

ENDF/B-VII기반 MCNP-4C를 이용한 CANDU-6 기포반응도 불확실성 평가(I)

홍성택, 권태안, 이영준, 오세기, 이상규*, 김만웅*
아주대학교 에너지시스템학부, 한국원자력안전기술원*

Uncertainty Assessment of CANDU Void Reactivity using MCNP-4C with ENDF/B-VII(I)

S. T. Hong, T. A. Kwon, Y. J. Lee, and S. K. Oh,
S. K. Lee* and M. W. Kim*

Energy System Division Ajou University, Suwon,
Safety technology Division

Korea Institute of Nuclear Safety, Daejun*

초 록

기포반응도는 월성발전소를 비롯한 CANDU형 원자로의 주된 안전성 쟁점사안으로 끊임없이 논의되어 왔다. 이는 설계기준사고가 노심에서 열에너지 불균형이 원인이 되어 기준이상의 핵연료 파손과 방사성물질 누출로 발전할 위험이 있는 사건들로 정의될 때, 사건 진행 과정에 기포반응도 증가는 조기에 운전중단을 실패할 경우 출력폭주로 이어지므로 사건의 결말이 중대사고로 전환될 위험이 크기 때문이다.

본 연구는 공개된 최신 핵자료인 ENDF/B-VII.0를 NJOY.99로 처리한 연속에너지 반응단면적 라이브러리를 구축하고 MCNP-4C에 접속하여 37봉 천연우라늄 핵연료다발의 표준노심 격자에 대한 기포반응도를 시뮬레이션하여, 지금까지 각종문헌에 제시된 값들과 비교, 종합하므로 내제된 불확실성을 추정하는 내용이다.

ENDF/B-VII.0 기반 MCNP-4C의 CANDU 노심격자 모델은 동일한 핵자료와 핵종농도를 사용한 WIMS-IAEA 모델과 비교할 때, 초기 노심의 임계도 오차 약 3.51mk가 연소 진행에 따라 7.5×10^{-4} mk/MWD/teU의 비율로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 MCNP-4C 예측 기포반응도는 초기노심에서 기포율 50% 및 100%에 대해 각각 8.38 및 15.96mk, 평형노심에서 7.68 및 14.72mk로 계산된다. 이는 월성 2,3,4 FSAR의 초기노심 및 평형노심에서 100% 기포상태에 대한 값, 약15.0 및 10.6mk와 비교할 때, 초기노심은 약 1.0mk 평형노심은 약4.1mk 보수적이지만, 다른 연구결과들과는 최대오차 $\pm 1 \sim 2$ mk 이내에서 잘 일치하는 것으로 평가되었다.

본 연구는 CANDU 노심의 기포반응도 불확실성 요인의 규명 및 영향평가를 위한 노력의 일부로서 앞으로 감속재의 붕산농도 변화, 감속재 및 냉각재의 중수 순도 변화, 기기노화에 의한 격자 구조 및 물성 변화, 중성자속 및 출력 분포 불균형, 반응도조절장치의 위치, 등 주요 설계변수의 변화에 대한 반응도영향 분석연구를 계속할 계획이다.

I. 서론

기포반응도는 월성발전소를 비롯한 CANDU형 원자로의 주된 안전성 쟁점사안으로 끊임없이 논의되어 왔다. 이는 설계기준사고를 노심에서 열에너지 불균형이 원인이 되어 기준이상의 핵연료 파손과 방사성물질 누출로 발전할 위험이 있는 사건들로 정의할 때, 이 과정에 기포반응도 증가는 조기에 운전을 중단하지 못할 경우 급격한 출력폭주로 이어져서 사건의

결말이 중대사고로 전환될 위험이 크기 때문이다.

