

## MCNP-4A와 CASMO-3를 이용한 CE 16x16 핵연료집합체 임계도 및 붕출력 분포 해석

김교윤, 김강석, 박찬오  
한국원자력연구소

### 요 약

핵연료집합체 연소도 계산용 전산코드인 CASMO-3를 도입하여 한국고유핵설계체계를 개발하기 위해서는 CE형 핵연료집합체의 핵적특성을 파악하는 것은 필수적이다. 따라서, CASMO-3와 몬테칼로 전산코드인 MCNP-4A를 이용하여 CE형 16x16 핵연료집합체에 대한  $K_{inf}$  및 붕출력 분포를 비교 분석하였다.  $K_{inf}$ 의 경우는 CASMO-3에 의한 계산 결과가 0.5% 이내에서 MCNP-4A의 계산 결과와 일치하였으며, 붕출력분포의 경우도 제어봉 주변이나  $Gd_2O_3$  독봉을 제외하고는 CASMO-3에 의한 계산 결과가 MCNP-4A의 계산 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

### 1. 서 론

한국원자력연구소에서는 한국형노심핵설계 절차를 개발하고 있으며, 이 절차에서 노심의 연소 계산을 위한 균정수계산 코드로 CASMO-3[1]를 사용한다. CASMO-3가 이미 검증되어 상업용으로 사용되고 있지만 새로운 노심핵설계절차에서 이 코드를 국내에 가동중인 CE형 발전소에 적용하기 위해서는 CE형 핵연료집합체에 대한 핵적특성을 정확히 알고 있어야 한다. 임계실험동의 실측자료 또는 MCNP-4A[2]와 같은 몬테칼로 계산과 비교함으로써 핵적특성을 파악할 수 있다. 본 계산에서는 반응도 임계실험인 TRX-1 및 2, 그리고 붕출력 임계실험인 CE-32 임계실험에 대하여 벤치마크 계산을 수행하였다. 또한 각종 CE 16x16 핵연료집합체의 단일 집합체 계산을 통한 핵적특성을 알아보았다.

### 2. TRX 및 CE 임계 실험

본 벤치마크 계산의 대상으로 사용된 TRX-1과 TRX-2는 pitch가 1.8060cm 및 2.1740cm의 정육각형 구조이다. 반경이 0.4915cm인 금속 우라늄과 두께가 0.0711cm인 알루미늄 피복재와 경수 감속재로 구성되어 있다.

또한 본 계산에 이용된 CE 임계도 실험장치는 95.72cm x 95.72cm의 정사각형안에 lattice pitch가 1.524cm인 30x30 배열중 880개의 핵연료집합체가 있고 각 집합체는 반경 0.5080cm의 핵연료봉과 0.079883cm 두께의 Zircaloy-4로 구성되어 있다. 이중 중심 부분의 7x7 배열중 1/8 배열을 선택하였다.

### 3. CE 16x16 핵연료 집합체

본 계산에서는 그림1에 도시된 4가지 유형의 CE 16x16 단일 핵연료집합체를 핵적특성을 파악하기 위한 CASMO-3 및 MCNP-4A의 계산 대상으로 하였다. 핵연료집합체의 유형은  $UO_2$  핵연료봉으로만 구성된 경우(type A),  $B_4C$  제어봉이 장전된 경우(type B), WABA( $B_4C + Al_2O_3$ ) 독봉이 사용된 경우(type C) 그리고 Gadolinia 독봉(4 w/o  $Gd_2O_3$ , 천연 우라늄)을 사용한 경우에 대하여 각각 계산하였다. Boron 농도는 500 ppm, 핵연료봉 및 감속재 온도는 실온, 그리고 대기압의 조건하에 계산이 수행되었다.

### 4 벤치마크 계산

MCNP-4A 계산에서는 자체 제공되는 ENDF/B-V[3]의 연속에너지 핵단면적자료가 사용되었고 CASMO-3 계산에서는 40군의 J-Library가 사용되었다.

TRX-1 및 2의 경우, MCNP-4A 계산에서는 누출보정인자[4]를 이용하여 유효증배계수 및 기타 인자들을 구하였고 CASMO-3 계산에서는 측정된 buckling을 이용하였다. 출발입자수는 11만개가 가정되었다.

CE 임계 실험의 경우, CASMO-3의 코드 계산 능력의 한계 때문에 CASMO-3를 이용한 각 영역별 8군 군정수의 계산과 이를 이용한 DOT4.3[5] 계산으로 연계 처리되었다. MCNP-4A의 계산에서는 CASMO-3 계산 결과와의 비교를 위해 1/8 핵연료 집합체 구조가 모델링되었고 반사체 경계 조건이 이용되었다. 출발 입자수는 450만개가 가정되었다.

