

CANDU 안전해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가(I):
CANDU 노심해석을 위한 WIMS-D5 코드 검증

Assessment of Core Physics Codes Reliability for CANDU Safety Analysis(I):
The Numerical Benchmark of WIMS-D5 Against WIMS-AECL and
POWDERPUFS-V on the CANDU Reactor

김원영*, 김영애, 민병주
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가를 위하여 CANDU-6(CANadian Deuterium Uranium) 원자로 노심에 대하여 WIMS-D5코드, WIMS-AECL코드, 그리고 POWDERPUFS-V(PPV)코드로 격자계산을 하였다. 계산시 사용되는 물리적 변수는 ENDF/B-VI 라이브러리에 근거하여 생성하였고, CANDU-6 원자로의 핵연료로는 천연 우라늄을 사용하였다. 무한증배계수, 핵연료온도변화계수, 냉각재 온도변화계수, 감속재온도변화계수 및 기포반응도에 대한 계산결과, 초기 연소도에서는 WIMS-D5와 PPV의 결과가 잘 일치한다. 그러나 연소가 진행됨에 따라 WIMS-D5와 WIMS-AECL의 결과는 차이가 적으나 PPV와는 큰 차이를 보인다. PPV가 Fresh한 핵연료를 사용해 검증된 코드임을 고려할 때 연소된 핵연료에 대한 WIMS-D5의 검증이 요구된다.

Abstract

The benchmark calculations have been performed by WIMS-D5 code, POWDERPUFS-V(PPV) and WIMS-AECL codes on the CANDU-6(CANadian Deuterium Uranium) reactors. In the lattice calculation, the physics parameters were generated for the natural uranium based on the ENDF/B-VI library of WIMS-D5 and WIMS-AECL codes. The calculation results of the infinite multiplication constant, void reactivity coefficient, fuel/coolant/moderator temperature coefficients shows that the results from WIMS-D5 and PPV are in agreement at the beginning, but as

burnup increases, the results of WIMS-D5 and WIMS-AECL agree well whereas the results shows the large difference from the PPV.

1. 서론

중수로 노심은 양의 기포반응도를 가지고 있으므로 대형 냉각재 상실사고(LOCA)시 노심출력이 급격히 증가한다. 따라서 연료와 연료 채널의 건전성에 대한 허용기준이 적절하다는 것을 확신하기 위해서는 안전계통의 성능에 대한 건전성을 검증해야 하고, 그의 건전성을 확인하기 위한 안전해석은 출력펄스의 수치적 모사를 통해 이루어진다. 따라서 안전해석시 보수적인 방법으로 양의 기포반응도 계수를 고려해야 하며, 이 계수에 대한 정확도 평가가 요구된다. 현재 원자로 내의 운전 조건과 연소도에 따른 실험자료의 부족으로 기포반응도에 관한 오차가 잘 정의되지 않아 현재의 이론 모델과 컴퓨터 코드의 검증에 문제가 따르고 있다. 따라서 원자로 설계 및 해석에서 기포반응도 계산은 충분한 신뢰도를 확보해야한다.

본 연구에서는 CANDU-6 (Canadian deuterium uranium) 원자로에 대한 격자특성에 대하여 계산을 수행하였다. 코드는 69군 ENDF/B-VI 라이브러리를 갖춘 WIMS-D5, 89군 ENDF/B-VI 라이브러리를 갖춘 WIMS-AECL(2-5d) 및 POWDERPUFS-V(PPV)를 사용하였다. 위의 코드를 이용해 같은 모델에 대한 격자계산을 통해 격자의 물리적 변수들을 계산하고 각 코드들의 차이점을 비교 검토하였다.

