

사용후핵연료 금속저장체에 대한 핵임계 안전해석

신 희성, 신 명원*, 신 영준, 김 익수, 노 성기, 김 명현*

한국원자력연구소, *경희대학교

요 약

ORIGEN2코드의 검증계산을 통해 PWR 사용후핵연료 조성핵종의 핵종량에 대한 핵임계측면에서 보수성을 가지는 안전인자를 산출하였고, MCNP코드의 검증계산으로 95/95 신뢰구간에서의 계산오차를 구하였다. 이를 바탕으로 직경이 1.2567 cm이고 길이가 380.5 cm인 196 개 금속봉을 장전한 캐니스터 (금속저장체)가 x-y 방향으로 무한히 배열된 경우에 대해 캐니스터의 두께, 간격 및 외부의 공기중 수분농도에 따른 핵임계 안전해석을 수행하였다. 그 결과, 캐니스터의 두께가 7 mm일 때 공기중 수분농도가 0.30 g/cm³이고 캐니스터간의 간격이 6.0 cm인 경우의 최종핵임계도값은 0.94130로서 최대허용핵임계값 (0.942)보다 적은 값을 보였다.

1. 서 론

사용후핵연료의 금속저장체[1]에 대한 '연소도를 고려한 핵임계도 분석'을 수행하기 위해서는 사용후핵연료 조성핵종의 핵종량 예측코드와 핵임계도 계산코드에 대한 검증계산이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 ORIGEN2코드의 검증계산을 통하여 안전인자를 산출하였으며, 사용후핵연료 금속저장체와 유사한 핵임계 실험자료를 이용하여 MCNP코드의 계산오차를 결정하였다. 이를 바탕으로 사용후핵연료 금속저장체에 대한 핵임계 안전해석을 수행하였다.

2. 계산모델

직경이 1.2567 cm이고 길이가 380.5 cm인 196 개의 금속봉을 캐니스터에 그림 1과 같이 배열하였다. 1 개 캐니스터의 장전량은 4개 사용후핵연료 집합체에 속한 악티나이드 핵종의 총량에 해당한다. 그림 1에 제시된 금속저장체가 x-y 방향으로 무한 격자배열된 저장모델을 가정하고, 저장시설의 구조물은 무시하여 보수적인 핵임계도 분석이 되도록 하였다. 실제 금속봉에는 미량의 란타나이드 핵종이 포함될 수 있을 것이지만, 보수적인 관점에서 악티나이드 핵종만 고려하였다. 캐니스터의 재질은 철로 가정하였고, 캐니스터 내부는 수증기 포화 공기가 장입된 것으로 가정하였다.

3. MCNP 코드의 계산오차 및 최대허용핵임계도값 결정

표 1에 제시한 바와 같이, 사용후핵연료 금속저장체와 유사한 25 가지의 핵임계 실험자료[2,3]를 검증계산용 실험자료로 선택하였다. 표 1에 제시한 실험자료의 조건과 그림 1에서 제시한 금속저장체의 모델을 비교해 볼 때, 이들 실험자료가 금속저장체에 대한 핵임계도 계산을 위한 최적의 실험자료라고 단정할 수는 없지만, 현재 입수할 수 있는 실험자료 중에서 가장 유사한 실험자료로 생각되어 이를 선택하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 두 가지 가정을 하였다. 첫째 표 1의 실험자료는 이상적인 검증용 실험자료들의 모집단에서 무작위로 추출된 표본으로 가정하였다. 두 번째 가정은 금속저장체의 모델이 그 모집단에 속한다는 것이다. 이와 같은 가정하에 핵임계도 계산에 사용할 전산코드 MCNP와 핵자료 ENDF/B-V,VI의 검증계산을 수행하였다.

