER와 PANBOX의 결과를 비교한 것인데 Peak Power가 나타나는 시점 및 출력의 변화가 전반적으로 비슷함을 알 수 있다. 마찬가지로 그림 9에서 12까지는 3차원 침투출력인자의 변화를 도식한 것인데 이것도 전체적으로 비슷한 추세를 보여주며 크기에 있어서의 약간의 차이는 D bank의 제어봉가 및 수용성 보론농도 그리고 축방향 제논분포 차이의 복합적인 효과로 기인된다. 마지막으로 Rod Ejection사고시 핵연료봉 중

심부 및 피복재 최대온도는 표 2에서 비교하였는데 MASTER의 온도가 전반적으로 낮게 평가되었는데 이것은 PANBOX가 사고시 초기값으로 열전달 계수를 약 10배정도 보수적으로 낮게 설정하였기 때문에 오히려 높게 나타나는 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서 지금까지 다른 IAEA Benchmark 계산 및 기준노심에 대한 RIA계산 결과로부터 MASTER 코드가 노심의 과도상태에서 계산될 때, 노심의 급격한 출력변동 및 출력인자 계산을 기존 KWU사의 PANBOX코드 결과와 유사하게 나타냄을 알 수 있다. 물론, 노심의 초기조건의 근소한 불일치로 인해서 나타나는 오차는 IAEA Benchmark 계산 결과로부터 유추하여 신뢰할 수 있으나 추후 다른 RIA계산 및 다른 기준노심을 통한 다양한 계산이 이루어져 Transient 계산에 대한 MASTER코드의 신뢰성을 구축하고 또한 설계에 이용되기 위한 추가 보완작업이 이루어지면 앞으로 한국형 차세대노심설계에도 이용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. B. O. Cho, et. at, "MASTER- An Indigeous Nuclear Design Code of KAERI," Proc. of the KNS Spring Mtg, Cheju, May 1996.
2. Y. S. Jung, et. at, "Nuclear Safety Analysis Report For Yonggwang 1 & 2", B324/89/e367, November 1989.
3. J. S. Song, et. at, "Uncertainty Evaluations of CASMO-3/MASTER System for PWR Core Neutronics Calculations," Proc. of the KNS Spring Mtg, Cheju, May 1996.
4. Y. S. Park, et.at, "Verification and Application of MASTER for Load Follow Operation," Proc. of the KNS Spring Mtg, Cheju, May 1996.
5. M. Edenius, B. Forssen, "CASMO-3 User's Manual," STUDSVIK/NFA-89/3, November, 1989.
6. A. Jonsson, R. A. Loretz, "DIT User's Manual," CE-CES-11 Rev. 3-P, April 1994.
7. Dr. Ambrosius, Fr. Lampe, "FASER4 Code Manual," U6 521/88/e328e, September 1990.
8. R. Boeer, et. at, "Code Manual PANBOX 2.2," Siemens/KWU Technical Report BT 25/92/E516b, May 1992.
9. "Benchmark Problem Book," ANL-7416, Supplement II, Argonne National Laboratory(June 1977).
10. S. Y. Park, et. at, "Nuclear Design Report for Yonggwang 1 Cycle 5," B324/90/e204, July 1990.

표 1. LWR에 대한 IAEA Benchmark 계산 결과

	MASTER	PANBOX <sup>8</sup>	Reference <sup>9</sup>
Time to first peak(s)	0.895	0.895	0.894
Power at first peak(w/cm <sup>3</sup> )	5972	5957	5798
Time to first minimum(s)	1.00	0.99	-
Power at first minimum(w/cm <sup>3</sup> )	95.8	98.6	-
Time to second Peak(s)	1.51	1.51	-
Power at second peak(w/cm <sup>3</sup> )	358.9	368.3	-
Power at t=3.0 s(w/cm <sup>3</sup> )	39.0	40.1	-
Average fuel temperature at t=3.0 s( °K)	954	971	-
Peak assembly temperature at t=3.0 s( °K)	3880	-	3566
Number of time steps	364	373	706

표 2. Rod Ejection사고시 핵연료봉 중심부 및 피복재의 최대온도(단위: °C) 비교

	전출력, 주기초		영출력, 주기초		전출력, 주기말		영출력, 주기말	
	master	panbox	master	panbox	master	panbox	master	panbox
핵연료봉 중심부	1950	2478	1070	1263	1780	1853	1560	2149
피복재	400	858	350	427	380	425	780	973

