

MCNP6을 리용한 경수로연료묶음의 연소계산

박수미, 채정숙

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《주체적인 핵동력공업을 창설하고 첨단과학기술의 토대우에서 발전시켜나가야 합니다. 우리의 힘과 기술로 능력이 큰 원자력발전소를 빨리 건설하여야 합니다.》

원자로물리계산체계의 비교자료로 흔히 리용되는 MCNP는 연소기능을 비롯한 새로운 기능들이 추가된 새 판본들이 계속 개발되어 로심동적상태계산에 적극 리용되고있다.[1]

현재 세계적으로 MCNP를 리용하여 원자로로심의 연소계산이 활발히 진행되고있다.[2]

본문에서는 MCNP6을 리용하여 열출력이 70MW인 경수로의 연료묶음에서 연소도에 따르는 로물리특성량들의 변화를 평가하였다.

1. 연료묶음의 구조와 주요정수, MCNP계산모형

계산에서 리용된 열출력이 70MW이고 로심평균비출력이 14.9MW/t인 경우로[3]의 로심은 연료농축도가 각각 1.8, 2.4, 3.0%인 세가지 종류의 연료묶음 120개로 이루어졌으며 순환주기는 637d이다. 그가운데서 농축도가 3.0%인 연료묶음의 배치구조와 주요정수들은 그림 1 및 표 1과 같다.

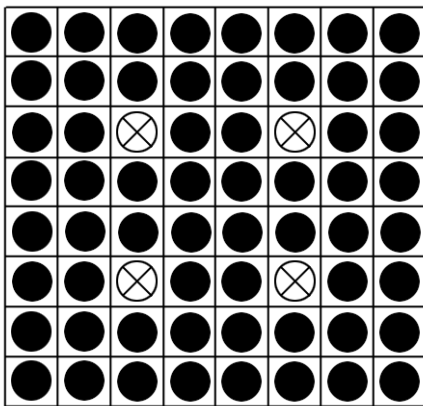


그림 1. 연료물음의 구조

유기체 모형과 $S(\alpha, \beta)$ 모형을 다 리용하였다.

MCNP실행에서는 세대당 10만개의 중성자를 발생하였으며 50개 세대가운데서 첫 5개 세대를 무시하였다.

연료묶음은 8×8 정방형격자구조를 가지며 연료 봉세포, 물봉세포로 구성되었다.

MCNP계산을 위하여 연료봉과 물봉을 각각 universe 1, 2로 정의하고 모든 세포들은 세포카드, 면카드, 물질카드에서 정의하였으며 묶음경계에서 거울반사경계조건을 적용하고 림계계산을 위하여 kcode카드와 ksrc원천정의카드를 정의하였다.

BURN카드를 리용하여 연소결음, 동위원소밀도 변화를 고찰하려는 물질을 정의하고 출구방식을 설정하였다. 연소결음은 5, 15, 30, 60d씩 각각 12번, 120d씩 15번 반복하도록 하였으며 매 연소단계에서 출력은 묶음출력 0.583MW로 유지하였는데 이것은 POWER와 PFRAC열쇠단어로 정의하였다.

리용된 핵반응자름면적자료는 평가된 핵자료 ENDF/B-VI이며 열중성자들에 대하여 두 모형 즉 자

표 1. 연료묶음의 주요정수

연료묶음		외경	1cm
격자배렬	8×8정방형	연료심직경	0.843cm
묶음크기	10.64cm×10.64cm	외피재료	지르칼로이
연료봉개수	60개	외피밀도	6.478g/cm ³
격자걸음	1.33cm	외피두께	0.07cm
유효높이	130cm	랭각재(H ₂ O)	
묶음출력	0.583MW	작업온도	373.15K
연료봉		작업압력	0.2MPa
연료물질	UO ₂	H(질량몹)	11.19%
농축도	3.0%	O(질량몹)	88.81%
밀도	10.114g/cm ³		

계산이 진행된 작업온도와 압력조건은 연료온도 571.15K, 랭각재온도 373.15K, 압력 0.2MPa이다.

2. 계산결과 및 분석

MCNP계산에서 연료묶음의 기하학적구조가 정확히 반영되었는가를 보기 위하여 출력분포를 계산하였다.(그림 2) 그림 2에서 보는바와 같이 출력분포는 대칭성을 잘 만족시킨다.