각 실험자료에 대한 핵임계도 계산값과 실험값을 비교하여 실험값에 대한 계산값의 오차를 표 1에 제시하였다. 이 계산오차는 계산오차의 모집단에서 무작위로 추출된 표본으로 볼 수 있다. 계산오차 표본의 평균값과 표준편차를 다음과 같은 두 식으로 각각 구할 수 있다.

$$\overline{\Delta k} = \frac{\sum_i \frac{\Delta k_i}{\sigma_{\Delta k_i}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{\Delta k_i}^2}} \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta k} = \frac{N}{N-1} \left[\frac{\sum (\frac{\Delta k_i}{\sigma_{\Delta k_i}})^2}{\sum (\frac{1}{\sigma_{\Delta k_i}^2})} - \overline{\Delta k}^2 \right] \quad (2)$$

계산오차 표본의 평균값과 표준편차를 이용하여 모집단의 평균값이 존재하는 95% 신뢰구간을 추정할 수 있고, 이를 이용하여 모집단에 속한 임의의 계산오차 표본 (금속저장체 모델)에 대한 95/95 신뢰도를 갖는 범위를 결정할 수 있다. 보수적인 핵임계도 측면에서 95/95 신뢰도 범위의 상한값을 취해야 한다. 따라서 금속저장체에 대한 핵임계도 계산에서 계산코드와 핵자료의 95/95 신뢰도를 갖는 계산오차 (Δk_u)는 다음과 같은 식으로 표현된다[4].

$$\Delta k_u = -\overline{\Delta k} + k_n \overline{\sigma_{\Delta k}} \quad (3)$$

k_n 은 95/95의 신뢰도를 갖는 허용한계(tolerance limit)[5]이다.

표 1의 계산오차값을 식 (1)과 (2)에 대입하여 계산오차 표본의 평균값과 표준편차를 구하면, 각각 0.00153과 0.00405가 된다. 이 값과 95/95 신뢰도의 $k_{25}=2.292$ 를 식 (3)에 대입하면 계산오차는 0.00775가 된다. 이 값은 금속저장체에 대한 핵임계도 분석에 사용할 MCNP 코드와 ENDF/B-V,VI 핵자료의 계산오차다.

사용후핵연료의 저장시설에 대한 미임계한계치 0.950[6]를 적용하고, 앞에서 결정한 계산오차를 고려하면 금속저장체의 핵임계도 안전해석에 적용되는 최대허용핵임계도값 (maximum allowable multiplication factor)은 0.942가 된다[7].

4. ORIGEN2 코드의 핵종량 계산값에 대한 안전인자 결정[1]

본 연구에서는 19개 가압경수로의 사용후핵연료 조성핵종의 핵종량 실험값과 ORIGEN2 계산값

표 1. 검증계산용 실험자료 및 계산오차 결정자료

Case	Form	Enrichment (%)	H/R ratio	Experimental data		Calculated Data		$\Delta k \pm \sigma_{\Delta k}$
				k_{eff}	σ	k_{eff}	σ	
HMF-002 (TOPSY)	metal (alloy)	93.5	2.043	1.000	0.003	1.00227	0.00093	0.00227±0.00314
IMF-001 (Jemima)	metal	93.4	1.173	0.9988	0.0009	1.00275	0.00027	0.00395±0.00094
IMF-002	metal	93.3	1.767	1.000	0.003	1.00771	0.00051	0.00771±0.00304
U-cylinder	metal	10.9	4.48	1.000	0.003	0.99853	0.00075	-0.00147±0.00309
U-cylinder	metal	14.11	1.66	1.000	0.003	0.99640	0.00099	-0.00360±0.00316
Water-reflected U-sphere	metal	97.6	10.681	1.000	0.003	0.99679	0.00160	-0.00321±0.00340
Sample1	metal	93.26	8.446	1.000	-	0.99895	0.00089	-0.00105±0.00089
Sample15	metal	97.6	1.137	1.000	-	0.00012	0.00103	0.00012±0.00103
LCT-001	UO ₂	2.35	164.773	0.9998	0.0037	1.01697	0.00200	-0.00107±0.00402
LCT-002	UO ₂	4.31	145.573	0.9997	0.0020	1.00049	0.00186	0.00079±0.00273
LCT-003	UO ₂	2.35	163.636	1.000	0.0039	0.98714	0.00171	-0.01286±0.00426
LCT-004	UO ₂	4.31	147.32	0.9998	0.0037	1.01697	0.00200	0.01717±0.00421
LCT-006	UO ₂	2.6	177.971	1.000	0.003	1.0017	0.0007	0.00170±0.00308
LCT-010	UO ₂	4.31	145.573	1.000	0.0021	1.00737	0.00204	0.00737±0.00293
LCT-017	UO ₂	2.35	163.636	1.000	0.0031	1.00768	0.00151	0.00768±0.00345
B&W-1	UO ₂	2.46	271.84	1.0002	0.0005	0.99989	0.00305	-0.00031±0.00309
B&W-3	UO ₂	2.46	271.84	1.0000	0.0006	1.00919	0.00271	0.00919±0.00278
B&W-4	UO ₂	2.46	271.84	0.9999	0.0006	0.99914	0.00264	-0.00076±0.00271
B&W-5	UO ₂	2.46	271.84	1.0000	0.0007	1.00984	0.00258	0.00957±0.00263
B&W-6	UO ₂	2.46	271.84	1.0097	0.0012	1.01387	0.00308	0.00417±0.00331
B&W-9	UO ₂	2.46	271.84	1.0030	0.0009	1.00278	0.00618	-0.00022±0.00625
B&W-10	UO ₂	2.46	291.62	1.0000	0.0006	1.00589	0.00300	0.00589±0.00306
B&W-15	UO ₂	2.46	291.62	0.9998	0.0016	0.99026	0.00331	-0.00954±0.00368
B&W-17	UO ₂	2.46	291.62	1.0000	0.0010	1.00137	0.00264	0.00137±0.00282
B&W-19	UO ₂	2.46	291.62	1.0002	0.0010	0.99959	0.00324	-0.00061±0.00339