월성 원전의 노심설계 및 안전성분석은 캐나다 AECL이 개발한 PP-V 및 RFSP를 이용한 노물리 시뮬레이션을 기초로 해석한 것인데, 1990년대에 들어서면서 연소를 거친 핵연료에 대한 PP-V 예측의 신뢰성에 대한 의문이 제기되어 왔다. 이후부터 CANDU 보유국 인허가 기관들의 요구에 따라 기포반응도의 재평가 연구가 활발하게 진행되었으나 아직까지 내재하는 불확실성과 이로 인한 보수성의 영향에 대한 확고한 결론에 도달되지 못하고 있다.

본 연구는 ENDF/B-VII.0 기반 MCNP-4C¹⁾를 이용하여 37봉 천연우라늄 핵연료다발의 표준노심격자에 대한 기포반응도를 시뮬레이션하였으며, 지금까지 각종 문헌에 제시된 값들과 비교, 종합하므로 내제된 불확실성을 추정하였다.

II. 본론

II.1. ENDF/B-VII.0기반 MCNP 라이브러리 작성 및 검증

CANDU 격자해석에 내재하는 불확실성 인자를 규명하는 참조모델에 사용할 목적으로 MCNP-4C 체제를 구축하였다. ENDF/B-VII와 NJOY.99²⁾를 이용하여 연속에너지 반응단면적을 생산하였으며 검증을 위해 표준 37-봉 핵연료다발을 장전한 CANDU 노심격자모델을 대상으로 KNE70(MCNP용 KAERI 라이브러리)³⁾와 비교하였다. 상온 및 운전온도에서 초기 노심 단일(1x1)격자와 복수(2x2)격자의 경우를 계산하였으며 결과를 [표 1]에 수록하였다. 표에 따르면,

- KNE70과 본 연구에서 생산한 라이브러리는 통계오차 범위 이내에서 서로 동일한 정확도를 보이고 있음을 확인할 수 있으며,
- 단일격자 모델과 복수격자 모델을 비교하면, 두 모델 간 오차가 상온에서 약 $1.0 \pm 1.0\text{mk}$, 운전온도에서 약 $0.3 \pm 1.0\text{mk}$ 로서 기포반응도 계산에 유효한 운전온도의 경우는 통계오차 범위 이내에 있으므로, 동일한 정확도를 갖는다고 판단되며, 가동중 노심에는 인접격자에 연소도가 다른 핵연료다발이 장전된 상태를 모사하기 위해서는 복수격자모델이 보다 현실적이다.
- 본 연구의 라이브러리를 사용하여 상온(cold clean)과 운전온도(hot clean) 간의 Δk_{∞} 는 단일격자와 복수격자 경우, 각각 0.01722 ± 0.00139 ($\sim 13.375 \pm 1.080\text{mk}$)와 0.01648 ± 0.00070 ($\sim 12.816 \pm 0.467\text{mk}$)로서 이를 월성 2,3,4 노물리 D/M의 [그림 3-2-4]⁴⁾에 도시된 PP-V 추정값, $\sim 14.25\text{mk}$ 와 비교하면, 단일격자 경우 $+0.875\text{mk}$, 만큼, 복수격자 경우 $+1.434\text{mk}$ 만큼 크게 계산되고 있다.

[표 1] KNE70과 본 연구 라이브러리의 비교

		k_{∞}		
		KNE70	HST*	오차(KNE-HST)
1x1 격자 모델	상온	1.14317 ± 0.00075	1.14330 ± 0.00063	0.00013 ± 0.00138
	운전온도	-	1.12608 ± 0.00076	-
2x2 격자 모델	상온	1.14245 ± 0.00039	1.14224 ± 0.00043	0.00021 ± 0.00082
	운전온도	-	1.12576 ± 0.00027	-
오차(1x1-2x2)	상온	0.00072 ± 0.00114	0.00106 ± 0.00106	-
	운전온도	-	0.00032 ± 0.00103	-

