2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

계통열수력/노심해석 통합코드 MARS/SNUNAC의 개발과 검증

Development and Verification of Thermal-Hydraulic/Reactor Kinetics Coupled Code MARS/SNUNAC

김창효, 정구영
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1

요약

원자력연구소에서 개발한 최적 열수력 계통해석 전산코드인 MARS와 서울대학교에서 개발 중인 노심해석 전산코드인 SNUNAC을 결합하여 계통열수력/노심해석 통합코드 MARS/SNUNAC를 개발하고 OECD 주증기관 파단 사고 벤치마크 문제 II를 해석하여 기존의 결과와 비교함으로써 MARS/SNUNAC을 검증하였다. 그리고 과도상태 노심해석의 전산효율성을 증진을 위해 개발된 노심-반사체 경계조건을 적용하여 벤치마크 문제를 해석함으로써 노심-반사체 경계조건의 사용 효율성을 평가하였다. 벤치마크 문제의 해석결과, MARS/SNUNAC의 해석결과는 기존의 통합코드의 결과와 거의 일치하는 것으로 나타나 통합코드로서의 해석 능력을 입증하였고, 노심-반사체 경계조건의 적용으로 계산의 정확도는 유지하면서 전체 전산 시간을 15%이상 감소시키는 결과를 보였다.

Abstract

Thermal-hydraulic/reactor kinetics coupled code MARS/SNUNAC was developed by combining best-estimate thermal hydraulic code MARS of KAERI and SNUNAC, SNU's reactor kinetics code. The validation of MARS/SNUNAC is examined by analyzing the OECD MSLB benchmark II problem and comparing the results of MARS/SNUNAC with those of other coupled codes. The computational effectiveness of the nodal core-reflector boundary conditions designed for transient reactor analysis is tested in terms of computational time taken for the benchmark problem results. It is shown that MARS/SNUNAC calculations are very similar to the computational results of other coupled codes and the use of core-reflector boundary conditions results in the 15% reduction of computational time with little or no effects on accuracy.

1. 서론

원자로의 사고해석등에 사용된 열수력 계통해석 코드들은 전산시간등의 제약으로 인하여 노심의 동특성을 점운동방정식이나 1차원 노심 과도상태 방정식 등을 통해 모사해왔다. 그러나 최근에 전산기의 성능이 비약적인 발달을 함에 따라 노심의 동특성을 3차원으로 모사하는 노달해법과 열수력 계통해석 전산코드를 결합하여 소위 최적열수력계통해석 통합코드를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구는 가압경수형 원자로의 설계기준사고 중 하나인 주증기관 파단사고와 같이 원자력 발전소 계통의 열수력적 변화가 노심내의 3차원 출력분포를 과도하게 변화시킴으로써 노심내 출력분포의 비대칭성을 수반하는 사고의 해석 시에 보다 정확하게 노심의 과도상태 출력분포를 예측하고자 함이 목적이다. 최근 원자력연구소에서도 최적(best-estimate) 열수력 계통해석 전산코드인 MARS와 노심해석 전산코드인 MASTER를 결합하여 MARS/MASTER 통합코드[1)]를 개발하고 OECD 주증기관 파단사고 벤치마크 문제[2)]를 해석하여 결과를 발표한 바 있다.

본 논문의 목적은 현재 서울대학교에서 개발중인 노심해석 전산코드인 SNUNAC를 MARS와 결합하여 계통열수력/노심해석 통합코드 MARS/SNUNAC을 개발하고, OECD 주증기관 파단사고 벤치마크문제 II를 해석하여 개발된 통합코드의 정확도와 성능을 평가하는 것이다. 또한, SNUNAC의 전산효율성을 향상시키기 위해 현재 사용되고 있는 노심-반사체 경계조건[3)]을 적용하여 그 결과를 비교 검토함으로써 계통열수력/노심해석 통합코드에의 적용타당성을 평가하고자 한다.

2. MARS/SNUNAC 통합코드의 개발

원자력연구소에서는 최근에 3차원 노심 열수력 전산코드 COBRA-TF와 1차원 계통분석 코드 RELAP5/MOD3를 토대로 개발된 다차원 최적계통분석 전산코드 MARS와 3차원 노심해석 전산코드인 MASTER의 노심동특성 모듈을 동적 연계 라이브러리(DLL;Dynamic Link Library)의 형태로 통합하여 계통열수력/노심해석 통합코드인 MARS/MASTER를 개발한 바 있다. 본 연구에서는 MARS/MASTER의 동적 연계 라이브러리 통합형태를 그대로 유지하면서 MARS/SNUNAC 통합 전산코드를 개발하기 위해서, UNIX에서 사용될 목적으로 개발하고 있는 SNUNAC를 수정하여 윈도(Windows) 운영체계의 동적 연계 라이브러리 모듈을 개발하고, 기존의 MARS/MASTER에서 사용되던 전산코드 간의 통신변수를 그대로 유지함으로써 MARS에 별도의 수정을 가하지 않고 통합코드 MARS/SNUNAC의 개발을 완료하였다.

