

Application of the HELIOS-MASTER Code System on the Criticality Analysis for the SMART-P Spent Fuel Storage

Ha-Yong Kim · Bon-Seung Koo · Kyo-Youn Kim ·
Chung-Chan Lee and Sung-Quun Zee
Korea Atomic Energy Research Institute

SMART연구로 사용후 연료 저장조의 임계해석에 HELIOS-MASTER계산체계의 적용

김하용 · 구본승 · 김교훈 · 이정찬 · 지성균
한국원자력연구소, 대전 유성구 덕진동 150, 305-600

(2004년 12월 2일 접수, 2005년 5월 9일 채택)

Abstract - The criticality analysis method using HELIOS-MASTER code system, which is the nuclear core analysis code system, was developed for the spent fuel storage of SMART-P reactor. We generated the macroscopic cross section of the geometric model with HELIOS and estimated the criticality of the 3-dimensional model with MASTER for SMART-P spent fuel storage. The validity of criticality analysis method for SMART-P spent fuel storage with the HELIOS-MASTER code system by 3-D MCNP calculation was also verified. The result of the criticality analysis with the HELIOS-MASTER code system is more conservative than that with the MCNP and the accuracy of this result is within the range of an allowable error. Because HELIOS-MASTER can perform the 3-D depletion calculation for a spent fuel storage, it will be useful to perform the criticality analysis including a burnup credit in future.

Key words : Spent Fuel Storage, Criticality, SMART-P, HELIOS, MASTER, MCNP

요약 - 노심설계 해석체계로 사용하는 HELIOS-MASTER코드를 이용하여 SMART연구로 사용후 핵연료 저장조에 대한 임계도 해석체계를 개발하였다. 저장조의 기하학적 모형에 대한 거시 단면적을 HELIOS코드를 이용하여 생산하고, 저장조의 3차원 모델에 대한 임계도를 MASTER코드로 평가하였다. 또한 3차원 MCNP계산을 통하여 HELIOS-MASTER체계를 이용한 임계도 평가의 타당성을 검증하였다. HELIOS-MASTER코드 체계를 이용한 임계도 해석결과가 약간 보수적인 방향으로 허용오차 범위 내에서 정확도를 유지하였다. HELIOS-MASTER 코드 체계는 3차원 연소계산이 가능하기 때문에 차후에 연소이력을 고려한 사용후 연료 저장조에 대한 임계해석에 유용할 것이다.

중심어 : 사용 후 핵연료 저장조, 임계도, SMART연구로, HELIOS, MASTER, MCNP

서 론

신 연료 및 사용 후 핵연료 저장조의 관리의 원자로 운영에 있어서 필수적이다. 현재 우리나라의 경우 원자력 발전소에서 발생하는 핵연료는

전량 발전소내의 저장조에 저장 관리되고 있다. 따라서 새로이 원자로를 개발하는 개념설계단계에서부터 저장조의 규격에 대한 연구가 필요하다. 현재 개발중인 SMART 연구로의 사용 후 핵연료 저장조는 개념설계 단계에 있으므로 저장조

임계도 해석을 통해 최소한의 저장조 규격 및 구조를 정하는 기본자료를 생산한다. 핵연료 저장조 해석 시 고려해야 할 핵연료 안전에 관한 규정은 과학기술부령 제 31호 제33조^[1] 및 NRC Reg. 10CFR50.68^[2]에 기술되어 있다.

본 연구에서는 현재 개념설계중인 SMART 연구로의 사용 후 핵연료 저장조에 대한 임계도 해석방법을 현재 한국원자력연구소에서 개발하여 사용하는 노심 해석 코드 체계인 HELIOS-MASTER 코드 체계^[3,4]를 적용하였으며 이를 3차원 MCNP^[5] 계산을 통하여 검증하였다.