* 본 연구에서 생산한 라이브러리명

II.2. MCNP-4C 기포반응도

- MCNP-HST 체계로 각 연소도에서 기포반응도를 계산하였다. 여기서 연소도 0.0, 3,900 및 7,100 MWD/teU는 각각 fresh, equilibrium, exit 연소도에 대응하는 노심평균연소도로 정의한다. 본 연구에 사용한 MCNP-4C는 연소도계산을 할 수 없으므로 WIMS-IAEA을 이용한 연소도계산에서 얻은 핵종농도를 입력으로 사용하여 대응하는 연소도상태를 모사한 것이다. 여기서 사용한 WIMS-IAEA 모델은 ENDF/B-VII 기반 172군 라이브러리로서 두 코드 간의 계산 오차는 각 코드의 중성자수송이론에서 오는 것과 라이브러리의 형식에서 오는 것이 합해진 것으로 볼 수 있다. [표 2]에 각 연소도별 MCNP와 WIMS 계산 k_{∞} 를 정리 하였다. 두 계산을 비교하면 초기에는 WIMS 코드가 약4.51mk 작게 예측한다. MCNP-4C의 단일격자모델과 복수격자모델의 최대오차를 약1.0mk로 반영할 때, 두 코드의 실질적 오차는 약 3.5mk일 것이다. 이 오차는 연소도가 증가하면서 7.5×10^{-4} mk/MWD/teU 비율로 감소하여 퇴출핵연료(7,100MWD/teU)경우 오히려 MCNP가 약 1.38mk 크게 계산한다. 이는 주로 Pu 핵종의 증가와 관련 있는 것으로 예상하지만 상세한 분석이 요구된다.

[표 2] 핵연료 연소도별 MCNP와 WIMS의 k_{∞} 변화 비교

MWD/teU	k_{∞}		
	WIMS	MCNP	오차
0.0(Fresh)	1.120076	1.12576±0.00027	-0.005684±0.00027
3,900(Equilibrium)	1.047262	1.04771±0.00034	-0.000448±0.00034
7,100(Exit)	0.994424	0.99306±0.00029	+0.001364±0.00029

[그림 1]는 균질의 냉각재 밀도를 가정하고, 냉각재상실사고로 압력관 내의 기포량이 증가할 경우, k_{∞} 의 변화를 도시한 것이다. 복수격자모델을 기준하여 MCNP 계산을 수행하였으며, 기포체적 50% 상태는 균질 모델과 2상분리(statifed flow) 모델을 비교하여 표시하였다. 이를 다시 표로 정리한 것이 [표 3]이다. 표에서 2Φ는 2상분리 모델을 대표하며, 기포율(%)은 대각선의 두 채널에 해당하는 값으로서 실제 원자로의 1/2 노심에 해당하는 일차냉각계통에서 냉각재상실사고가 발생하는 경우를 모사한 것으로서, 100% 기포는 단일격자모델의 50% 기포에 해당한다고 볼 수 있다. 표에 의하면,