CE 16x16 단일 핵연료집합체의 경우, MCNP-4A 계산에서는 단일 집합체가 동일 규격 혹은 유사 규격의 동일 모형으로 구성되어 있기 때문에 반복 구조에 알맞은 lattice cell 조건이 모델링에 이용되었다. 출발입자수는 100만개가 가정되었다.

### 4. 결과 및 토의

TRX-1 및 2에 대한 MCNP-4A 및 CASMO-3의 계산 결과를 실험치와 비교하여 표1에 제시하였다. 표1에 제시된 바와 같이 MCNP-4A의 계산 결과는  $\rho^{28}$  이 약간 과대 평가되고 있는 것을 제외하면  $K_{eff}$  및 반응율들은 TRX-1 및 TRX-2의 측정 오차 범위내에서 일치하고 있다. CASMO-3의 경우는 TRX-1에서  $\delta^{28}$ 이 약간 과대 평가되었고 TRX-2에서  $C^*$ 가 약간 과소평가된 것을 제외하고는 TRX-1 및 TRX-2의 측정 오차 범위내에서 일치함을 보여주었다.

CE 32 임계 실험에 대한 실험치에 대한 계산 결과는 그림2에 제시하였다. Sd (측정-MCNP) 및 Sd (측정-CASMO)는 각각 1.013% 및 1.169%이며, Sd (MCNP-CASMO)는 0.682%로 MCNP와 CASMO는 상당히 유사한 봉출력분포를 보여준다.

CE 16x16 단일 집합체에 대한 CASMO 및 MCNP 계산 결과를 그림3에 제시하였다. 그림3에 나타난 바와 같이 무한증배계수는 비교적 잘 일치하고 있다. 봉출력분포는 type A와 C의 경우는 각각 Sd가 0.798%와 0.904%로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나 type B와 D의 경우는 상당히 큰 차이를 나타내고 있다.

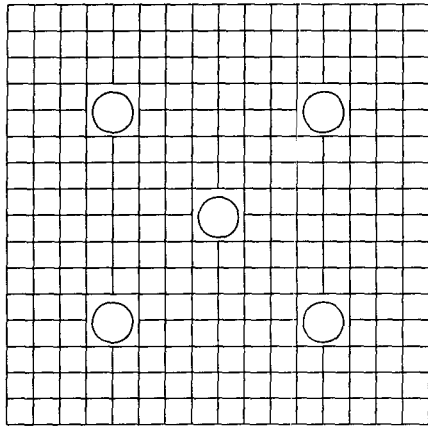
중성자 흡수단면적이 상당히 큰 조질붕이나 gadolinia독봉을 사용한 경우 그림3에서와 같이 제어봉이나 gadolinia독봉 주변의 붕출력에서 상당한 차이를 보여주는데 중성자속이 급격히 변하는 지점에서 CASMO-3 코드가 적절히 묘사해 주지 못하고 있음을 시사해준다.

## 5 결론

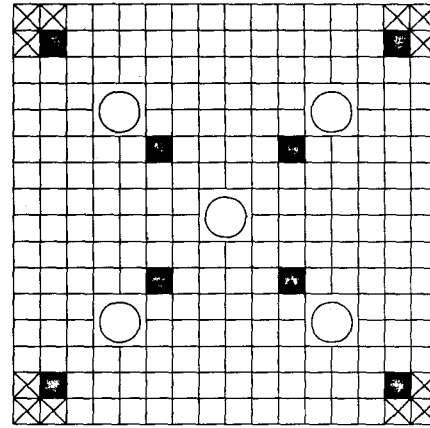
CE형 핵연료 집합체에 대한 핵적 특성의 평가를 위해 사용된 MCNP-4A와 CASMO-3의 계산 결과는 TRX-1 및 TRX-2에 대한 유효증배계수와 반응율들이 비교적 일치하는 것으로 평가되었다. CE 임계 실험에 대한 CASMO-3나 MCNP-4A의 측정치에 대한 붕출력분포도 0.682% 정도에서 일치하고 있는 것으로 평가되었다. CE형 단일 집합체에 대해서도 제어봉이나 독봉 주변을 제외하고는 CASMO-3의 결과는 측정치나 몬테칼로 결과에 잘 일치하고 있다. 향후에는 MCNP-4A의 자체 핵단면적자료에 누락된 Erbium의 보강과 함께, CE형 핵연료집합체에 대한 checker board 형태의 계산을 통한 핵적특성의 평가도 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