HELIOS^[6] 코드는 Scandpower A/S에서 개발한 2차원 수송이론에 의한 균정수 생산 코드이며 다양한 기하학적 모델에 대한 연소계산 및 균정수를 생산할 수 있다. 이때 균정수 라이브러리는 ENDF/B-VI에서 축약된 190군 중성자 단면적과 48군 감마 단면적을 사용한다. MASTER^[7,8] 코드는 한국원자력연구소에서 개발한 2군 확산이론에 근거를 둔 3차원 핵설계 코드이며 균정수로는 CASMO-3^[9] 또는 HELIOS로 생산된 거시 단면적이나 미시 단면적을 사용한다. MASTER코드는 정방형 및 육방형 격자 배열의 노심에 대하여 열수력 궤환효과를 고려한 노심 분석이나 연소계산을 빠르게 수행할 수 있다. 핵연료 저장조 임계도 해석방법에 있어서 본 연구에서 개발된 HELIOS-MASTER해석체계를 Fig. 1에 나타내었다.

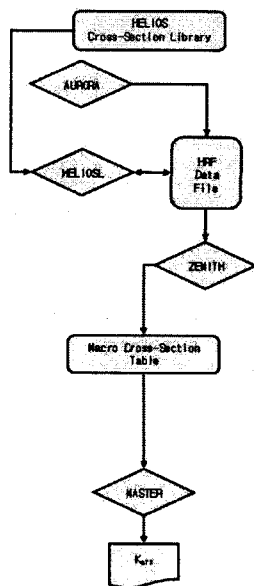


Fig. 1. Flowchart of the criticality analysis code systems for spent fuel storage.

사용 후 핵연료 저장조 구조

현재 개발중인 SMART 연구로는 기존의 상용로와는 달리 핵연료집합체의 구조가 원형이고 장전된 핵연료집합체는 한 주기 연소 후 전량 신연료로 교체된다. 따라서 사용 후 핵연료 저장조

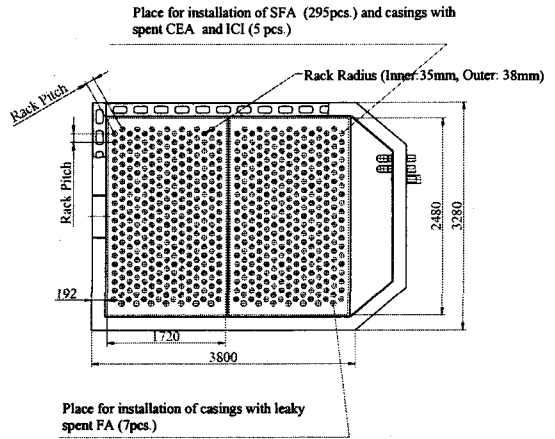


Fig. 2. The plane view of SMART-P spent fuel storage pool.

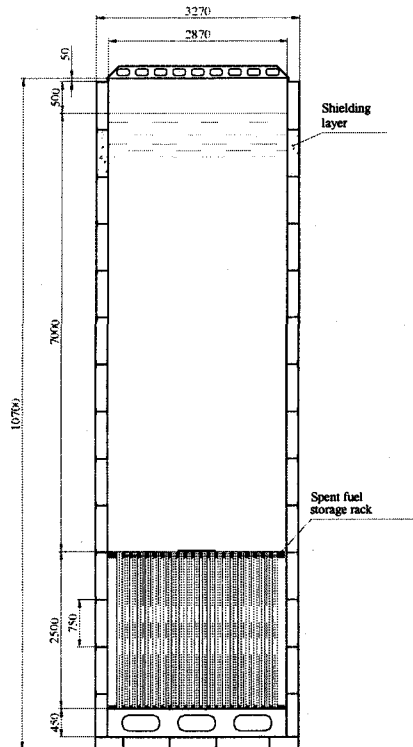


Fig. 3. The side view of SMART-P spent fuel storage pool.