2. 해석 모델

천연우라늄 핵연료 다발 37개봉이 장전된 CANDU-6 노심의 격자계산을 하기 위해 WIMS-D5, WIMS-AECL과 POWDERPUFS-V(PPV) 코드를 사용하였다. PPV는 현재 천연우라늄을 핵연료로 하는 CANDU 노심에 대해 검증된 코드로서 핵연료지역, annulus 지역과 감속재지역으로 나누어 계산을 수행한다. WIMS-D5와 WIMS-AECL은 2차원 수송 이론을 사용한 코드로 수송계산은 충돌확률(Collision Probability) 이론을 이용하였고, 각각 69군, 89군 라이브러리 ENDF/B-VI를 사용하여 계산하였고 효율적인 계산을 위해 33군 축약이론을 사용하였다. WIMS-AECL은 현재 캐나다에서 검증이 진행 중이다. WIMS와 PPV에서 다루는 모델은 압력관, 공극(air gap), 칼란드리아관, 감속재의 기하학적인 형상은 동일하며, 튜브의 구성물질은 PPV보다 WIMS가 실제에 가깝게 다루고 있다. 두 코드에서 다루는 핵연료의 질량과 구조물(지르코늄 합금)의 질량은 같게 하였다. 핵연료와 피복재 사이의 물질은 원자로의 물리적 현상에 중요한 영향을 미치지 못하며, 실제로 WIMS-D5와 WIMS-AECL 계산 수행시에는 핵연료와 피복재 사이의 공극은 피복재의 밀도를 낮추어 공극이 없는 것으로 가정하여 계산하였다.

3. 해석 결과

본 연구에서는 CANDU-6 원자로의 격자특성을 이용하여 WIMS-D5, WIMS-AECL과 POWDERPUFS-V 코드의 신뢰도 평가를 위하여 연소도에 따른 무한증배계수, 냉각재 기포반응도와 핵연료 온도변화계수, 냉각재 온도변화계수 및 감속재 온도변화계수를 계산하여 비교 검토하였다.

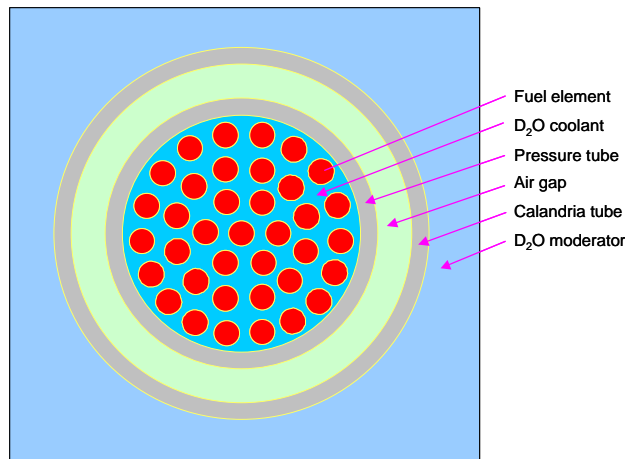


그림 1 CANDU 격자 단면

(1) 무한증배계수

연소도에 따른 무한증배계수 k-infinity의 변화를 그림 2에 도시하였다. 표 1과 그림 2에서 보는바와 같이 WIMS-D5와 WIMS-AECL의 결과에는 큰 차이가 없으나, PPV의 결과와 비교할 때 WIMS-D5 및 WIMS-AECL의 결과가 낮게 나타나고 있다. 이는 PPV가 상업로에서 검증되었음을 고려하면 WIMS-D5와 WIMS-AECL의 결과가 과소 평가됨을 알 수 있다. 즉, 연소 초기에는 PPV는 WIMS-AECL과 2.1%, WIMS-D5와는 0.4% 차이를 보이고, 연소가 진행됨에 따라 4000MWD/T일 때 WIMS-AECL과 2.0%, WIMS-D5와는 2.5% 차이를 보인다.

표 1 연소도에 따른 무한증배계수의 변화

Burnup (MWD/T)	WIMS-AECL	WIMS-D5	PPV	Difference (% , PPV 기준)	
				WIMS-AECL*	WIMS-D5**
0	1.1112	1.0929	1.0881	2.1	0.4
4000	1.0433	1.0377	1.0641	2.0	2.5
8000	0.9791	0.9728	0.9879	0.9	1.5