을 비교하여 앞 절에서와 유사한 방법으로 95/95 신뢰도를 갖는 ORIGEN2 계산오차의 범위를 결정하였다[2]. 핵분열 물질(fissile)인 경우에는 참값의 상한값을 취하고, 비핵분열성 물질(non-fissile)인 경우는 하한값을 취해 안전인자를 결정하여, 핵임계 안전해석에 기본입력 자료로 활용시 핵임계도 관점에서 보수성을 가질 수 있도록 하였다. 각 핵종에 대한 안전인자의 값은 표 2의 마지막 칸에 제시하였다.

5. 금속 저장체에 대한 핵임계 안전해석

본 연구에서는 저장체간의 간격, 저장체의 두께, 그리고 공기중 수분농도를 변화시키면서 핵임계도 분석을 수행하여 정상상태를 포함한 가상사고시에서도 핵임계 안전성을 확보할 수 있는 조건을 제시하였다. 캐니스터의 두께를 4 mm에서 10 mm까지 변화시키면서, 동시에 공기중 수분의 농도와 캐니스터간의 간격을 변화시키면서 핵임계 안전성이 확보되는 조건을 찾았다.

캐니스터의 두께가 7 mm인 경우에 수분농도가 0.30 g/cm^3 이고, 캐니스터간의 간격이 6 cm인 경우에 최대핵임계도값은 0.93209 ± 0.00415 로 나타났다. 그림 2와 3에서 볼 수 있듯이 이 값은 95/95 신뢰도를 적용할 때, 최종핵임계도값은 0.94130로서 최대허용치 (0.942)보다 약간 적은 값을 갖는다. 8 mm인 경우에는 수분농도가 0.35 g/cm^3 이고, 캐니스터간의 간격이 6.5 cm인 경우에 최대핵임계도값은 0.90874 ± 0.00364 로서 95/95 신뢰도를 적용하면 최종핵임계도값은 0.91682로 최대허용치보다 충분히 적은 값을 갖는다. 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 캐니스터의 두께가 7 mm 이상이 되면 캐니스터의 외부조건에 관계없이 금속저장체가 무한배열된 경우에도 핵임계 안전성을 확보할 수 있을 것으로 추정된다.