설계 시 정방형 배열이 아닌 육방형 배열이 고려되고 있으며, 한 주기에 사용된 핵연료집합체 전량을 저장할 수 있는 단위 저장조를 여러 개 갖는 형태가 고려되고 있다. 현재까지 개념설계 단계에서 진행된 저장조의 구조 및 제원은 Fig. 2 및 3과 같다. 그림에서 보면 사용 후 핵연료집합체는 7m 높이의 물 하부에 위치하고 있는 사용 후 핵연료 Rack안에 저장되어있으며, 이때 사용된 Rack의 재질은 Stainless Steel 304이다.

HELIOS-MASTER 체계에 의한 임계도 평가

핵연료집합체 선택

SMART연구로에는 3가지 종류의 핵연료집합체가 장전되어 있으며, 집합체에 사용된 가연성 독봉의 크기 및 개수에 따라 구분된다.

먼저 보수성이 충분히 고려된 사용 후 핵연료 저장조에 대한 임계도 해석을 위하여 SMART연구로에 장전되어 있는 핵연료집합체중 무한증배계수가 가장 높은 핵연료집합체만이 장전되어 있다고 가정하여 저장조에 대한 임계도 해석을 하여야 한다. 따라서 이 조건을 만족하는 핵연료 집합체를 선택하기 위하여 연소에 따른 핵연료 집합체 별 무한증배계수를 2차원 수송계산 코드인 HELIOS코드를 사용하여 계산하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보면 C형태의 핵연료집합체가 연소주기 동안 무한증배계수가 가장 큰 것을 알 수 있다. 따라서 사용 후 핵연료 저장조에는 C형태의 핵연료집합체만이 저장되어 있는 것으로 가정하고 임계도 해석을 수행하였다. 또한 사용 후 핵연료 저장조 임계도 해석 시 원자로 수명 동안의 모든 경우를 고려하기 위해 저장되어 있는 핵연료집합체는 보수적으로 모두 신연료라고 가정하며 핵연료 봉내의 ²³⁵U의 농축도는 우리나라의 연구로에 사용을 허용하고 있는 최대 농축도인 20w/o로 가연성 독봉은 선원봉으로 대체하였다.

균정수 생산

사용 후 핵연료 저장조 임계도 해석을 위한 노심 연소계산 코드인 MASTER에서 사용하는 균정수는 크게 2가지가 사용된다^[10]. 핵연료집합체 내의 계산을 수행하는 핵연료집합체에 대한 거시

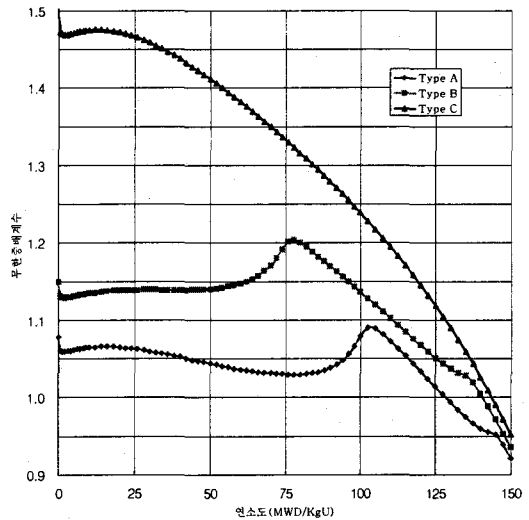


Fig. 4. SMART-P fuel assembly k_{∞} versus burnup.

단면적 및 저장조 외부구조에서 오는 영향을 평가하는 반사체에 대한 거시단면적이 필요하다. 또한 MASTER를 이용한 임계 계산시 필요한 거시단면적의 종류는 D , Σ_a , Σ_f , Σ_{rem} , $\nu\Sigma_f$, $k\Sigma_f$ 이다.