* : $(k_{inf}^{WIMS-AECL} - k_{inf}^{PPV}) / k_{inf}^{PPV} \times 100$

** : $(k_{inf}^{WIMS-D5} - k_{inf}^{PPV}) / k_{inf}^{PPV} \times 100$

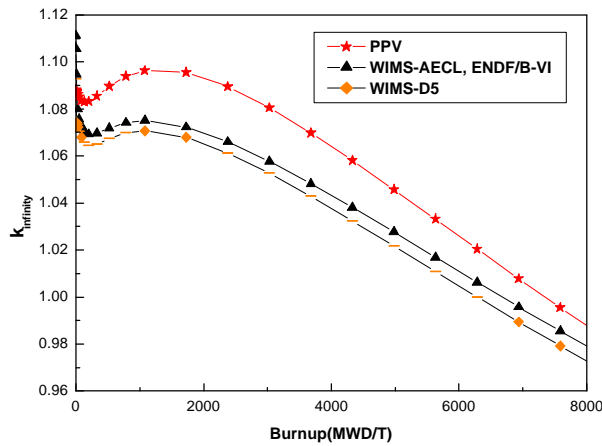


그림 2 연소도에 따른 무한증배계수의 변화

(2) 냉각재 기포반응도

중수로에서 냉각재가 상실되면 노심에 양의 기포반응도가 주입되므로 원자로의 출력은 급격히 증가하게 된다. 천연우라늄을 핵연료로 사용하는 중수로 CANDU-6는 양의 기포반응도를 가지고 있으므로 대형 냉각재 상실사고 시 과도출력을 생성한다. 따라서 기포반응도는 원자로의 출력을 결정하는 중요한 변수이고 그 크기에 따라 원자로와 핵연료의 안전성이 결정되므로 설계기준사고 해석에서 그의 신뢰도가 확보되어야 한다.

냉각재 기포 반응도는 100% Void의 상태를 계산하였다. 표 2와 그림 3에서 보는바와 같이 연소 초기에 WIMS-AECL은 PPV 보다 0.6mk 높게, WIMS-D5는 PPV보다 0.5mk 낮게 예측하지만, 4000MWD/T에서는 WIMS-AECL 및 WIMS-D5가 PPV보다 각각 3.4mk, 2.3mk 높게 예측한다. 즉, 초기 연소도에서는 유사하나 연소가 진행됨에 따라 차이가 커지고 있다.

표 2 연소도에 따른 냉각재 기포 반응도

Burnup (MWD/T)	PPV (mk)	WIMS-AECL (mk)	WIMS-D5 (mk)	Difference (%)	
				(AECL-PPV)/PPV	(D5-PPV)/PPV
0	15.9192	16.5049	15.4639	3.689	-2.86
4000	10.1507	13.5674	12.4243	33.66	22.40
8000	7.9778	12.7484	12.2223	59.80	53.20

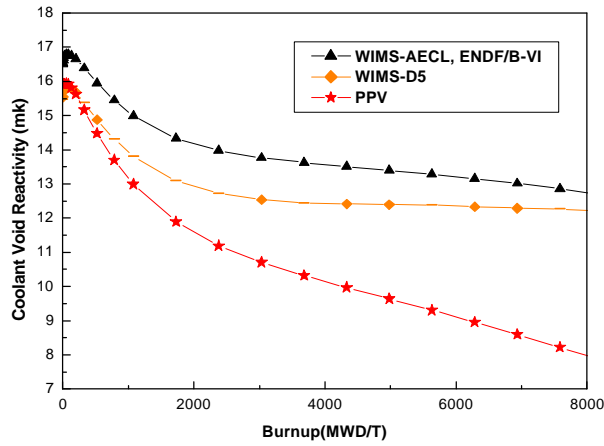


그림 3 연소도에 따른 냉각재 기포반응도

(3) 핵연료 온도변화계수

중수로에서 핵연료 온도 변화계수는 경수로에 비해 상대적으로 긴 열중성자의 분산시간 때문에 원자로 출력을 크게 증가시키지 못하므로 안전에 큰 영향을 주는 변수는 아니지만 노심의 물리적 특성을 결정짓는 요소이다. 따라서 핵연료의 온도를 각각 $960.0 \pm 50K$ 로 변화시키면서 핵연료 온도변화계수를 계산하였다. 계산 결과는 아래의 표 3과 그림 4에서 보는 바와 같이 WIMS-AECL과 WIMS-D5가 PPV보다 핵연료온도 변화계수를 높게 예측한다. 초기에는 WIMS-AECL과 WIMS-D5가 각각 0.0033mk, 0.0016mk 높게 예측하지만, 연소가 진행됨에 따라 두 코드에 의한 계산값의 차이가 점점 커짐을 볼 수 있다.