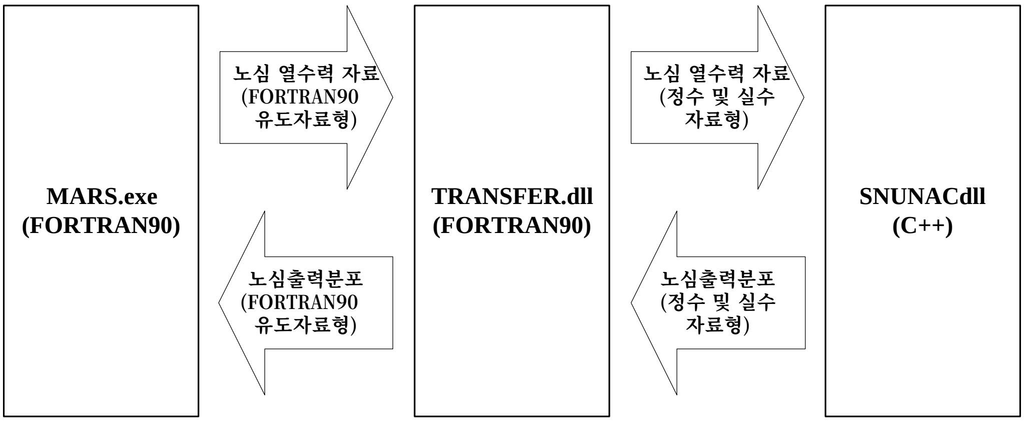

그림 1. MARS/SNUNAC의 연계체계

MARS와 MASTER는 FORTRAN90을 사용하여 작성되어 있고 전산코드 간 통신변수로서 FORTRAN90에서 지원하는 유도 자료형(Derived Data Type)을 사용하고 있다. SNUNAC는 C++를 사용하여 작성되어 있어서 FORTRAN90의 유도 자료형을 그대로 사용할 수 없기 때문에 인수변환을 위한 동적 연계 라이브러리 TRANSFER.dll를 FORTRAN90을 사용해 작성하여 유도 자료형으로부터 실수와 정수 데이터를 분리하고 이를 다시 SNUNAC.dll에 넘겨주는 형태로 전산코드 간의 통신변수 전달체계를 수정하였다. 이 과정을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 MARS는 FORTRAN90으로 작성된 동적 연계 라이브러리 TRANSFER.dll을 통해 노심의 열수력 데이터를 SNUNAC.dll에 전달하고 또 계산된 노심 출력분포를 받아서 열수력 계산을 수행하게 된다.

3. 노심-반사체 경계조건

노심과도상태 계산에서 주된 관심 대상은 계산결과의 정확성과 전산시간이라고 할 수 있다. 정확성과 전산효율성의 향상을 위해서 많은 노심해석 방법론이 개발되어 왔으며 현재 비선형 노달해법(nonlinear nodal method)이 정확도와 전산시간 면에서 효율적인 방법으로 알려져 있다. 또한, 노심-반사체 경계조건을 적용하여 노심의 반사체를 계산영역에서 제외시킬 경우 노달 수치계산 노드의 수, 즉 미지수의 수를 감소시킴으로써 전산시간을 감소시킬 수 있다. SNUNAC는 비선형 해석노달해법을 사용하여 노심 과도상태 계산을 수행하며, 과도상태 노심-반사체 경계조건을 비선형 해석노달해법과 결합하여 노달계산을 수행할 수도 있다. 그리고 이에 대하여는 OECD/NEACRP 3차원 노심 과도상태 벤치마크 문제해석을 통해 노심-반사체 경계조건 사용의 타당성을 검증한 바 있다[4). 이 연구에서는 계통열수력/노심해석 통합코드 MARS/SNUNAC에 과도상태 노심-반사체 경계조건을 적용하여 OECD 주증기관 파단 사고 벤

치마크 문제 II를 해석하고 노심의 반사체를 포함한 계산결과와 비교 검토함으로써 그 계산효율성을 검토하고자 한다.