핵연료 균정수 생산

Rack을 포함한 핵연료집합체의 균정수를 생산하기 위하여 HELIOS를 사용하여 핵연료집합체를 모델링하고 무한배열조건으로 계산을 수행하여 거시단면적을 추출하여야 한다. 그리고 모델에 사용된 모든 경계 면에서의 경계조건은 반사경계 (Specular Reflection) 조건을 사용하였고, 압력조건은 대기압이고, 온도 조건은 상온(20°C)을 사용하였다. 또한 Rack간격에 따른 민감도 분석을 위해 Rack간격만을 변화시킨 모델을 사용하여 각각의 거시단면적을 생산하였다. 이때의 Rack간격은 모델링의 용이성에 따라 임의로 정하였다. Fig. 5는 HELIOS에서 1/6대칭으로 모델링 된 핵연료 집합체 구조를 나타내었다. HELIOS계산 결과로부터 MASTER계산에 필요한 거시단면적은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

반사체 균정수 생산

MASTER계산에 사용되는 반사체 균정수에는 반경방향의 구조물 및 상하부 구조물에 대한 거시단면적 2종류가 필요하다. 반사체 균정수는 복잡한 구조물을 단순화 된 1차원 반사체 계산용

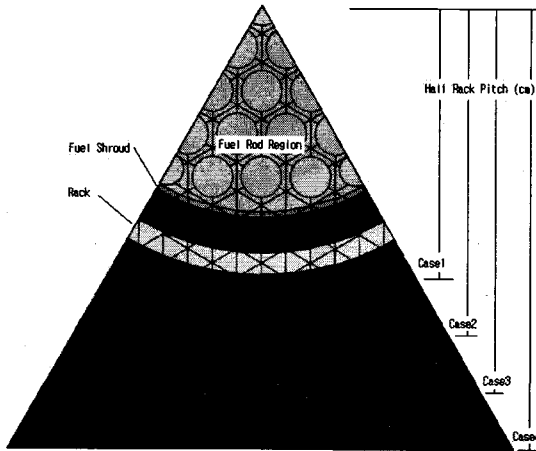


Fig. 5. HELIOS model for SMART-P fuel rack (1/6 Symmetry).

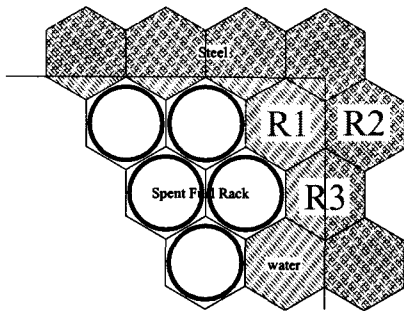


Fig. 6. Cross-sectional view of spent fuel storage pool adjacent to fuel rack.

HELIOS모델로부터 MASTER 코드용 반사체 균정수를 생산한다.

먼저 반경방향 1차원 반사체 계산용 HELIOS 모델은 핵연료집합체 중앙열과 반사체 부분의 각 구조물의 두께를 계산하여 차례대로 배치한다. 이 모델을 사용하여 반사체 부분에 대한 균질화된 거시단면적을 HELIOS코드로 생산한다. Fig. 2에서 핵연료 집합체와 인접한 부분을 확대해보면 Fig. 6과 같다. 반사체 영역 중에서 핵연료집합체 영역의 유효중배계수에 가장 영향을 미치는 요인은 핵연료집합체의 중성자 평균 자유 행적 범위 내에 인접하는 반사체 구성물질이다. 따라서 그림에서 보면 핵연료집합체와 인접한 부분에 대한 반사체의 종류가 크게 3종류가 되는 것을 알 수 있다. 즉 물, 물+Steel, 그리고 Steel로만 구성되어 있는 반사체로 나눌 수 있다.

위와 같은 3종류의 반사체에 대한 1차원 HELIOS 모델을 Rack 간격을 변화시켜 HELIOS

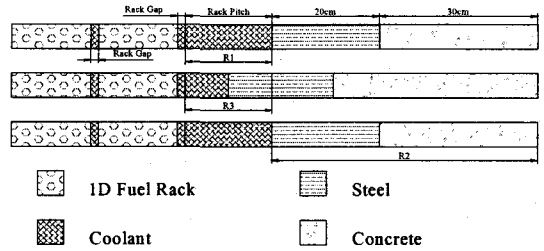


Fig. 7. 1-Dimension HELIOS model for generating radial reflector macroscopic cross section.