6. 결론 및 향후 계획

ORIGEN2와 MCNP/ENDF/B-IV의 검증계산을 통하여 95/95 신뢰도를 갖는 안전인자 및 계산 오차를 각각 산출하고, 이를 이용하여 금속저장체에 대한 핵임계 분석을 수행한 후, 핵임계 안전성을 확보할 수 있는 조건을 제시하였다. 본 연구에서는 사용한 검증계산용 실험자료가 이상적인 실험자료의 모집단에서 무작위로 추출된 표본이라는 가정하에서 검증계산을 수행하였다. 따라서 이를 입증할 수 있는 방법이 모색되어야 할 것이며, 좀더 적합한 검증계산용 실험자료를 입수하여 보다 정확한 검증계산이 되도록 해야 할 것이다. 또한 검증계산용 실험자료의 모집단과 금속저장체의 차이를 고려할 수 있는 외삽방법등을 활용해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 한국원자력연구소, "사용후핵연료 저장.수송 기술개발-사용후핵연료 저장기술 개발," KAERI-NEMAC/RR-166/96(1996).
2. M.N. Baldwin et al., "Critical Experiments Supporting Close Proximity Water Storage of Power Reactor Fuel," BAW-1487-7(1979).
3. OECD.NEA, "International handbook of evaluated criticality safety benchmark experiments Benchmark Problem," NEA/NSC/DOC(95)03.
4. Robert E. Odeh and D. B. Owen, "Tables for Normal Tolerance Limits, Sampling Plans, and Screening," Marcell Dekker(1980).
5. Ronald E. Walpole and Raymond H. Myers, "Probability and Statistics for Engineerings and

표 2. PWR 사용후핵연료 조성핵종의 핵종량에 대한 ORIGEN2 계산값의 안전인자 결정자료

Nuclide	Data #	(C-E)/E*		95/95 Confidence	Safety Factor(f)***
		Average(X)	Std.dev.(σ)	(X±k**σ)	
²³² U	9	-0.112	0.246	-0.112±0.868	0.57
²³⁴ U	9	0.097	0.057	0.097±0.201	0.77
²³⁵ U	25	-0.007	0.035	-0.007±0.091	1.11
²³⁶ U	25	0.003	0.029	0.003±0.076	0.93
²³⁸ U	19	-0.003	0.005	-0.003±0.015	0.99
²³⁷ Np	15	0.094	0.091	0.094±0.268	0.73
²³⁸ Pu	3	-0.181	0.522	-0.181±5.180	0.00
²³⁹ Pu	25	-0.072	0.086	-0.072±0.225	0.87
²³⁹ Pu	25	-0.008	0.057	-0.008±0.150	1.19
²⁴⁰ Pu	25	0.009	0.035	0.009±0.091	0.91
²⁴¹ Pu	25	-0.014	0.072	-0.014±0.191	1.26
²⁴² Pu	21	-0.127	0.057	-0.127±0.156	0.97
²⁴¹ Am	15	-0.091	0.077	-0.091±0.228	0.88
²⁴³ Am	9	-0.252	0.161	-0.252±0.569	0.76
²⁴² Am	14	0.145	0.671	0.145±2.022	0.00
²⁴³ Am	3	0.260	0.091	0.260±2.906	2.82
²⁴⁴ Am	15	-0.292	0.143	-0.292±0.424	0.88
^{243A} Cm ¹⁾	6	-0.056	0.046	-0.056±0.202	0.87
⁷⁹ Se	6	5.567	0.348	5.567±1.536	0.12
⁹⁰ Sr	6	0.014	0.027	0.014±0.119	0.88
⁹⁹ Tc	10	0.045	0.044	0.045±0.148	0.84
¹⁰⁶ Ru	9	-0.063	0.084	-0.063±0.298	0.81
¹²⁶ Sb	3	3.303	0.094	3.303±0.931	0.19
¹²⁵ Sb	9	1.064	0.161	1.064±0.567	0.38
¹²⁹ I	3	-0.098	0.037	-0.098±0.371	0.79
¹³³ Cs	3	-0.004	0.003	-0.004±0.032	0.97
¹³⁴ Cs	12	0.002	0.141	0.002±0.445	0.69
¹³⁵ Cs	6	-0.229	0.090	-0.229±0.397	0.86
¹³⁷ Cs	19	-0.018	0.032	-0.018±0.089	0.93
¹⁴⁴ Ce	9	-0.083	0.088	-0.083±0.310	0.81
¹⁴⁴ Nd	12	0.024	0.022	0.024±0.068	0.92
¹⁴⁵ Nd	13	0.021	0.021	0.021±0.065	0.92
¹⁴⁶ Nd	11	0.028	0.013	0.028±0.044	0.93
¹⁴⁶ Nd	12	0.033	0.009	0.033±0.029	0.94
¹⁵⁰ Nd	12	0.039	0.009	0.039±0.030	0.94
^{147A} Pm ²⁾	3	-0.275	0.046	-0.275±0.454	0.85
¹⁴⁸ Sm	3	0.022	0.052	0.022±0.513	0.65
¹⁴⁹ Sm	3	0.002	0.132	0.002±1.312	0.00
¹⁵⁰ Sm	3	0.096	0.046	0.096±0.460	0.64
¹⁵² Sm	3	0.204	0.038	0.204±0.372	0.63
^{151A} Sm ³⁾	3	0.332	0.124	0.332±1.233	0.39
^{154A} Sm ⁴⁾	3	0.350	0.070	0.350±0.695	0.49
^{155A} Eu ⁵⁾	3	1.094	0.139	1.094±1.374	0.29