4. OECD 주증기관 파단 사고 해석결과 및 검증

OECD 주증기관 파단 사고 벤치마크 문제는 최근 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있는 계통열수력/노심해석 통합코드들의 비교와 검증을 위해 개발된 문제이다. 이 벤치마크 문제는 다음과 같은 세 개의 문제로 구성되어 있다.

Exercise I : 원자로 계통 전체를 모사하고, 노심은 점운동방정식으로 모사.

Exercise II : 노심만을 열수력/노심해석 통합코드로 모사.

Exercise III : 원자로 계통 전체와 노심을 열수력/노심해석 통합코드로 모사.

Exercise I은 기존의 계통 열수력 전산코드에 사용된 방법으로서 파단 사고로 인한 계통의 열수력 변화를 모사하되, 노심은 점운동방정식에 의한 과도상태 출력변화를 수반하는 것으로 가정한 것이다. Exercise II는 노심의 과도상태를 3차원으로 모사하되 주증기관 파단으로 인한 계통의 열수력 변화를 모사하지는 않고, 벤치마크 문제에서 시간에 따른 노심의 입구와 출구의 열수력 경계조건을 직접 제공함으로써 원자로의 노심내의 과도상태를 모사하는 문제이다. Exercise III는 이 벤치마크 문제의 최종단계로서 문제 I과 문제 II를 결합하여 노심은 3차원으로 모사하고 주증기관 파단으로 인한 계통의 열수력 과도상태도 해석함으로써 현재 각국이 개발하고 있는 최적(best-estimate) 계통열수력/노심해석 통합코드들의 해석결과를 비교하고 검증하는 것이 목적이다. 이 연구에서는 Exercise II를 해석하여 그 결과를 비교하였다. 노심해석의 입장에서 보면 문제 II와 문제 III은 같은 문제라고 생각할 수 있으며 따라서 문제 II의 해석을 통해 통합코드의 노심해석능력을 검증할 수 있다.

최근 OECD 주증기관 파단 사고 벤치마크 문제에 관해서 전 세계에서 개발되고 있는 많은 통합전산코드의 해석결과가 발표되어 있으며[5] 이 결과들과 MARS/SNUNAC의 해석결과를 비교하였다. 표 1은 노심의 초기상태에서의 유효증배계수(k effective) 계산결과를 나타내고 있다. 초기상태 노심은 제어봉의 위치나 고온영출력(HZP: Hot Zero Power) 혹은 고온전출력(HFP: Hot Full Power) 상태에 따라 다섯 개의 초기노심 상태가 제시되어 있다. 이 초기상태 노심들에 대해 유효증배계수를 비교해 보면 거의 모든 전산코드 들이 유사한 값을 가지고 있음을 보이고 있다. 과도상태 문제의 초기노심은 2번인데, 이 경우를 비교해 보면 MARS/SNUNAC의 결과는 다른 전산코드들에 비해서 MARS/MASTER결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 노심의 열수력적 해석을 같은 코드인 MARS가 담당하고 있기 때문으로 판단된다.

표 1. 초기상태 노심의 유효증배계수(k effective)

Participants	Country	Code	0	1	2	2a	3	4
PSU	USA	TRAC-PF1/NEM	1.0354	1.0033	1.0061	-	0.9880	1.0022
CSA/GPUN/EPRI	USA	RETRAN-3D MOD2.0	1.0312	1.0293	1.0067	1.0067	0.9823	0.9970
CEA-1	France	CRONOS2-FLICA4	1.0353	1.0334	1.0044	1.0046	0.9869	1.0018
CEA-2	France	CRONOS2-FLICA4/1D	-	-	1.0043	-	-	-
GRS	Germany	QUABOX-CUBOX	1.0346	1.0327	1.0033	1.0033	0.9856	1.0008
KAERI 1	Korea	MARS/MASTER	1.0355	1.0335	1.0071	-	0.9875	1.0022
KAERI 2	Korea	MASTER	1.0355	1.0335	1.0051	1.0047	0.9875	1.0022
NETCORP	USA	DNP/3D	1.0286	1.0282	1.0000	1.0012	0.9825	0.9971
PURDUE 1	USA	TRAC-M/PARCS	1.0355	1.0335	1.0061	1.0061	0.9875	1.0022
PURDUE 2	USA	RELAP/PARCS	1.0355	1.0335	-	-	0.9875	1.0022
ROSSENDORF	Germany	DYN3D/R	1.0354	1.0333	1.0052	1.0048	0.9868	1.0018
SIEMENS 1	Germany	RELAP5/PANBOX-E	1.0354	1.0335	1.0049	1.0049	0.9869	1.0018
SIEMENS 2	Germany	RELAP5/PANBOX-I	-	-	1.0058	1.0058	-	-
VTT	Sweden	TRAB-3D	1.0355	1.0334	1.0031	1.0028	0.9867	1.0018
ANL	USA	SAS-DIF3DK	1.0349	1.0329	1.0051	1.0050	0.9868	1.0016
		MARS/SNUNAC	**-**	**-**	**1.0069**	**-**	**-**	**-**
		SNUNAC	**1.0353**	**1.0333**	**-**	**1.0056**	**0.9868**	**1.0017**