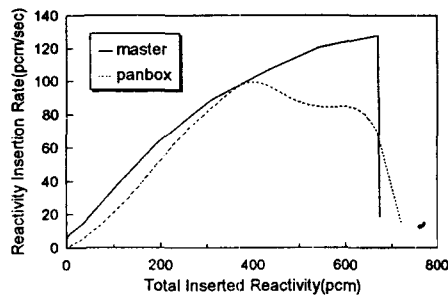


그림 1. BWA 사고에서 반응도 주입율 변화

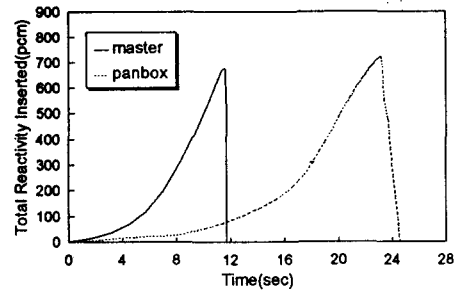


그림 2. BWA 사고에서 시간에 따른 총반응도 주입량 변화

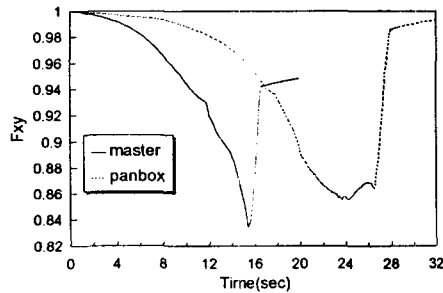


그림 3. BWA 사고에서 시간에 따른 반경방향 출력인자 변화

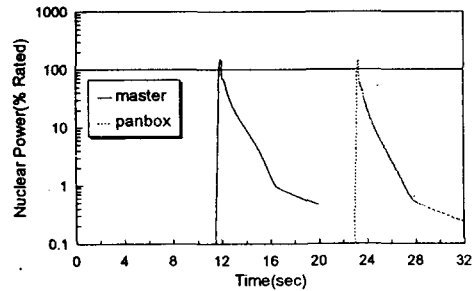


그림 4. BWA 사고에서 출력변화(영출력, 주기초)

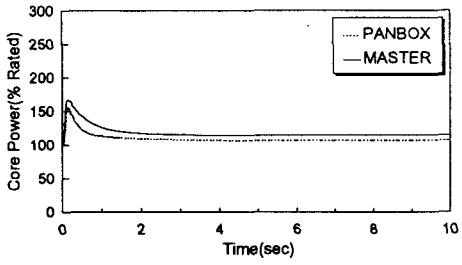


그림 5. 노심과도상태에서의 출력변화(전출력, 주기초)

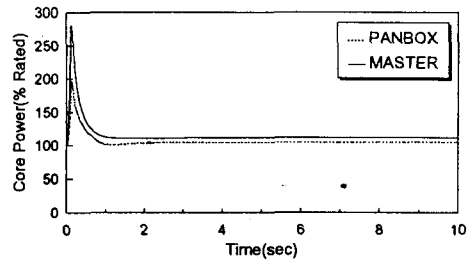


그림 6. 노심과도상태에서의 출력변화(전출력, 주기말)

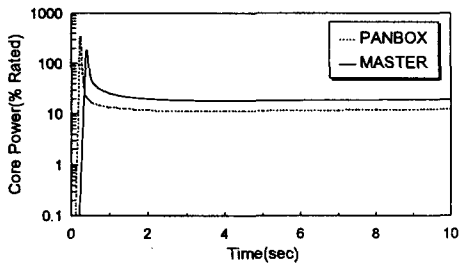


그림 7. 노심과도상태에서의 출력변화(영출력, 주기초)

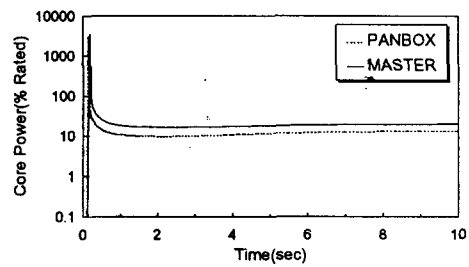


그림 8. 노심과도상태에서의 출력변화(영출력, 주기말)

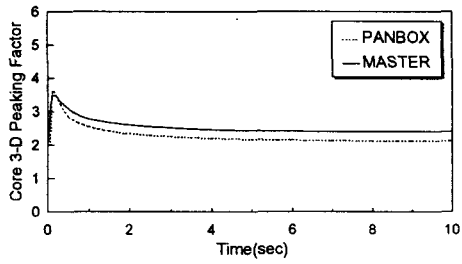


그림 9. 노심과도상태에서의 출력인자변화(전출력, 주기초)

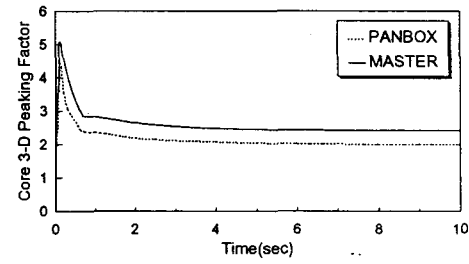


그림 10. 노심과도상태에서의 출력인자변화(전출력, 주기말)

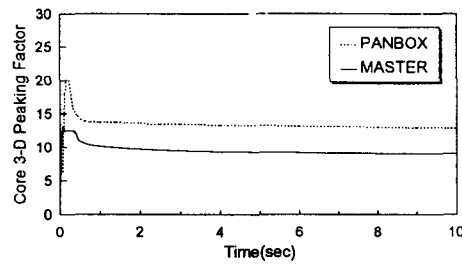


그림 11. 노심과도상태에서 출력인자변화(영출력, 주기초)

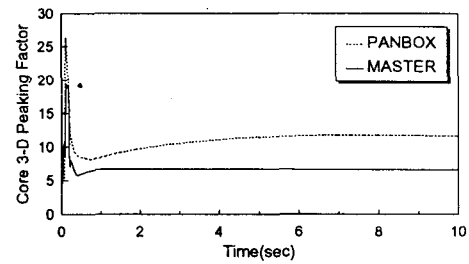


그림 12. 노심과도상태에서 출력인자변화(영출력, 주기말)