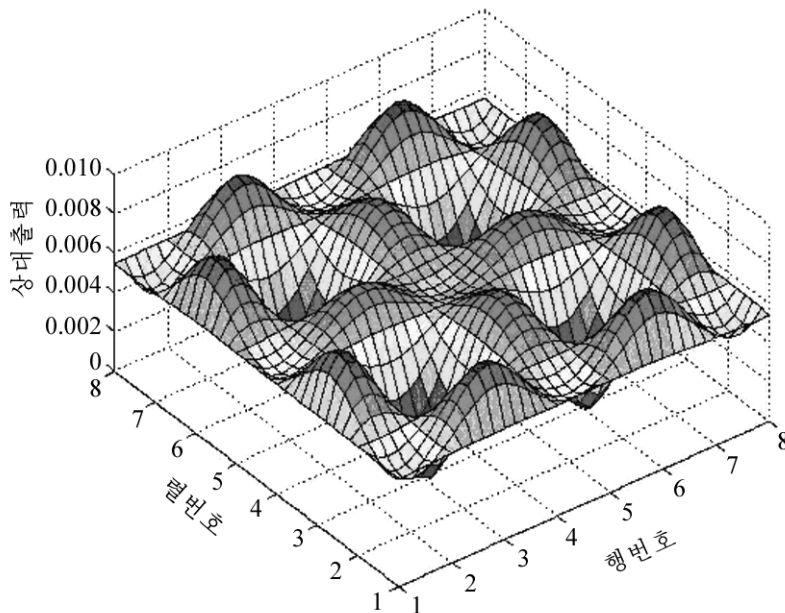


그림 2. 연료묶음의 출력분포

우리는 MCNP6을 리용하여 저농축UO₂연료의 연소도에 따르는 무한증식결수변화, 무거운 동위원소들의 핵밀도변화를 고찰하였다.

1) 연소도에 따르는 무한증식결수의 변화

연소도에 따르는 무한증식결수(k_{∞})의 변화는 그림 3과 같다.

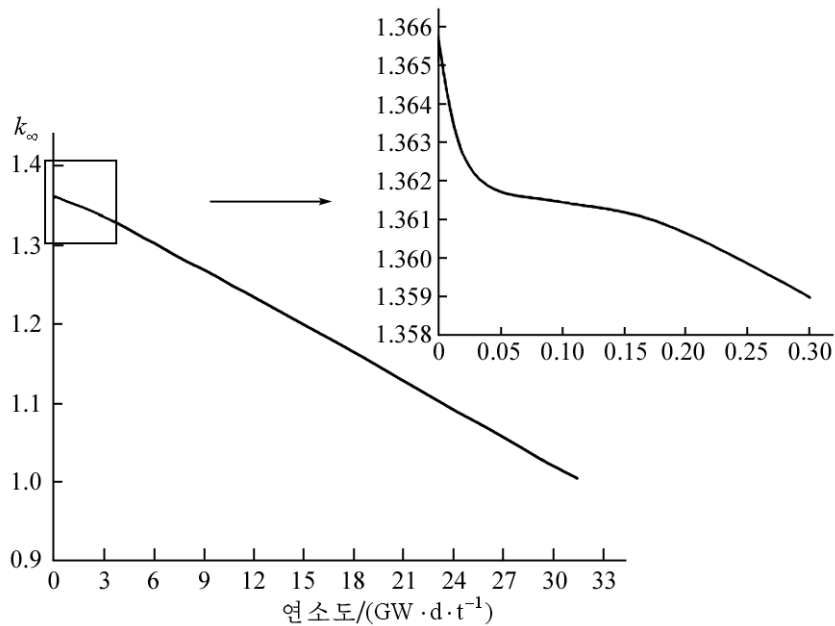


그림 3. 연소도에 따르는 k_{∞} 의 변화

연소도에 따르는 k_{∞} 와 표준분산의 값은 표 2와 같다.

표 2. 연소도에 따르는 k_{∞} 와 표준분산의 값

연소도/ (GW·d·t ⁻¹)	k_{∞}	표준분산 /%	연소도/ (GW·d·t ⁻¹)	k_{∞}	표준분산 /%	연소도/ (GW·d·t ⁻¹)	k_{∞}	표준분산 /%
0	1.365 67	0.128	6.163	1.301 02	0.072	16.990	1.176 71	0.075
0.075	1.361 17	0.093	7.065	1.290 31	0.075	18.790	1.155 31	0.073
0.301	1.359 47	0.066	7.967	1.279 78	0.090	20.590	1.133 48	0.076
0.752	1.355 50	0.080	8.869	1.270 48	0.069	22.400	1.110 93	0.082
1.653	1.348 20	0.086	9.771	1.260 50	0.078	24.200	1.089 00	0.067
2.555	1.340 29	0.087	10.670	1.249 35	0.093	26.000	1.068 89	0.071
3.457	1.331 69	0.089	11.570	1.239 26	0.088	27.810	1.046 77	0.094
4.359	1.321 13	0.100	13.380	1.218 22	0.077	29.610	1.024 77	0.080
5.261	1.311 35	0.093	15.180	1.197 70	0.084	31.420	1.004 62	0.076