표 2는 초기상태 노심의 반경방향의 출력을 평균하여 축방향 출력분포를 구했을 때 그 최대값인 축방향 최대출력(Fz)을 나타내고 있다. 유효증배계수의 계산과 마찬가지로 축방향 최대출력도 대부분의 전산코드들이 거의 유사하게 예측함을 볼 수 있다.

표 2. 초기상태 노심의 축방향 최대출력(Fz)

Participants	Country	Code	0	1	2	2a	3	4
PSU	USA	TRAC-PF1/NEM	2.674	2.435	1.058	-	2.706	2.738
CSA/GPUN/EPRI	USA	RETRAN-3D MOD2.0	2.640	2.519	1.052	1.052	2.749	2.730
CEA-1	France	CRONOS2-FLICA4	2.676	2.459	1.065	1.058	2.750	2.738
CEA-2	France	CRONOS2-FLICA4/1D	-	-	1.067	-	-	-
GRS	Germany	QUABOX-CUBOX	2.670	2.440	1.054	1.054	2.760	2.740
KAERI 1	Korea	MARS/MASTER	2.673	2.433	1.105	-	2.742	2.728
KAERI 2	Korea	MASTER	2.673	2.433	1.059	1.076	2.742	2.728
NETCORP	USA	DNP/3D	1.584	1.506	1.153	1.110	1.506	1.556
PURDUE 1	USA	TRAC-M/PARCS	2.673	2.434	1.107	1.107	2.741	2.728
PURDUE 2	USA	RELAP/PARCS	2.673	2.434	-	-	2.741	2.728
ROSSENDORF	Germany	DYN3D/R	2.689	2.447	1.054	1.071	2.759	2.746
SIEMENS 1	Germany	RELAP5/PANBOX-E	2.685	2.454	1.062	1.062	2.751	2.739
SIEMENS 2	Germany	RELAP5/PANBOX-I	-	-	1.095	1.095	-	-
VTT	Sweden	TRAB-3D	2.734	2.492	1.094	1.113	2.823	2.800
ANL	USA	SAS-DIF3DK	2.662	2.424	1.053	1.053	2.729	2.716
		MARS/SNUNAC	**-**	**-**	**1.103**	**-**	**-**	**-**
		SNUNAC	**2.675**	**2.433**	**-**	**1.076**	**2.744**	**2.732**

표 3은 핵연료집합체의 반경방향 최대 출력(Fxy)를 나타내고 있다. 이 값은 노심의 축방향

출력을 평균하여 반경방향 출력분포를 구하고 그 최대치를 나타낸 것이다.

표 3. 초기상태 노심의 반경방향 최대 출력(Fxy)

Participants	Country	Code	0	1	2	2a	3	4
PSU	USA	TRAC-PF1/NEM	1.366	1.439	1.331		5.309	3.596
CSA/GPUN/EPRI	USA	RETRAN-3D MOD2.0	1.372	1.446	1.337	1.337	5.334	3.585
CEA-1	France	CRONOS2-FLICA4	1.360	1.429	1.326	1.334	5.440	3.621
CEA-2	France	CRONOS2-FLICA4/1D	-	-	1.324	-	-	-
GRS	Germany	QUABOX-CUBOX	1.352	1.424	1.327	1.327	5.634	3.687
KAERI 1	Korea	MARS/MASTER	1.363	1.437	1.339	-	5.449	3.619
KAERI 2	Korea	MASTER	1.363	1.437	1.338	1.327	5.449	3.619
NETCORP	USA	DNP/3D	1.449	1.457	1.405	1.390	4.735	3.008
PURDUE 1	USA	TRAC-M/PARCS	1.363	1.437	1.372	1.372	5.448	3.616
PURDUE 2	USA	RELAP/PARCS	1.363	1.437	-	-	5.448	3.616
ROSSENDORF	Germany	DYN3D/R	1.362	1.436	1.336	1.326	5.484	3.629
SIEMENS 1	Germany	RELAP5/PANBOX-E	1.361	1.431	1.332	1.332	5.466	3.639
SIEMENS 2	Germany	RELAP5/PANBOX-I	-	-	1.349	1.349	-	-
VTT	Sweden	TRAB-3D	1.411	1.475	1.367	1.353	4.908	3.479
ANL	USA	SAS-DIF3DK	1.364	1.436	1.338	1.338	5.392	3.592
		MARS/SNUNAC	**-**	**-**	**1.337**	**-**	**-**	**-**
		SNUNAC	**1.361**	**1.435**	**-**	**1.330**	**5.501**	**3.639**