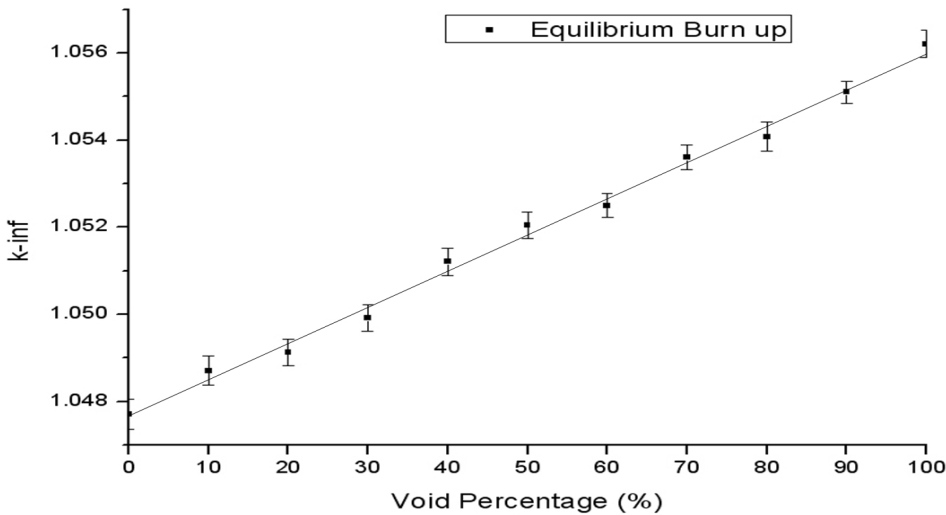
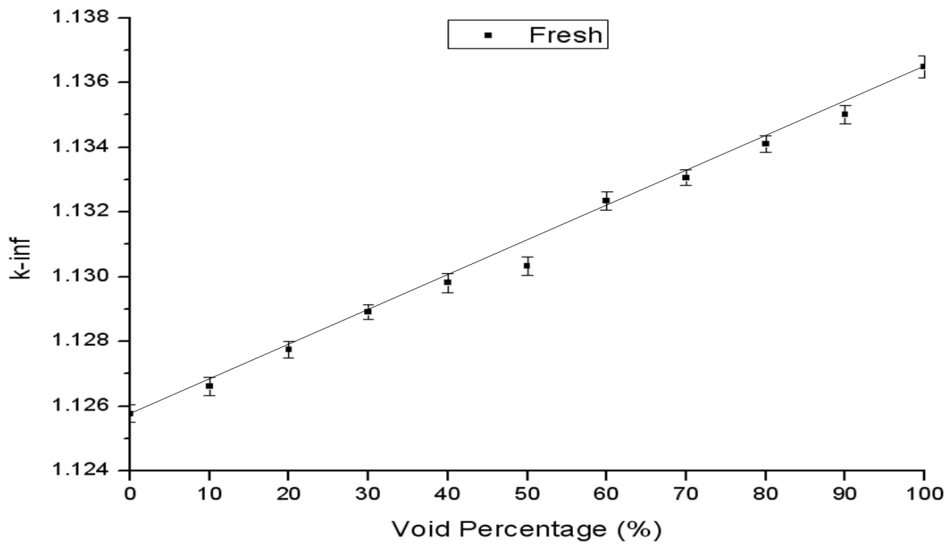
- 복수격자모델에서 대각선상에 위치한 압력관 안의 냉각재가 완전히 고갈된 상태인 50% 기포율로 삽입되는 정(+)의 반응도양은 0.0, 3,900 및 7,100 MWD/teU의 연소도에서 각각 약 8.39, 7.68 및 7.25mk로 계산되며,

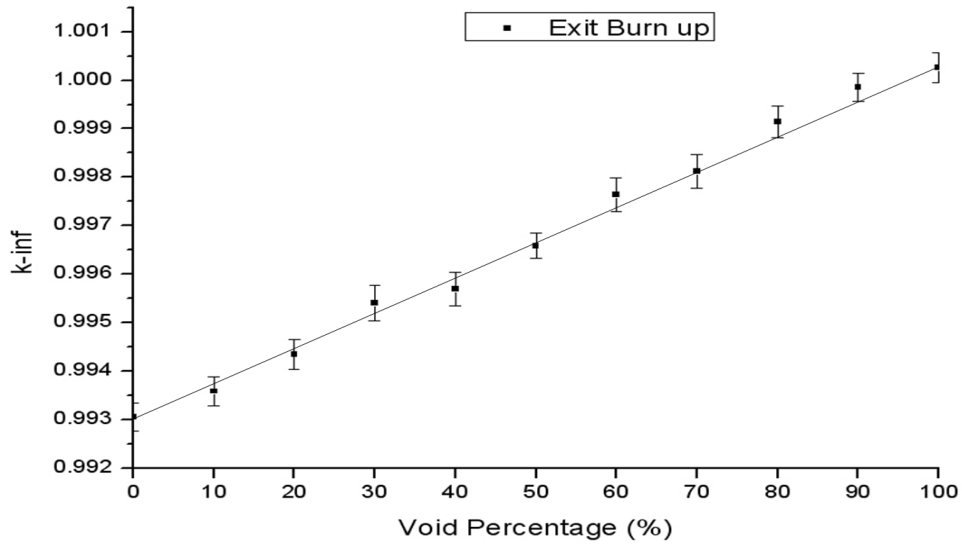
- 25% 기포율의 경우, 균질 모델과 2상분리 모델 간의 k_{∞} 차이는 각 연소도에서 0.00058 ± 0.00058 , -0.00002 ± 0.00062 및 0.00001 ± 0.00062 로서 모든 값이 통계오차 보다 훨씬 작으므로, 기포의 공간중속분포 효과는 무시할 수 있을 것으로 결론 내릴 수 있다. 이는 중수에서의 중성자 평균자유행정(mean free path)가 매우 크기 때문이며,

