중성자흡수체 보론카바이드 균질/비균질 임계모델링에 대한 고찰

김윤식[1*], 박제호[1], 황원찬[2]
[1]㈜코네스코퍼레이션, 서울특별시 서초구 명달로 65 일흥빌딩 5F
[2]한전원자력연료㈜, 대전광역시 유성구 대덕대로989길 242
*yunsik@kones21.com

1. 서론

한전원자력연료의 신연료운반용기는 생산된 신연료를 원전으로 운반하는 데 이용되고 있으며, 중성자흡수체로서 METAMIC 판이 설치되어 있다[1].

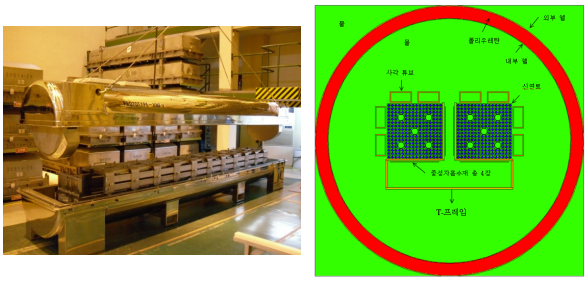

Fig. 1. PWR Fresh Fuel Cask.

2. 본론

2.1 METAMIC 판

METAMIC 판은 보론카바이드 분말과 6061 알루미늄 합금 분말을 균일하게 혼합하여 상온 압축, 진공 소결, 고온 압축, 압출, 압연, 절단 및 표면처리 공정을 거쳐서 생산된 완전금속 복합재료(Full Metal Matrix Composite)이다. 중성자흡수체에 포함된 B-10의 최소면밀도는 0.022g B-10/㎠ (SAR 부록 1-1)로 제시되어 있으며, 반응도 계산을 위한 중성자흡수체의 기준 설계입력 자료는 Table 1과 같다[1].

Table 1. Design Data of METAMIC

Items	Design Data
B_4C-Al 내 B-10 농도	0.020 g B-10/㎠
B_4C-Al 두께, 너비, 길이	0.2㎝, 18㎝, 3810㎝
B_4C 밀도	2.51 g/㎤
Al 밀도	2.713 g/㎤
B_4C 부피비	27.61 %
B_4C-Al 구성원소	B_4C-Al 원자밀도(atoms/b-㎝)
B-10	6.0142E-3
B-11	2.4208E-2
C	7.5556E-3
Al	4.3831E-2

2.2 평가 코드

SAR에서 사용한 코드는 MCNP4B이나, 본 해석에서는 최신 버전인 MCNP6를 선택하여 임계해석을 수행하였다. 또한, 원래 설계에서 사용한 파라미터, 즉 세대당 중성자 수 10000, 평균 산출시 제외하는 세대수 50, 고려하는 세대수 550을 변경하여 본 계산에서는 세대당 중성자 수 20000, 평균 산출시 제외하는 세대수 50, 고려하는 세대수 1000을 적용하였다[2].

2.3 균질 모델

SAR에서는 중성자흡수체가 알루미늄과 보론카바이드가 이상적으로 균질하게 섞여 있다는 가정, 즉 균질모델(Homogeneous Model)을 사용하여 계산을 수행하였다. 계산결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Criticality Result of Homogeneous Model

경우	해석결과	비고
MCNP4B	0.85698±0.00036	SAR 표 6-8
MCNP6	0.85686±0.00017	

2.4 비균질 모델

비균질(Non-homogeneous) 모델링은 중성자흡수체의 보론카바이드의 체적분율이 27.61%이므로 입자크기는 쉽게 구할 수 있다. 만약 두께 2 ㎜에 2개의 입자를 넣는다면 하나의 중성자흡수체 판에는 총 2x180x3810=1,371,600 개의 입자가 일렬로 모델링되며, 입자의 크기는 807.897 ㎛(반경 약 0.4 ㎜)를 지니게 된다. 상기 모델을 계속해서 입자의 크기를 절반으로 줄어 나가면, 총 입자 수는 8의 배수로 증가하게 된다. 평가에 적용한 입자크기는 Table 3과 같다.

Table 3. B4C Particle Size for Evaluation

입자크기 [㎛]	입자 수 두께*폭*길이	총 입자수	입자 실제크기 [㎛]
800	2*180*3810	1,371,600	807.897
400	4*360*7,620	10,972,800	403.948
200	8*720*15,240	87,782,400	201.974
100	16*1,440*30,480	702,259,200	100.987
50	32*2,880*60,960	5,618,073,600	50.494
25	64*5,760*121,920	44,944,588,800	25.247
12	128*11,520*243,840	359,556,710,400	12.623
6	256*23,040*487,680	2,876,453,683,200	6.312
9	178*16020*339090	966,935,480,400	9.077
20	80*7200*152400	87,782,400,000	20.197
32	50*4500*95250	21,431,250,000	32.316
40	40*3600*76200	109,72,800,000	40.395

중성자흡수체 판을 2 ㎜ 정육면체로 잘라 보았을 때, 각각 800 ㎛ 및 400 ㎛ 크기에 대하여 보론카바이드 입자배치 상태를 도시하였으며 Fig. 2와 같다.