표 4는 초기상태 노심의 Axial Offset을 나타낸 것이다.

표 4. 초기상태 노심의 Axial Offset

Participants	Country	Code	0	1	2	2a	3	4
PSU	USA	TRAC-PF1/NEM	0.7570	0.6980	0.0250	-	0.7660	0.7670
CSA/GPUN/EPRI	USA	RETRAN-3D MOD2.0	0.7436	0.6841	-0.0028	-0.0028	0.7356	0.7548
CEA-1	France	CRONOS2-FLICA4	0.7550	0.6999	-0.0158	-0.0115	0.7659	0.7673
CEA-2	France	CRONOS2-FLICA4/1D	-	-	-0.0172	-	-	-
GRS	Germany	QUABOX-CUBOX	0.8070	0.7530	-0.0080	-0.0080	0.8170	0.8170
KAERI 1	Korea	MARS/MASTER	0.7556	0.6985	0.0295	-	0.7662	0.7668
KAERI 2	Korea	MASTER	0.7556	0.6985	-0.0132	-0.0249	0.7662	0.7668
NETCORP	USA	DNP/3D	0.3183	0.2693	-0.0558	-0.0278	0.2660	0.2971
PURDUE 1	USA	TRAC-M/PARCS	0.7565	0.6983	0.0292	0.0292	0.7661	0.7668
PURDUE 2	USA	RELAP/PARCS	0.7603	0.6983	-	-	0.7661	0.7668
ROSSENDORF	Germany	DYN3D/R	0.7603	0.7018	-0.0090	-0.0206	0.7702	0.7709
SIEMENS 1	Germany	RELAP5/PANBOX-E	0.7591	0.7018	-0.0147	-0.0147	0.7683	0.7683
SIEMENS 2	Germany	RELAP5/PANBOX-I	-	-	0.0237	0.0237	-	-
VTT	Sweden	TRAB-3D	-	-	-	-	-	-
ANL	USA	SAS-DIF3DK	0.7540	0.6960	-	-	0.7630	0.7640
		MARS/SNUNAC	**-**	**-**	**0.0262**	**-**	**-**	**-**
		SNUNAC	**0.7564**	**0.6977**	**-**	**0.0124**	**0.7663**	**0.7672**

초기상태 노심의 해석결과를 보면 대부분의 전산코드들이 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 특히 2번 문제의 경우 MARS/SNUNAP의 결과는 MARS/MASTER의 결과와 매우 유사한

것으로 판단되며, 초기상태 노심을 정확히 해석하는 것으로 결론지을 수 있다. 과도상태의 경우 초기상태를 2번으로 정하고, 시간에 따른 노심 입구와 출구의 열수력 경계조건을 사용하여 3차원 노심해석과 노심 내 열수력 해석을 통해 노심의 과도상태 출력을 모사하게 된다. 그림 2에 과도상태시의 노심출력을 나타내었다.