- 월성 2,3,4 FSAR과 D/M에 수록된 PP-V 계산 기포반응도는 초기노심, 핵분열생성물질 평형농도 및 감속재의 2.4ppm붕소용해도 조건에서 약 15mk, 평형노심에서 10.5mk로 나타나 있다. 이는 복수격자 모델에 대한 본 연구 결과와 비교하면, 초기노심은 ~1.5mk, 평형노심은 ~5.3mk 정도 PP-V가 과소평가하는 것으로 볼 수 있다.

[표 3] 연소도에 따른 기포반응도 변화(MCNP계산)

기포율(%)		연소도(MWD/teU)별 k_{∞}			
		0.0 (fresh)	3,900 (equilibrium)	7,100 (exit)	
0.0	1x1	1.12608±0.00076	-	-	
	2x2	1.12576±0.00027	1.04771±0.00034	0.99306±0.00029	
25.0	1Φ	1.13033±0.00028	1.05205±0.00030	0.99659±0.00026	
	2Φ		1.05203±0.00032	0.99660±0.00030	
50.0	1Φ	2x2	1.13648±0.00034	1.05621±0.00031	1.00026±0.00031
	2Φ	1x1	1.13607±0.00027	1.05650±0.00028	1.00082±0.00031
100.0	2x2	1.14669±0.00030	1.06412±0.00031	1.00801±0.00035	
기포 반응도 (mk)	50 (%)	1x1	7.8089±0.8051	-	-
		2x2	8.3789±0.4769	7.6811±0.5874	7.2484±0.6040
	100	2x2	15.9610±0.8209	14.7189±0.5740	14.9348±0.6393





[그림 1] 핵연료 연소도별 기포율 증가에 따른 k_{∞} 변화

II.3. 기포반응도의 불확실성 평가종합

[표 4]는 본 연구의 선행 연구로부터 보고된 CANDU 격자의 기포반응도 값들을 종합하여 정리한 것이다.