표 3 연소도에 따른 핵연료 온도변화계수

Burnup (MWD/T)	PPV (mk/°C)	WIMS-AECL (mk/°C)	WIMS-D5 (mk/°C)	Difference (%)	
				(AECL-PPV)/PPV	(D5-PPV)/PPV
0	-0.0136	-0.0104	-0.0121	24.0	11.7
4000	-0.0050	0.0008	-0.0012	84.5	75.0
8000	-0.0004	0.0063	0.0039	1844.8	1191.0

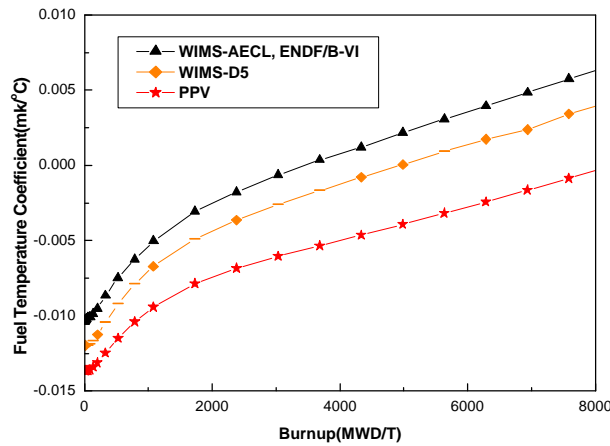


그림 4 연소도에 따른 핵연료 온도변화계수

(4) 냉각재 온도변화계수

CANDU 격자 내의 냉각재 온도는 $561.0 \pm 10\text{K}$ 로, 밀도는 각각 0.807859×0.972470 , 0.807859×1.025608 로 하고 격자코드 PPV, WIMS-AECL과 WIMS-D5를 이용하여 냉각재 온도변화계수를 구하여 비교하였다. 계산 결과인 표 4와 그림 5에서 보는 바와 같이 WIMS-AECL과 WIMS-D5가 PPV 보다 냉각재 온도변화계수를 높게 예측한다. 초기 운전 시 WIMS-AECL이 약 0.0145mk 높게, WIMS-D5가 0.0074mk 높게 예측하지만 연소가 진행됨에 따라 그 차이는 점점 적어져 8000 MWD/T에서 WIMS-AECL은 0.0074mk 높게, WIMS-D5는 0.0060mk 높게 예측한다.

표 4 연소도에 따른 냉각재 온도변화계수

Burnup (MWD/T)	PPV (mk/°C)	WIMS-AECL (mk/°C)	WIMS-D5 (mk/°C)	Difference (%)	
				(AECL-PPV)/PPV	(D5-PPV)/PPV
0	0.0167	0.0312	0.0241	86.8	44.3
4000	0.0400	0.0517	0.0478	29.2	19.5
8000	0.0570	0.0645	0.0630	13.1	10.4

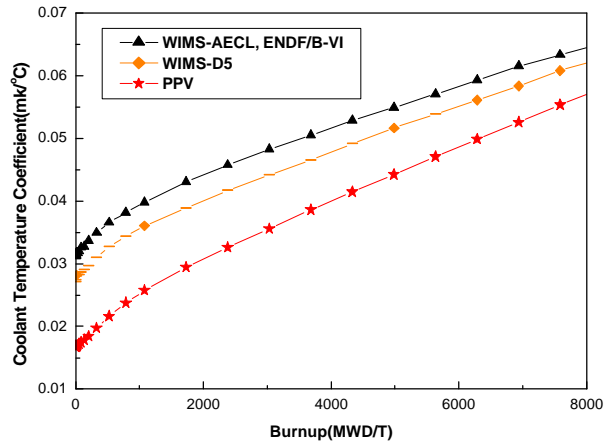


그림 5 연소도에 따른 냉각재 온도변화계수

(5) 감속재 온도변화계수

감속재의 온도를 $342.00 \pm 10K$, 밀도를 각각 1.085089×0.993998 , 1.085089×1.005365 로 하여 계산한 결과 표 5와 그림 6에서 보는 바와 같이 WIMS-D5와 WIMS-AECL이 초기 상태에서는 PPV 보다 각각 0.0093mk, 0.0299mk 높게 예측하지만, 4000 MWD/T일 때 각각 0.0361mk, 0.0252mk 높게 예측한다. 연소가 진행됨에 따라 WIMS-AECL, WIMS-D5와 PPV의 차이는 점점 커짐을 알 수 있다.