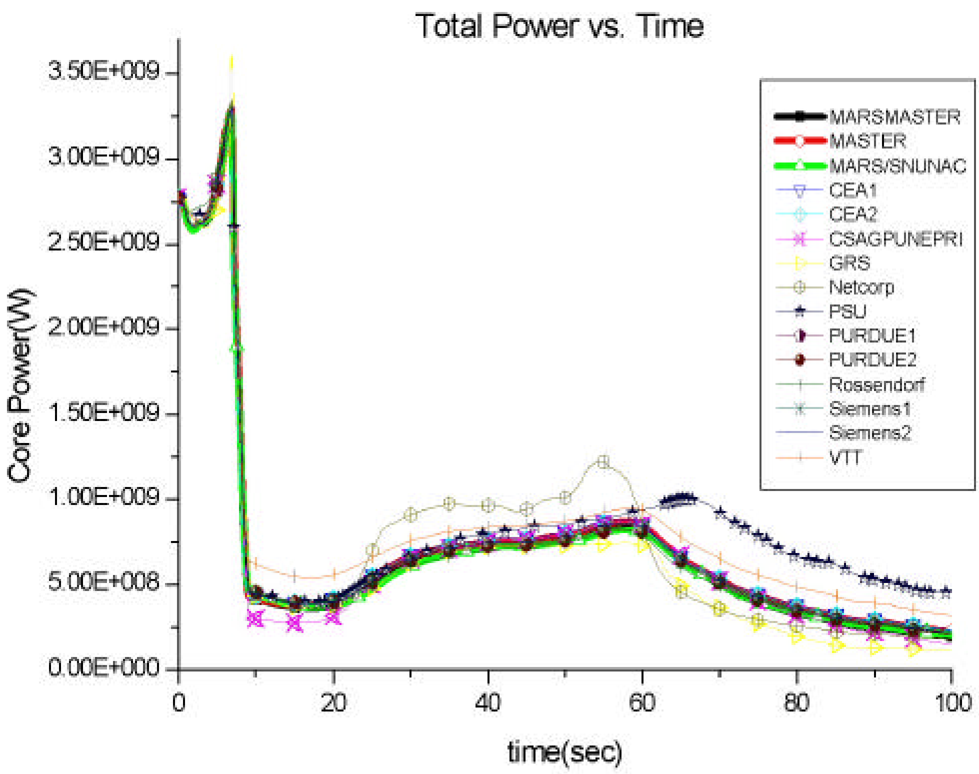

그림 2. 과도상태 노심의 시간별 노심 출력

과도상태 초기에는 주증기관 파손으로 인해 노심의 압력이 순간적으로 낮아짐에 따라 노심의 중성자 감속능력이 감소되고 그 결과 노심출력이 일시적으로 낮아지다가, 곧 과냉각된(over cooled) 냉각수의 유입에 따라 노심에 양의 반응도가 삽입되는 효과가 발생하여 노심출력이 증가하게 된다. 노심출력의 증가가 계속 이어지다가 원자로는 트립이 되며 노심출력은 급격히 감소하며, 초기상태의 1/10정도의 출력으로 떨어지게 된다. 그 이후 노심은 서서히 냉각되며 노심의 반응도도 서서히 회복됨에 따라 노심출력이 서서히 증가하게 되고, 약 60초 부근에서 2차 출력정점에 도달하고 다시 감소하게 된다. 그림 2의 결과를 살펴보면 소수의 전산코드를 제외한 대부분의 통합코드들이 거의 유사하게 과도상태 노심출력을 예측함을 볼 수 있다. 표 5는 과도상태중 세가지 시각에 대하여 노심의 최대 반경방향 출력

(Fxy)를 나타내고 있다. 표에서 5는 원자로가 트립되기 직전을 나타내고, 6번은 2차출력정점에 도달한 시각을 나타내며, 7번은 과도상태의 종료시점, 즉 100초에서의 결과를 보이고 있다.

표 5. 과도상태 노심의 최대 반경방향 출력(Fxy)

Participants	Country	Code	5	6	7
PSU	USA	TRAC-PF1/NEM	1.5214	3.3276	2.3675
CSA/GPUN/EPRI	USA	RETRAN-3D MOD2.0	1.5396	-	3.4301
CEA-1	France	CRONOS2-FLICA4	1.4830	3.4120	3.2980
CEA-2	France	CRONOS2-FLICA4/1D	1.4920	3.4140	3.2930
GRS	Germany	QUABOX-CUBOX	1.5064	3.3470	1.4300
KAERI 1	**Korea**	**MARS/MASTER**	**1.5092**	**3.5390**	**2.4004**
KAERI 2	**Korea**	**MASTER**	**1.5034**	**3.1455**	**2.4345**
NETCORP	USA	DNP/3D	1.5449	3.0394	2.8767
PURDUE 1	USA	TRAC-M/PARCS	1.5349	3.3140	2.4298
PURDUE 2	USA	RELAP/PARCS	1.4978	3.2825	2.4003
ROSSENDORF	Germany	DYN3D/R	1.4911	3.1363	2.2555
SIEMENS 1	Germany	RELAP5/PANBOX-E	1.4996	3.1146	2.3055
SIEMENS 2	Germany	RELAP5/PANBOX-I	1.5062	3.3864	2.3422
VTT	Sweden	TRAB-3D	1.5056	3.2284	3.0285
ANL	USA	SAS-DIF3DK	1.5115	3.3775	3.0592
		MARS/SNUNAC	**1.4935**	**3.4837**	**2.2614**