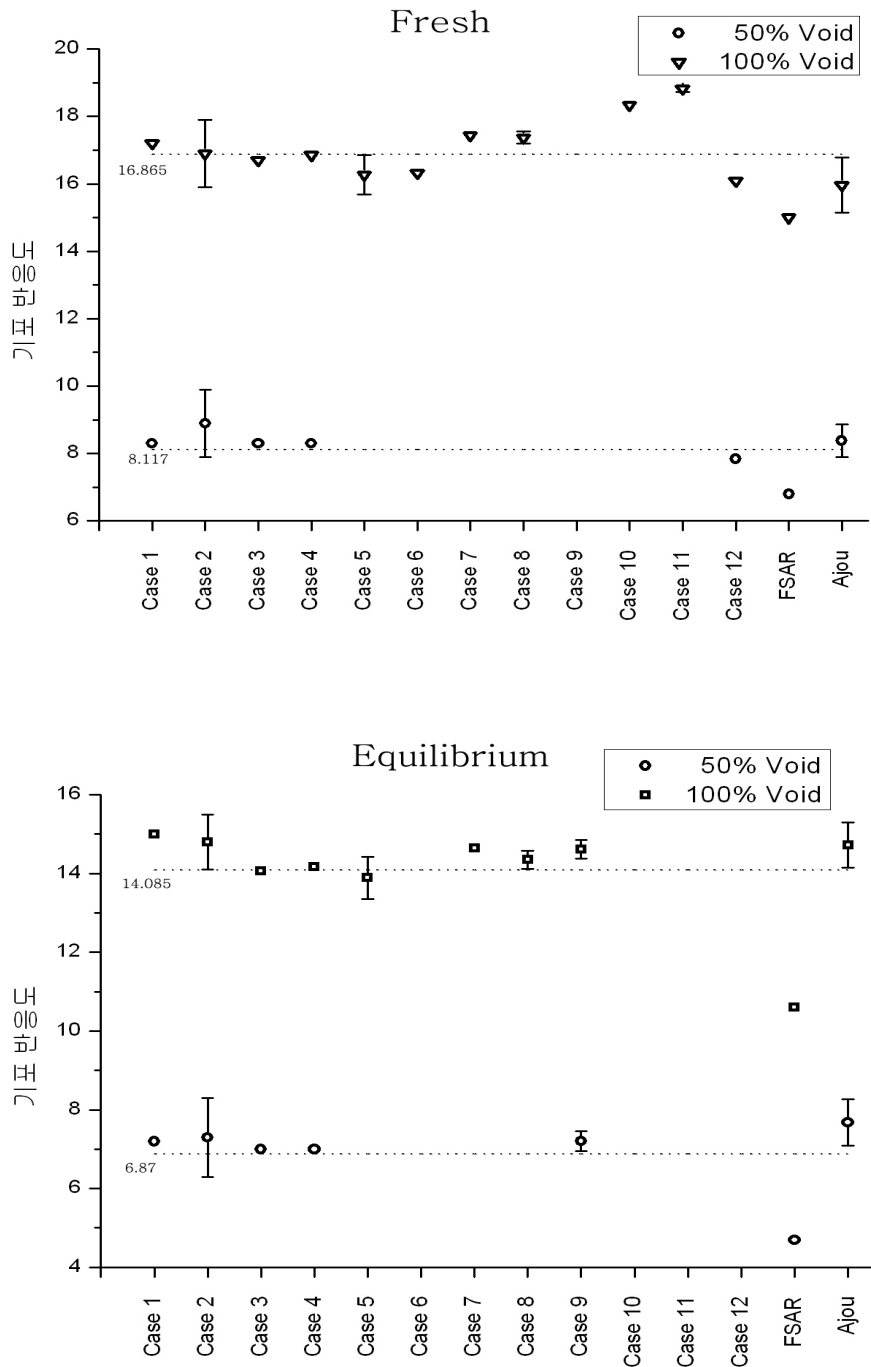
[표 4] CANDU-6 기포반응도 종합정리

분 류	50% void		100% void	
	fresh	equil/exit	fresh	equil/exit
- Valko, Feher, et. al. 1) SCALE(219군) 2) MCNP	8.3 -/8.9±1.0	7.2 -/7.3±1.0	17.2 -/16.9±1.0	15.0 -/14.8±0.7
- Roh & Choi 1) HELIOS(190군) 2) WIMS-AECL(89군) 3) MCNP4B	8.3/- 8.3/- -	7.0/- 7.0/- -	16.695 16.851 16.267±0.587	14.065/14.098 14.163/14.120 13.893±0.538
- Constantin & Balaceanu 1) CP_2D	-	-	16.32	-
- Akhtar, Rahnema, et.(1) 1) HELIOS 2) MCNP4B	- -	- -	17.43 17.37±0.18	14.65/13.94 14.35±0.23
- Akhtar, Rehnema, et.(2) 1) MCNP4B	-	7.21±0.25	-	14.61±0.24
- Kozier 1) WIMS-AECL 2) MCNP4B	- -	- -	18.34 18.82±0.09	- -
-Marleau, Talebi, et. al. 1) DRAGON	7.84	-	16.09	-
- Wolsong FSAR 1) PP-V	6.8	4.7	15.0	10.6
- 본 연구 1) MCNP-4C	8.38±0.48/-	7.68±0.59/-	15.96±0.82/-	14.72±0.57/-