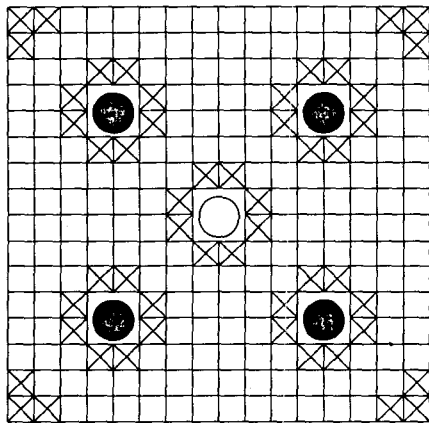
1. M. Edenius and A. Ahlin, "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program, User's Manual," STUDEVIK/NFA-86/7 (1986).
2. J. F. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," Version 4A, LA-12625-M, LANL(1993)
3. R. Kinsey, Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File, ENDF," BNL-NCS-50496(ENDF102) 2nd Edition(ENDF/b-V)(1979)
4. J. Hardy et. al., "A Study of Physics Parameters in Several H<sub>2</sub>O-Moderated Lattices of Slightly Enriched and Natural Uranium," Nucl. Sci. and Eng. Vol. 40, 101-115(1970)
5. W.A. Rhoades,"An Updated Version of the DOT4 One- and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code," ORNL-5851, ORNL (1982)



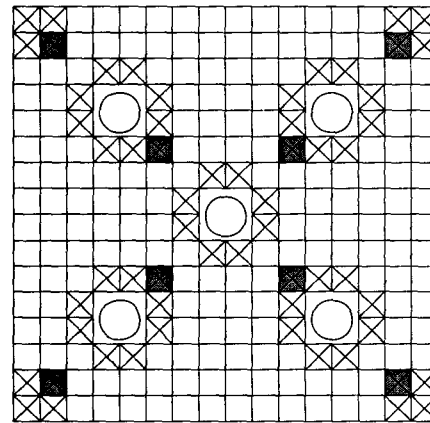
2-A. FA Type A



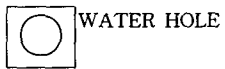
2-C. FA Type C



2-B. FA Type B



2-D. FA Type D



WATER HOLE



CONTROL ROD



LOW ENRICHMENT FUEL PIN



NORMAL FUEL PIN



$Al_2O_3 + B_4C$  BURNABLE POISON



$Gd_2O_3$  BURNABLE POISON

그림 1. CE 16x16 핵연료집합체 유형

표 1. 유효증배계수 및 물리학적인자의 비교

임계 실험 장치	Parameter	Measured	MCNP-4A	CASMO-3
TRX-1	Keff	1.0000	0.99978[0.02]	0.9942[0.58]
	$\delta^{28}$	0.0946(4.33)	0.09814[3.74]	0.0990[4.65]
	$\delta^{25}$	0.0987(1.01)	0.09970[1.01]	0.0997[1.01]
	$\rho^{28}$	1.3200(1.59)	1.38201[4.70]	1.3280[0.61]
	$C^*$	0.7920(1.00)	0.79295[0.12]	0.7838[1.04]
TRX-2	Keff	1.0000	1.00034[0.03]	0.9970[0.31]
	$\delta^{28}$	0.0693(5.05)	0.06870[0.87]	0.0705[1.73]
	$\delta^{25}$	0.0614(1.30)	0.06130[0.16]	0.0611[0.49]
	$\rho^{28}$	0.8370(1.91)	0.85533[2.19]	0.8331[0.47]
	$C^*$	0.6460(0.93)	0.63829[1.19]	0.6344[1.80]

주)  $\delta^{28}$  :  $U^{238}$  fission rate to  $U^{235}$  fission rate ( ) : 측정 오차(%)  
 $\delta^{25}$  : epithermal to thermal  $U^{235}$  fission rate. [ ] : 측정치에 대한 오차(%)  
 $\rho^{28}$  : epithermal to thermal  $U^{238}$  capture rate  
 $C^*$  :  $U^{238}$  capture rate to  $U^{235}$  fission rate

	Sm	Sd	Sd'			
						0.000
MEASURED	0.661%					0.000
CASMO/DOT		1.169%	0.682%			0.000
MCNP	0.517%	1.013%				
					1.126	1.325
					1.139	1.318
					1.136	1.309
				1.089	1.059	1.049
				1.103	1.045	1.052
				1.095	1.042	1.048
			0.000	1.227	1.014	0.983
			0.000	1.238	1.018	0.976
			0.000	1.237	1.022	0.980
		0.000	0.000	1.190	0.992	0.925
		0.000	0.000	1.205	0.980	0.933
		0.000	0.000	1.198	0.980	0.925
	0.932	1.127	1.157	1.006	0.896	0.902
	0.939	1.129	1.153	1.005	0.917	0.890
	0.939	1.137	1.154	1.002	0.917	0.894
0.750	0.833	0.882	0.926	0.871	0.855	0.837
0.759	0.818	0.876	0.897	0.878	0.856	0.845
0.762	0.816	0.889	0.916	0.878	0.854	0.835