그림 3과 표 2에서 보는바와 같이 무한증식계수는 Xe해독효과로 하여 연소초기에 급격히 감소하며 그후 연소도가 증가하는데 따라 거의 선형적으로 감소한다.

순환길이 637d에 해당한 연소도 8.869GW·d/t에서 무한증식계수는 $k_{\infty}=1.270$ 48로서 임계를 훨씬 초과하는데 이것은 농축도가 가장 높은 연료묶음을 취하였고 또 루실을 고려하지 않은 무한증식계수이기때문이다.

2) 연소도에 따르는 연료속의 무거운 동위원소들의 핵밀도변화

연소도에 따르는 동위원소들의 핵밀도변화는 그림 4와 같다.

연소도가 증가할 때 ^{238}U 의 감소량은 상대적으로 매우 적으므로 무시하고 ^{235}U 와

Pu의 동위원소들의 핵밀도변화만을 보여주었다. 그림 4에서 보는바와 같이 ^{235}U 는 빨리 감소되어 연소도 $31.42\text{GW}\cdot\text{d}/\text{t}$ 에 이르면 초기량의 15.05%로 감소된다. Pu동위원소들의량은 처음에는 상대적으로 빨리 증가하지만 점차 느리게 증가하여 $31.42\text{GW}\cdot\text{d}/\text{t}$ 의 연소도에 도달하였을 때 분열성플루토늄 ^{239}Pu , ^{241}Pu 의 생성량은 ^{235}U 감소량의 16.34, 3.21% 정도이다.

연료묶음의 무한증식계수와 무거운 동위원소들의 핵밀도변화에 대한 계산결과는 가연성독물질이 없는 전형적인 경수로연료 집합체의 연소특성에 대한 물리적표상과 잘 일치하며 k_{∞} 의 분산은 0.1%이하로서 매우 작다. 이것은 계산이 정확히 진행되었다는 것을 보여준다.

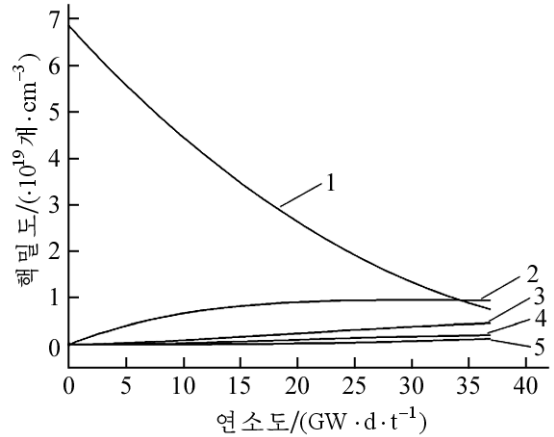


그림 4. 연소도에 따르는 동위원소들의 핵밀도변화
1- ^{235}U , 2- ^{239}Pu , 3- ^{240}Pu , 4- ^{241}Pu , 5- ^{242}Pu

맺는 말

MCNP6을 리용하여 경수로연료묶음의 연소계산을 진행하고 연소도에 따르는 무한증식계수, 연소도에 따르는 U, Pu 동위원소들의 핵밀도변화를 평가하였다.

참고 문헌

- [1] Denise B. Pelowitz; MCNP6 User's Manual, LA-CP-13-00634, Rev.0, 224~231, 499~503, 2013.
- [2] Gregg McKinney et al.; MCNPX Features for 2006, ANS Winter Meeting, Albuquerque, 12, 2006.
- [3] 马昌文; 核能利用的新途径-低温对核能供热, 科学出版社, 196~211, 1995.

주체 109(2020)년 9월 5일 원고접수

Burn-up Calculation in Fuel Assembly of LWR Using MCNP6

Pak Su Mi, Chae Jong Suk

By using MCNP6, we carried out burn-up calculation in fuel assembly of LWR and evaluated changes of infinite multiplication factor and nuclear densities of Uranium and Plutonium isotopes with burn-up.

Keywords: MCNP, fuel assembly, burn-up calculation