를 이용하여 각각의 거시단면적을 생산하였다. 반경방향 1차원 반사체 모델에 대한 개략도를 Fig. 7에 나타내었다. 이때의 반사체 경계조건은 반사경계조건을 사용하였다. 실제 MASTER코드에 사용될 등가 핵단면적은 아래와 같이 정의되는 균질 중성자 핵단면적과 핵연료집합체/반사체 경계면에서의 중성자속 불연속인자를 적용하여 계산된다^[11].

$$\tilde{\Sigma}_{xg}^{hom} = \frac{\int \Sigma_{xg}(r) \phi_g(r) dv}{\int \phi_g(r) dv}$$

$$f_g = \frac{\phi_{g,s}^{het}}{\phi_{g,s}^{hom}}$$

여기서, $\tilde{\Sigma}_{xg}^{hom}$ 는 에너지군 g , 핵반응 x 의 균질화된 반사체 핵단면적을 나타내며, ϕ_{gs}^{het} , ϕ_{gs}^{hom} 는 비균질 계산과 균질계산 결과로 나오는 핵연료집합체/반사체 경계 면에서의 중성자 속을, f_g 는 중성자속 불연속 인자를 나타낸다. 위의 식으로부터 실제 MASTER계산에 사용될 등가 반사체 핵단면적은 아래와 같이 계산된다.

$$\bar{\Sigma}_{xg}^{hom} = \tilde{\Sigma}_{xg}^{hom} / f_g$$

HELIOS계산결과로부터 중성자 불연속 인자가 적용된 반경방향 반사체 거시단면적을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

상, 하부 구조물에 대한 축방향 반사체 균정수 생산 방법은 반경방향 반사체 균정수 생산방법과 유사하다. 다만 축방향으로는 중성자속 분포가 cosine 모양을 나타내므로 특별히 경계 면에서의 중성자속 불연속 인자를 적용하지 않는다. 축방향 균정수 생산을 위한 1차원 HELIOS 모델은 Fig. 8에 나타내었다. 또한 HELIOS계산 결과로부터 나온 Rack 간격을 따른 각각의 거시 단면적은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1. Macroscopic cross section for SMART-P spent fuel storage.