(주) Sm : 측정 및 MCNP 계산 오차(%)  
 ... Sd : 측정치에 대한 계산의 % 차이  
 . Sd' : MCNP에 대한 CASMO/DOT의 % 차이

그림 2. CE-32 임계 실험 측정치 및 MCNP 결과와 비교한 CASMO 의 붕출력을 분포

Kinf. Sak Sap Sdp							Kinf. Sak Sap Sdp															
0.000							MCNP	1.34025	0.079x	0.595x		0.000					MCNP	1.24128	0.083x	0.598x		
0.000							CASMO	1.33924	-		0.798x	0.000					CASMO	1.24693			0.904x	
1.130	1.013											1.132	0.989									
1.126	1.016											1.134	0.991									
0.960	0.967	1.005										0.971	0.900	0.000								
0.968	0.970	1.017										0.966	0.890	0.000								
0.924	0.972	1.130	0.000									0.937	0.952	1.069	0.000							
0.932	0.967	1.127	0.000									0.941	0.945	1.050	0.000							
0.924	0.965	1.120	0.000	0.000								0.941	0.971	1.132	0.000	0.000						
0.922	0.960	1.125	0.000	0.000								0.947	0.978	1.137	0.000	0.000						
0.907	0.940	1.019	1.140	1.150	1.013							0.955	0.969	1.035	1.163	1.153	1.008					
0.919	0.942	1.010	1.130	1.132	1.018							0.956	0.978	1.042	1.160	1.147	0.995					
0.923	0.941	0.957	0.984	0.989	0.966	0.958						0.966	0.970	0.992	1.020	0.991	0.894	0.000				
0.929	0.939	0.960	0.982	0.984	0.968	0.965						0.974	0.982	0.998	1.011	0.989	0.889	0.000				
0.978	0.974	0.990	1.019	1.007	0.989	1.006	1.069					1.026	1.019	1.020	1.030	1.008	0.975	0.843	0.937			
0.981	0.985	0.992	0.999	1.001	1.001	1.012	1.063					1.032	1.034	1.035	1.030	1.008	0.968	0.827	0.918			

3-A. FA Type A

3-C. FA Type C

Kinf. Sak Sap Sdp							Kinf. Sak Sap Sdp															
0.000							MCNP	1.13333	0.090x	0.632x		0.000					MCNP	1.23961	0.084x	0.593x		
0.000							CASMO	1.13593	-		1.776x	0.000					CASMO	1.23862			1.942x	
1.191	1.141											1.099	1.053									
1.175	1.148											1.086	1.052									
1.096	1.022	0.946										1.019	0.940	0.031								
1.091	1.024	0.923										1.025	0.921	0.083								
1.029	0.963	0.756	0.000									0.987	1.000	1.021	0.000							
1.020	0.962	0.716	0.000									0.991	0.996	0.987	0.000							
0.978	0.942	0.748	0.000	0.000								0.997	1.038	1.080	0.000	0.000						
1.005	0.954	0.713	0.000	0.000								0.996	1.036	1.087	0.000	0.000						
1.009	0.978	0.929	0.749	0.749	0.948							0.991	1.028	1.099	1.121	1.121	1.077					
1.020	0.985	0.912	0.720	0.724	0.928							1.004	1.031	1.112	1.112	1.100	1.058					
1.035	1.018	0.998	0.972	0.992	1.034	1.089						1.003	1.012	1.042	1.071	1.058	0.957	0.031				
1.054	1.036	1.006	0.982	0.987	1.027	1.094						1.021	1.031	1.053	1.073	1.049	0.921	0.081				
1.111	1.103	1.097	1.074	1.092	1.129	1.068	1.153					1.053	1.063	1.072	1.080	1.059	1.014	0.886	0.990			
1.130	1.121	1.108	1.099	1.106	1.136	1.065	1.146					1.081	1.084	1.087	1.083	1.060	1.010	0.850	0.955			

3-B. FA Type B

3-D. FA Type D

(주) Sak : Kinf 계산 오차, Sap : 붕출력율의 계산 오차, Sdp : MCNP에 대한 CASMO의 x 차이

그림 3. CE 16x16 핵연료 집합체 유형별 MCNP 결과와 비교한 CASMO 의 Kinf 및 붕출력율 분포