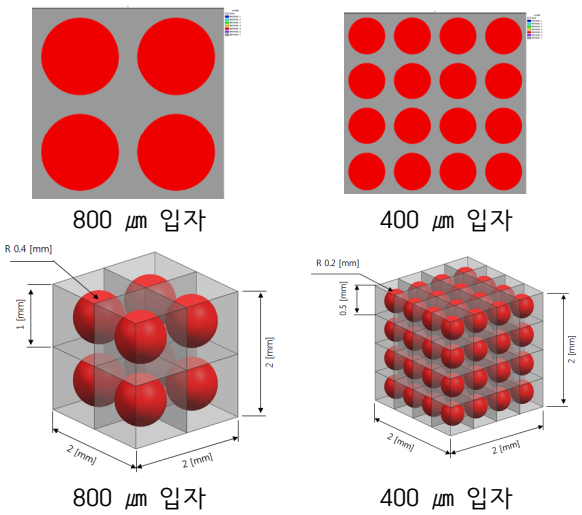

Fig. 2. B4C Particle of 800 ㎛ and 400 ㎛.

2.5 평가 결과

상기 입자 배치에 대한 MCNP6를 이용한 계산 결과는 아래의 Table 4 및 Fig. 3과 같다.

Table 4. Criticality Result of Non-Homogeneous Model

입자크기 [㎛]	k_{eff}	σ	$\Delta k_{eff} = k_{inhom} - k_{hom}$	$\Delta k_{eff}/k_{eff,hom}$
1.578	0.85716	0.00018	3.00000E-04	3.5014414E-04
3.156	0.85940	0.00018	8.00000E-04	9.3371771E-04
6.31	0.85697	0.00019	1.10000E-04	1.2838619E-04
9.077	0.85679	0.00018	-7.00000E-05	-8.170030E-05
12.62	0.85710	0.00019	2.40000E-04	2.8011531E-04
20.197	0.85691	0.00018	5.00000E-05	5.8357357E-05
25.25	0.85711	0.00019	2.50000E-04	2.9178679E-04
32.316	0.85680	0.00018	-6.00000E-05	-7.00288E-05
40.395	0.85681	0.00018	-5.00000E-05	-5.83574E-05
50.49	0.85694	0.00018	8.00000E-05	9.337180E-05
100.987	0.85699	0.00018	1.30000E-04	1.5172913E-04
201.974	0.85736	0.00019	5.00000E-04	5.8357357E-04
403.948	0.85812	0.00018	1.26000E-03	1.4706054E-03
807.897	0.85969	0.00019	2.83000E-03	3.3030264E-03

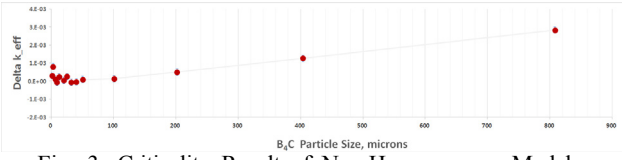

Fig. 3. Criticality Result of Non-Homogeneous Model.

3. 결론

비균질모델에 대한 계산결과를 살펴보면, 대략 50~100 ㎛ 이상의 입자에서는 확연한 경향성을 보이나, 그 이하의 입자크기에서의 계산결과는 다음과 같다

- ○ 균질모델 유효증배계수와의 차이인 Delta k_{eff} 값은 대략 표준편차 범위 정도에 분포한다.
- ○ 비균질모델의 유효증배계수는 무작위적이며, 뚜렷한 경향성을 보이지 않는다.

참고로, HOLTEC에서도 메타믹 중성자흡수체에 내재하는 보론카바이드 크기에 따른 Streaming Effect에 의한 반응도 변화를 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 내리고 있다[3].

- ○ 50미크론 보다 작은 입자크기를 가진 메타믹 판을 사용하는 경우에는 균질화 모델과 거의 차이가 없으며, 비균질 모델과 균질모델은 통계적으로 등가라고 판단할 수 있다.
- ○ 따라서 50미크론 이하의 입자크기를 갖는 메타믹판에서는 Streaming 효과가 나타나지 않는다고 결론지을 수 있다.

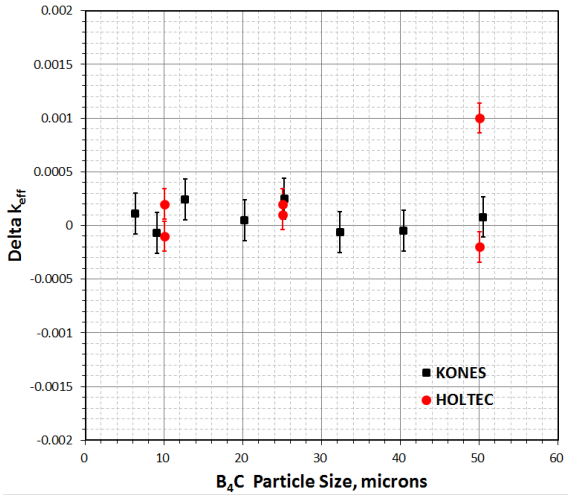

Fig. 4. Effect of B4C Particle Size in Metamic.

상기 Fig. 4에는 HOLTEC의 계산 결과뿐만 아니라 본 평가에서 계산한 결과도 함께 내었으며, 검정색 사각표식으로 나타내었다. Delta k_{eff} 값이 모두 HOLTEC사가 제시하는 범위와 유사한 것을 확인할 수 있다. 이처럼 상호 일치하는 계산 결과를 견주어 볼 때, 보론카바이드 입자크기가 50 ㎛ 이하인 중성자흡수체 경우에는 중성자 Streaming 효과가 발생하지 않는다고 판단할 수 있다.

4. 참고문헌

[1] 경수로 신연료 운반용기 안전성분석보고서, January 2016.

[2] J. T. Goorley,. et al., Initial MCNP6 Release Overview-MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934, Los Alamos National Laboratory, May 2013.

[3] HOLTEC, Sourcebook for METAMIC Performance Assessment [HI-2043215, p16].