Case	X-sec	Fuel Assembly Rack	Axial Reflector		Radial Reflector		
			Top	Bottom	1	2	3
1	Σ_{a1}	3.88405E-03	6.66023E-03	2.09833E-02	5.81549E-04	9.27976E-03	4.25907E-03
	Σ_{a2}	4.98612E-02	1.36779E-01	4.89930E+00	4.68980E-02	1.78879E-01	4.32978E-02
	Σ_{tr1}	3.66639E-01	7.26653E-01	5.95710E-01	2.68634E-01	3.69959E-01	3.04503E-01
	Σ_{tr2}	1.58407E+00	6.26938E-01	4.48483E+00	7.37295E-01	3.25219E-01	2.12773E+00
	Σ_{r1}	2.26507E-02	4.00668E-03	9.47666E-04	6.24234E-02	4.00433E-03	4.49840E-02
	Σ_{f1}	2.34195E-03					
	Σ_{f2}	5.85118E-02					
	$\nu\Sigma_{f1}$	5.77952E-03					
	$\nu\Sigma_{f2}$	1.42406E-01					
κ	3.24745E-11						
2	Σ_{a1}	2.84603E-03	5.63406E-03	2.17315E-02	6.28555E-04	9.60237E-03	4.39756E-03
	Σ_{a2}	3.90247E-02	1.37781E-01	1.81500E+01	5.14639E-02	1.95863E-01	5.08982E-02
	Σ_{tr1}	3.65752E-01	5.87659E-01	7.54995E-01	2.61007E-01	3.71208E-01	2.91001E-01
	Σ_{tr2}	2.05521E+00	1.08278E+00	1.87675E+01	6.99440E-01	3.57768E-01	1.71840E+00
	Σ_{r1}	3.08544E-02	1.96657E-02	7.95703E-05	6.60653E-02	4.09141E-03	4.99335E-02
	Σ_{f1}	1.66516E-03					
	Σ_{f2}	2.93970E-02					
	$\nu\Sigma_{f1}$	4.12190E-03					
	$\nu\Sigma_{f2}$	7.15465E-02					
κ	3.24890E-11						
3	Σ_{a1}	2.26681E-03	4.37096E-03	2.04512E-02	6.67464E-04	9.92636E-03	4.46956E-03
	Σ_{a2}	3.11435E-02	1.18903E-01	2.60511E+01	5.44490E-02	2.10052E-01	5.47039E-02
	Σ_{tr1}	3.65244E-01	5.29633E-01	7.45149E-01	2.53307E-01	3.70819E-01	2.78604E-01
	Σ_{tr2}	2.29055E+00	1.42674E+00	2.65308E+01	6.82741E-01	3.84396E-01	1.53483E+00
	Σ_{r1}	3.56084E-02	2.91006E-02	2.80633E-05	6.89186E-02	4.17352E-03	5.41078E-02
	Σ_{f1}	1.28650E-03					
	Σ_{f2}	1.64397E-02					
	$\nu\Sigma_{f1}$	3.19523E-03					
	$\nu\Sigma_{f2}$	4.00109E-02					
κ	3.25047E-11						
4	Σ_{a1}	1.93612E-03	3.48777E-03	1.94298E-02	7.00432E-04	1.02695E-02	4.49597E-03
	Σ_{a2}	2.68595E-02	1.01011E-01	3.09003E+01	5.62810E-02	2.22937E-01	5.70285E-02
	Σ_{tr1}	3.64296E-01	4.95537E-01	7.36831E-01	2.46009E-01	3.68990E-01	2.67578E-01
	Σ_{tr2}	2.40642E+00	1.67564E+00	3.12908E+01	6.78442E-01	4.08153E-01	1.42399E+00
	Σ_{r1}	3.84360E-02	3.50058E-02	1.45038E-05	7.10763E-02	4.25491E-03	5.75559E-02
	Σ_{f1}	1.06589E-03					
	Σ_{f2}	1.03472E-02					
	$\nu\Sigma_{f1}$	2.65692E-03					
	$\nu\Sigma_{f2}$	2.51830E-02					
κ	3.25216E-11						

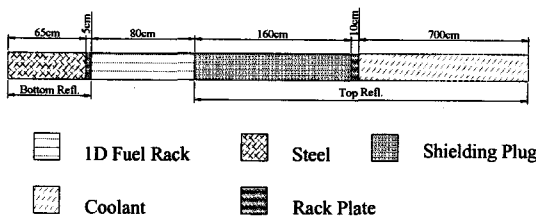


Fig. 8. 1-Dimension HELIOS model for generating axial reflector macroscopic cross section.

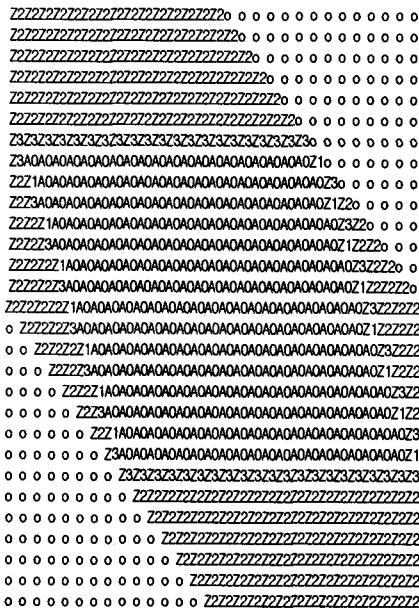


Fig. 9. MASTER model for SMART-P spent fuel storage.