* (Calculated Amount - Experimental Amount) / Calculated Amount.

** Tolerance Limit at 95% Probability with 95% Confidence[4].

***f is obtained from taking the upper bound of $X \pm k^* \sigma$ for fissile material and the lower bound for neutron poison material(non-fissile material).

1) ²⁴³Cm+²⁴⁴Cm, 2) ¹⁴⁷Pm+¹⁴⁷Sm, 3) ¹⁵¹Sm+¹⁵¹Eu, 4) ¹⁵⁴Sm+¹⁵⁴Eu+¹⁵⁴Gd, 5) ¹⁵⁵Eu+¹⁵⁵Gd.

Scientists," Prentice-Hall, Inc(1993).

6. ANS, "Design Requirements for Light Water Reactor Spent Fuel Storage Facilities at Nuclear Power Plants," ANSI/ANS-57.2-1983.
7. ANS, "Criticality Safety Criteria for the Handling, Storage, and Transportation of LWR Fuel Outside Reactors," ANSI/ANS-8.17-1984.

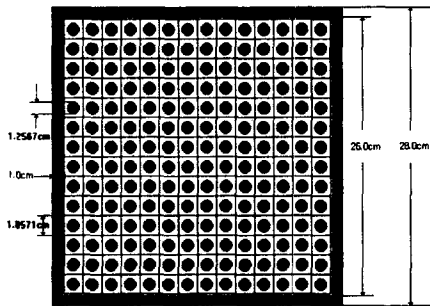


그림 1. 금속저장체의 MCNP 계산모델.

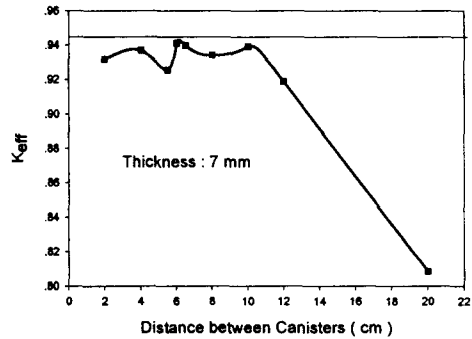


그림 2. 캐니스터 두께가 7 mm일 때 간격의 변화에 따른 최종핵임계도값의 변화.

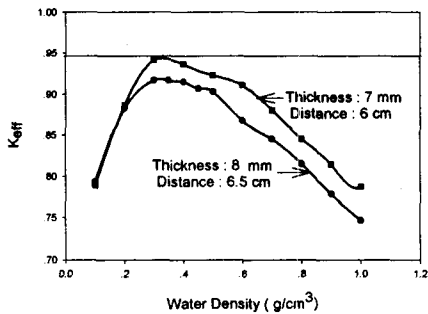


그림 3. 캐니스터의 두께가 7 mm, 8 mm인 경우에 수분농도 변화에 따른 최종 핵임계도값의 변화.

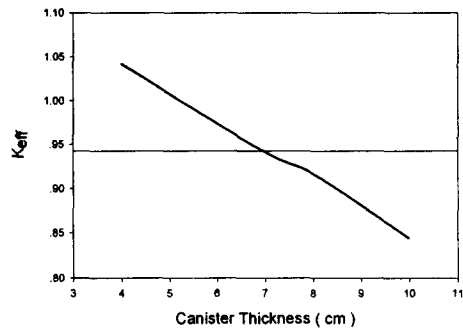


그림 4. 캐니스터의 두께변화에 따른 최종 핵임계도값의 변화.