표 5에 의하면 여러 전산코드들이 대체로 유사한 결과들을 보이고 있지만, 그 편차는 2~3%정도에서 과도상태 종료시점인 7에서는 10%이상으로 나타나 초기상태의 노심해석 결과에 비해 비교적 결과의 차이가 크다. 그에 비해서, 같은 계통열수력 해석코드인 MARS를 사용하는 MARS/SNUNAC와 MARS/MASTER의 경우 1~5%정도의 차이를 보여 상대적으로 유사한 결과를 나타내었다. 이상의 결과로부터 이 연구에서 개발한 계통열수력/노심해석 통합코드 MARS/SNUNAC도 OCED 주증기관 파단 사고 벤치마크 문제를 만족스러운 정확도로 해석하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 노심-반사체 경계조건의 적용과 타당성 검토

4장에서는 노심의 반사체를 계산영역에 포함하고, 비선형 해석노달법(nonlinear analytic nodal method)를 사용하여 OECD 주증기관 파단 사고 벤치마크문제를 해석하고 결과 분석을 통해 MARS/SNUNAC를 검증하였다. 이 장에서는 비선형 노달전개법(nonlinear nodal expansion method)을 사용하여 해석노달법의 결과와 비교분석하고, 노심-반사체 경계조건을 적용하여 그 적용타당성을 검토하기로 한다.

표 6은 해석노달법과 노달전개법의 초기상태 노심해석결과를 정리하고 있다. 그리고 노심의 반사체를 계산영역에 포함하여 계산한 경우를 E로 나타내고 노심-반사체 경계조건을 사용한 경우를 B로 나타내어 괄호 안에 표시하였다.

표 6. 노심해석 방법론에 따른 초기노심 상태 해석결과

Parameter	ANM(E)	ANM(B)	NEM(E)	NEM(E)
K effective	1.00687	1.00696	1.00663	1.00683
Core Outlet Moderator Temperature	320.0	320.0	320.0	320.0
Core Average Moderator Density	0.714	0.714	0.714	0.714
Core Average Fuel Temperature	541.4	541.4	541.5	541.4
Axial Offset	0.0262	0.0307	0.0264	0.0312
Axial Power Factor(Fz)	1.103	1.111	1.101	1.112
Radial Peak Factor(Fxy)	1.337	1.337	1.338	1.338

결과를 보면 노달전개법은 해석노달법에 비해 유효증배계수의 경우 10~20pcm정도 낮은 결과를 보였고, 노심-반사체 경계조건을 적용한 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 약 10pcm정도 높게 유효증배계수를 예측하였다. 이러한 차이는 과도상태의 해석에 큰 영향을 끼치지 않는 정도의 차이로 판단된다. 즉 그림 3에 각 해석방법론별 과도상태 노심출력을 그래프로 나타내고 MARS/MASTER와 MASTER의 경우와 비교하였는데, 모든 해석방법들의 결과가 MASTER와는 약간의 차이를 보이고 있지만, MARS/MASTER의 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 노달전개법이나 해석노달법의 과도상태 노심출력 결과의 차이는 거의 없다고 볼 수 있다. 또한 노심-반사체 경계조건을 적용한 경우에도 반사체를 포함한 경우에 비해 과도상태 노심출력의 차이가 없음을 알 수 있다.

노심-반사체 경계조건을 적용하는 가장 큰 이유는 계산영역의 감소를 통한 전산시간의 감소이다. 이는 노심의 과도상태를 해석하는데 소요된 전산시간의 비교를 통해 확인할 수 있다. 표 7에 각 방법론별 벤치마크 문제 해석 소요시간을 나타내었다. 계산은 PENTIUM III-550MHz에서 수행하였으며, 단위는 초(sec)이다. 결과를 보면 일반적으로 알려진 바와 같이 노달전개법이 해석노달법보다 약 180초 정도 빠르게 문제를 해석하는 것으로 나타났고, 노심-반사체 경계조건을 적용한 경우 약 370초 정도의 전산시간을 감소시키는 것으로 나타났다. 노심의 반사체 노드는 전체 계산영역의 30% 정도를 차지하고 있으며 따라서 노심해석 계산시간을 30% 정도 감소하게 되고 전체적으로는 15% 이상의 전산시간이 감소됨을 알 수 있다.