MASTER 임계도 계산

생산된 거시단면적을 사용하여 3차원 사용 후 핵연료 저장조의 전체모델에 대한 임계도 계산을 Rack 간격에 따라 MASTER를 이용하여 각각 수행하였다. 이때의 냉각재 온도는 20℃이고 기압은 대기압이고 모든 열수력 제한은 OFF이다. 또한 민감도 분석을 위해 각각의 경우에 사용된 Rack 간격은 HELIOS 계산에 사용되었던 7.679cm, 9.295cm, 10.912cm, 12.529cm를 사용하였다. Fig. 9는 MASTER에 사용된 SMART연구로의 사용후 핵연료 저장조 모델이다.

MCNP 검증계산

개발된 HELIOS-MASTER체계를 이용한 임계도 계산의 타당성을 확인하기 위하여 SMART연

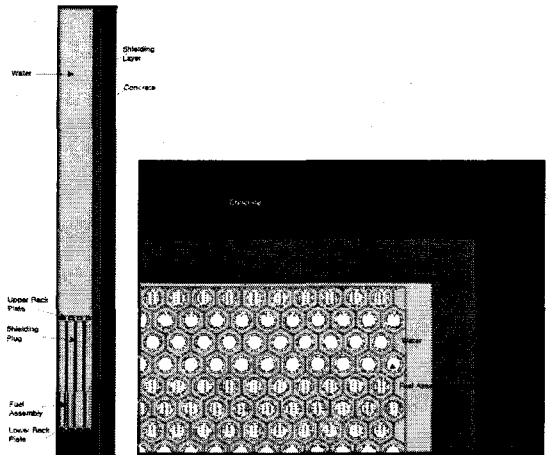


Fig. 10. MCNP model for SMART-P spent fuel storage.

구로의 사용 후 핵연료 저장조에 대하여 3차원 1/4대칭으로 MCNP 모델링을 하여 임계도 계산을 수행하였다. 이때 사용된 경계조건은 반경방향에서는 상, 우측에는 Void조건을, 하, 좌측에는 반사조건을 사용하였으며, 축방향으로는 위, 아래 모두 Void조건을 사용하였으며 계산 온도는 20℃이다. 그리고 MCNP 계산에 이용된 핵 단면적 자료는 ENDF/B-VI로부터 온도조건 별로 유도된 핵 단면적 자료^[12]이다. MCNP계산 시 입자 이력수는 1,500,000으로 하여 결과의 불확실도가 0.5% 정도로 충분히 낮도록 하였다. 또한 Rack 간격 민감도 분석을 위하여 Rack간격을 변화시켜 가며 임계도 해석을 수행 하였다. 또한 계산 수행 속도를 빠르게 하기 위해 PC기반 LINUX클러스터에서 15대를 사용하여 병렬계산을 수행하였다. Fig. 10은 MCNP로 모델링된 사용 후 핵연료 저장조 구조이다.

결과 및 결론

HELIOS-MASTER코드 체계를 이용하여 SMART연구로 사용 후 핵연료 저장조에 대한 임계도해석 및 Rack 간격에 따른 민감도를 분석하였다. 또한 개발된 해석체계의 결과를 3차원으로 모델링된 입력을 사용하여 MCNP계산을 통하여 이를 비교하였다. Rack 간격에 따른 HELIOS-MASTER 체계의 계산결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에 의하면 HELIOS-MASTER코드 체계를 이용한 값이 MCNP계산 결과에 비해 보수적인 방향으로 노심 핵설계 계산 시 적용하는 유효