표 5 연소도에 따른 감속재 온도변화계수

Burnup (MWD/T)	PPV (mk/°C)	WIMS-AECL (mk/°C)	WIMS-D5 (mk/°C)	Difference (%)	
				(AECL-PPV)/PPV	(D5-PPV)/PPV
0	-0.0740	-0.0441	-0.0647	40.4	9.3
4000	0.0700	0.0447	0.0338	36.0	51.7
8000	0.167	0.1070	0.0927	36.0	44.4

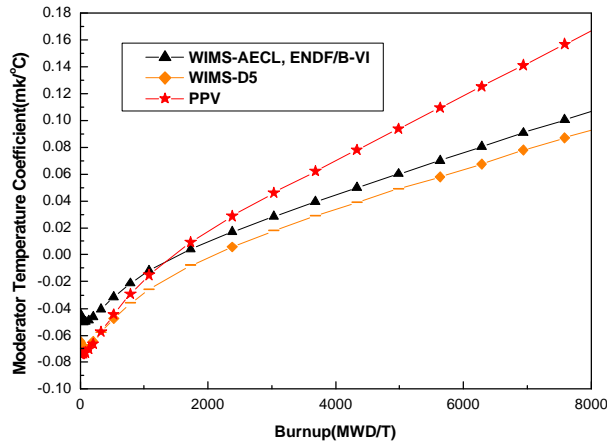


그림 6 연소도에 따른 감속재 온도변화계수

4. 결론

본 연구에서는 CANDU-6 원자로를 대상으로 POWDERPUFS-V, WIMS-D5, WIMS-AECL을 사용하여 연소도에 따른 무한증배계수, 기포반응도, 핵연료 온도변화계수, 냉각재 온도변화계수 및 감속재 온도변화계수를 계산하여 상호 비교하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 무한증배계수는 POWDERPUFS-V에 의한 결과가 WIMS-AECL과 WIMS-D5보다 높게 예측됨을 알 수 있었다. 그리고 감속재 온도변화계수를 제외하고 핵연료/냉각재 온도변화계수, 그리고 기포반응도는 연소가 진행됨에 따라 POWDERPUFS-V의 결과가 WIMS-AECL과 WIMS-D5의 결과 보다 낮게 예측됨을 알 수 있었다.
- (2) POWDERPUFS-V는 Fresh한 핵연료를 사용하여 실험을 통하여 검증된 코드이므로 연소가 진행되면서 불확실도가 커진다고 할 수 있다. 캐나다 AECL에서는 연소된 핵연료에 대한 검증을 Chalk River에서 실행된 ZED-2 실험을 통하여 WIMS-AECL에 대한 검증을 수행하고 있다. 국내에서도 ZED-2 시험 결과를 이용한 WIMS-D5의 검증이 필요하다.
- (3) 또한, 기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가를 위해서는 정확한 방법론에 대한 포괄적이고 체계적인 검증과정을 통하여 기포 반응도에 대한 적절한 오차 허용범위를 얻기 위한 근거를 마련하여야 하며, 이를 위하여 격자 셀과 핵 자료 라이브러리에 대한 평가가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] E.S.Y. Tin and P.C. Loken, "POWDERPUFS-V Physics Manual", TDAI-31 part 1, AECL, 1979.
- [2] B.J.Min, G.S. Shim, B.G. Kim and O.S. Kwon, "Evaluation of WINFRITH and ENDF/B-V Libraries for WIMS-AECL to analyze CANDU Core", Proceedings of the Korea Nuclear Society Spring, 1997.
- [3] J.V. Donnelly, "WIMS-CRNL A User's Manual for the Chalk River Version of WIMS", AECL Report AECL-8955, 1986.
- [4] M.J. Halsall and C.J. Taubman, "WIMSD: A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis", AEA Technology, 1986.
- [5] D.A. Jenkins and U. Rouben, "Reactor Fuelling Simulation Program-RFSP: User's Manual for Microcomputer Version", TTR-3212, Rev.1