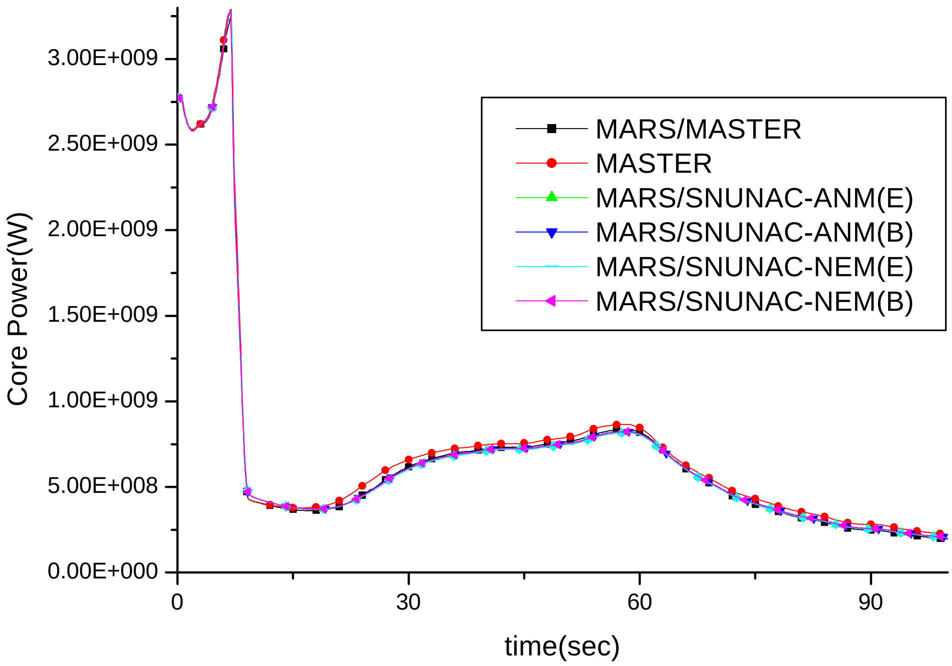

그림 3. 노심해석 방법론에 따른 과도상태 노심출력 해석결과

표 7. 노심해석 방법론에 따른 전산시간 비교

노심해석 방법	열수력/노심 계산소요시간(sec)	노심계산 소요시간(sec)
MARS/SNUNAC-ANM(E)	2122	1389
MARS/SNUNAC-ANM(B)	1752	1038
MARS/SNUNAC-NEM(E)	1948	1225
MARS/SNUNAC-NEM(B)	1572	933

6. 결론

본 연구에서는 계통열수력/노심해석 통합코드 MARS/SNUNAC를 개발하고 OECD 주증기관 파단 사고 벤치마크 문제를 해석하여 기존의 결과와 비교함으로써 검증계산을 수행하였다. 검증계산의 결과를 보면 MARS/SNUNAC는 벤치마크 문제 노심 초기상태의 유효증배계수와 최대출력인자들을 MARS/MASTER 및 다른 통합코드들의 결과와 거의 일치하게 계산함을 확인하였고, 과도상태시 노심의 전출력과 출력분포도 정확히 계산하는 능력이 있음을 확인하였다. 또한 노심-반사체 경계조건을 적용하여 벤치마크 문제를 해석하고 결과를 비교하여 그 유용성을 입증하였다.

참고 문헌

1. J. J. Jeong, *et, al.*, "Development of a Draft Version of MARS/MASTER: A Coupled Code of MARS 1.3 and MASTER 2.0," *Proc. Korean Nucl. Soc. Fall Mtg.*, Seoul, Korea, Oct. 30-31, 1998, p. 157 (Paper 86 in CDROM), 1998.
2. K. Ivenov and A. Baratta, "PWR MSLB Benchmark, Final Specifications," NEA/NSC/DOC(97) 15, OECD Nuclear Energy Agency, 1997.
3. Eun Ki Lee, Chang Hyo Kim, and Hyung Kook Joo, "New Core-Reflector Boundary Conditions for Transient Nodal Reactor Calculations," *Nucl. Sci. Eng.*, 121, pp.266-277, 1995.
4. Ku Young Chung and Chang Hyo Kim, "Application of Multigrid Correction Scheme Nonlinear Nodal Method Solutions with Use of Core-Reflector Boundary Conditions," *Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millenium*, PHYSOR 2000, Pittsburgh, USA.
5. B. Tayler and K. Ivanov, "Summary of the Results for 2nd Exercise," *Ad-hoc Meeting on OECD/NRC MSLB Benchmark*, Madrid, Spain, September, 1999.