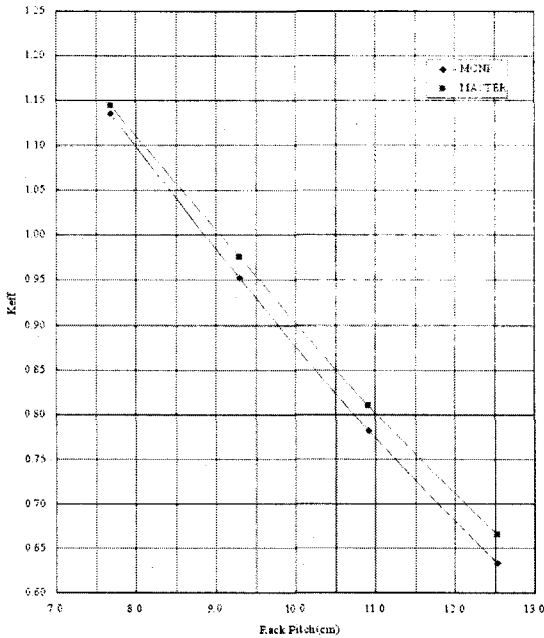


Fig. 11. Effective multiplication factor versus rack pitch for SMART-P spent fuel storage.

증배계수의 허용오차 범위 내에서 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 그림에서 보면 Rack 간격이 클수록, 즉 유효증배계수가 낮을수록 그 차이가 조금 커져가는 현상을 보인다. 이것은 낮은 유효증배계수 조건에서는 MASTER에서 중성자의 해를 수치해석적으로 접근하면서 반복적인 방법(iteration method)의 수렴조건이 어려워져서 균질화된 계산노드를 크게 설정하였기 때문이다. 하지만 유효증배계수가 낮은 부분은 중요치 않고 임계도 해석에 필요한 범위인 0.95 근처에서는 상대 오차가 2%이내로 비교적 정확함을 알 수 있다.

Fig. 11에 의하면 유효증배계수 제한치인 0.95를 만족하는 Rack 간격은 HELIOS-MASTER 체계의 결과는 9.5cm, MCNP계산 결과는 9.3cm로 나타났다. 이 값들은 Cubic-Spline Fitting을 통하여 추정하였다. 이를 바탕으로 전체 저장조에 대한 규격 및 저장조 부지를 확보하는데 있어서 최소한의 규격을 제시할 수 있다.

결론적으로 SMART연구로의 사용후 핵연료 저장조의 임계도 해석에 HELIOS-MASTER 코드 체계를 적용하여 평가하였다. 이 체계에 사용된 HELIOS 및 MASTER코드는 연소계산이 가능한 코드이므로 차후에 연소이력 및 축방향 출력분포에 따른 이력을 보다 쉽게 고려한 임계계산을 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 수행하고 있는 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. 원자로시설등의 기술기준에 관한 규칙, 과학기술부령 제 31호, 과학기술부,(2001)
2. Sec. 50. 68. Criticality accident requirements, 10CFR50. US NRC(1998)
3. 김하용, "Verification of HELIOS-MASTER System Through Benchmark of Critical Experiments," KAERI/TR-1272/ 99, 한국원자력연구소(1999)
4. 송재승, HELIOS/MASTER 핵설계체계의 검증 및 불확실도 분석, KAERI/TR-1310/ 99, 한국원자력연구소(1999)
5. RSICC Computer Code Collection-MCNP4C2, CCC-701, ORNL(2001)
6. Teodosi Simeonov and Lars Moberg, Release notes-HELIOS System version 1.8, SSP-03/221, Studsvik Scandpower(2003)
7. 조진영, MASTER 3.0 USER'S MANUAL, KAERI/UM-8/2004, 한국원자력연구소(2004)
8. 조병오, MASTER-3.0: Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors, KAERI/TR-2061/2002, 한국원자력연구소(2002)
9. M. Edenius, "CASMO-3 : A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4," STUDSVIK/NFA-89/2 Rev. 1(1991)
10. 이창호, Nuclear Design Manual for Generation of Cross Section and Heterogeneous Formfunction for CASMO-3/MASTER, pp.10-15, KAERI/TR-782/96, 한국원자력연구소(1996)
11. 송재승, SMART 노심해석을 위한 반경방향 반사체 균정수 생산, pp.8-13, KAERI/TR-1508/2000, 한국원자력연구소(2000)
12. 핵자료 체제 구축 기반 연구-MCNP CD-III & CD-IV, 핵자료평가랩, 한국원자력연구소(2002)