사용된 코드 및 핵자료의 version이 일치하지 않지만, Kozier 경우를 제외하면 대체적으로

수송이론 코드(주로 충돌확율이론)가 Monte Carlo 코드에 비해 약간 크게 예측함을 알 수 있다. 특히 월성 2,3,4 FSAR에 수록된 기포반응도가 전노심은 1~2mk, 1/2노심은 3~4mk를 낮게 예측하고 있으므로 반응도 관점에서 볼 때, 사고해석의 보수성이 재평가되어야 한다.

본 연구 결과에 대한 신뢰성을 가지적으로 확인할 수 있도록[그림 2]에는 [표 4]의 데이터를 평균예측치 기준으로 도시하였다. ZED-2 임계실험을 이용한 검증연구의 결과⁵⁾에 따르면 fresh 37봉다발을 장전한 표준 CANDU 노심격자에 대해 WIMS-AECL(IST version)은 약 1.9 ± 0.8 mk를 과도하게 예측하는 것으로 평가하였다.



[그림 2] CANDU-6 기포반응도의 오차 분포

III. 결론 및 토의

MCNP-4C를 이용하여 CANDU 노심 격자 모델의 기포반응도 불확실성 요인을 규명하기 위해 ENDF/B-VII.0를 기반으로 한 운전온도에서의 라이브러리를 생성하였고, KNE70 라이브러리를 적용한 시뮬레이션 결과 값과 비교하여 라이브러리의 신뢰성을 확인하였다.

CANDU 노심 격자 모델은 단일(1X1)격자 모델과 복수(2X2) 격자모델을 시뮬레이션하여 두 모델의 호환성을 확인하였으나, 가동 중 노심에서 인접 채널에 연소도가 다른 핵연료 다발이 장전된 상태를 모사하기 위해서는 복수 격자 모델이 보다 현실적이라고 판단된다.

ENDF/B-VII.0 기반 MCNP-4C의 CANDU 노심격자 모델은 동일한 핵자료와 핵종농도를 사용한 WIMS-IAEA 모델과 비교할 때, 초기 노심의 임계도 오차 약 3.51mk가 연소 진행에 따라 7.5×10^{-4} mk/MWD/teU의 비율로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Pu의 생성율과 관계가 있을 것으로 예상하나 정확한 요인을 분석하기 위한 연구가 필요하다.

또한 MCNP-4C는 기포반응도를 초기노심에서 기포율 50% 및 100%에 대해 각각 8.38 및 15.96mk, 평형노심에서 7.68 및 14.72mk로 예측하였다. 이는 월성 2,3,4 FSAR의 초기노심 및 평형노심에서 100% 기포상태에 대한 값, 약 15.0 및 10.6mk와 비교할 때, 초기노심은 약 1.0mk 평형노심은 약4.1mk 보수적이지만, 타 연구결과들과의 비교에서는 최대오차 $\pm 1 \sim 2$ mk 이내에서 잘 일치하는 것으로 나타났다.

그러나 기포반응도 불확실성 요인 규명 및 영향에 대한 종합적인 결론을 내리기 위해서는 감속재의 붕산농도 변화, 감속재 및 냉각재의 중수 순도 변화, 노화에 의한 격자 구조 및 물성 변화, 중성자속 및 출력 분포 불균형, 반응도조절장치의 위치, 등 주요 설계변수의 변화에 대한 반응도영향 분석 연구를 계속해야 할 것이다.

참고문헌

1. Judith F. Briesmeister, "MCNPTM - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", 1997
2. R. E. McFarlane, D. W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System Version 91," LA-12740-M (1994)
3. 김도현, 자료제공 및 의견교환, 2007
4. 월성 2,3,4호기 최종안전성분석보고서, 한국전력(주), 1994.
5. J.D. Irish and S.R. Douglas, "Validation of WIMS-IST", 2002

