

## CANDU 안전해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가(II): 중수감속임계로 (DCA) 격자해석을 통한 WIMS-D5 검증

### Assessment of Core Physics Codes Reliability for CANDU Safety Analysis(II): Comparison WIMS-D5 with WIMS-AECL for Deuterium Critical Assembly

김영애, 김원영, 민병주  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150  
오세기  
아주대학교  
경기도 수원시 팔달구 산5번지

#### 요약

중수로 핵연료의 경우 냉각재 상실사고시 양의 기포반응도가 발생한다. 따라서 안전해석용 기포반응도 평가 방법의 정확도가 요구된다. 본 연구에서는 기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가를 위하여 일본 JNC에서 수행한 중수감속임계로(DCA) 임계실험 자료를 이용하여 WIMS-D5 코드와 WIMS-AECL 코드로 격자계산을 실시하였다. 핵연료 종류에 따라 기포분율에 따른 무한증배계수와 유효증배계수, 기포분율 변화에 따른 기포반응도를 계산하여 비교하였다. 무한증배계수는 WIMS-AECL이 WIMS-D5보다 평균 20 mk정도 높게 계산하고 유효증배계수는 WIMS-D5가 0.5%, WIMS-AECL이 1.8%의 오차로 계산되었다. 기포반응도는 Pu 함유량이 증가할수록 WIMS-D5의 오차가 WIMS-AECL 보다 줄어드는 경향을 보인다.

#### Abstract

In case of loss of coolant accident, the void reactivity of the HWR fuel provides a positive reactivity and increases the reactor power abruptly. Therefore the benchmark calculations have been performed for WIMS-D5 against WIMS-AECL using DCA(Deuterium Critical Assembly) in order to secure credibility of the void reactivity in the stage of nuclear design and analysis. For the DCA the lattice parameters were generated for the 1.2 wt% enriched uranium and 0.54 wt% PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> fuels based on the ENDF/B-VI library of WIMS-D5 and WIMS-AECL codes. The results shows that the

prediction errors of WIMS-D5 and WIMS-AECL from the comparison with the experimental results of the effective multiplication factors are 0.5% and 1.8%, respectively.

## 1. 서론

중수로에서 냉각재 상실사고가 발생하면 핵연료 다발의 기하학적 특성과 중수의 감속능력으로 인해 노심에 양의 기포반응도가 주입되어 원자로의 출력이 급격히 상승한다. 기포반응도는 원자로의 출력을 결정하는 중요한 변수로 안전해석시 고려되는 기포반응도에 대한 신뢰도 평가가 요구된다.

노심의 격자계산에 사용중인 코드로 천연 우라늄 핵연료를 이용한 실험을 바탕으로 검증된 POWDERPUFS-V(PPV)는 연소된 핵연료에 대한 격자계산에는 이용할 수 없는 단점을 지니고 있다. 따라서 캐나다 AECL에서는 현재 연소된 핵연료에 대한 실험자료를 이용하여 검증을 수행중이다. 그러나 국내에서의 WIMS-AECL에 대한 검증은 소스가 개방되지 않아 의문점이나 문제가 발생했을 때 모든 해결을 AECL에 의뢰해야하는 문제가 있다. 따라서 국내기술의 확보와 자립화를 위해 격자코드를 자체 개량하여 기포반응도 계산 체제를 구축하는 노력이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 WIMS-D5 코드의 검증을 위해 일본 JNC(Japan Nuclear Cycle Research Institute)에서 수행한 중수감속임계로(DCA, Deuterium Critical Assembly)에 대한 격자 계산을 수행하였다. 핵연료 종류에 따라 기포분율에 따른 무한증배계수와 유효증배계수 그리고 기포분율 변화에 따른 기포반응도를 WIMS-D5 코드와 WIMS-AECL 코드로 계산하여 격자코드의 신뢰도 평가를 수행하였다.

## 2. 격자 코드 및 해석 모델

### 2.1 격자 코드

WIMS(Winfrith Improved Multigroup Scheme)는 원자로 격자 계산을 위한 다군수송코드로 이론식에 근거하여 개발되었다. 3차원 모델의 경계조건을 이용하여 2차원이나 1차원으로 가정하여 계산한다. 중성자의 충돌 단면적을 나타내는 연속적인 에너지를 그룹으로 나누어 평균값을 사용하고 모델의 영역을 비연속적인 영역으로 나누어 중성자속을 계산한다.

WIMS-D5는 1998년 OECD/NEA Data Bank로부터 개방된 코드로 격자 계산을 위한 범용 코드이다. 특히 일정한 클러스터(Cluster)나 배열(Array)을 이루는 로드(Rod)나 판(Plate) 형태의 연료구조를 계산할 수 있으며, 에너지 그룹 구조는 주된 열적 계산을 할

수 있다. 최근 사용되고 있는 라이브러리는 2002년 5월에 완성된 WLUP(WIMS-D Library Update)이다. WLUP은 IAEA/ICTP 참석자들이 다군 핵자료 보완 프로젝트를 하면서 ENDF/B-VI를 기반으로 완성한 것이다. 에너지그룹은 69그룹과 172그룹으로 구성 되어있다.

WIMS-AECL은 지난 20년 동안 AECL(Atomic Energy of Canada Limited) 소속 Chalk River 연구소에서 WIMS-D4를 기반으로 CANDU 핵연료 구조와 구성재질 해석에 알맞도록 개량한 것이다. 사용하는 라이브러리는 Winfrith, ENDF/B-V, ENDF/B-VI로 에너지그룹은 각 69, 69와 89그룹으로 나누어져 있다. ENDF-VI 라이브러리는 AECL에서 CANDU 격자계산을 위하여 가공한 라이브러리로 구조물을 이루는 원소별, 동위원소별 핵자료를 포함하고 있다는 것이 특징이라 하겠다.

## 2.2 해석 모델

중수감속임계로(DCA)는 ATR(Advanced Thermal Reactor) 개발을 위해 제작된 임계로로 다양한 임계실험이 수행되었으며 그 결과 노심 내 중성자 거동과약 등 노물리 기술개발에 기여하였다. DCA 단면도는 그림1과 같이 핵연료 다발이 3개의 환으로 구성된 28개 핵연료 봉으로 구성되어있다. 격자길이 22.5 cm와 25.0 cm 두 종류가 있으며 핵연료, 피복재, 냉각재, 압력관, 칼란드리아관, 감속재로 구성되어있다. 일본 JNC에서 실시한 DCA 임계실험에서 핵연료 종류와 기포분율에 따라 임계상태에 도달했을 때의 Material Buckling과 기포분율 변화에 따른 기포반응도를 측정하였다. 냉각재 기포 모의 실험에서는 경수, 공기, 중수와 경수의 혼합물들을 감속능력이 냉각재 기포함유율 30%, 70%, 87%와 유사하게 되도록 조절한다. 이때 열에너지 영역의 흡수 단면적을 조절하기 위해서 소량의 붕소( $H_3BO_3$ )가 첨가되었다. 실험에 사용된 기포분율에 따른 냉각재의 구성은 표1과 같다.

본 논문에서는 WIMS-D5와 WIMS-AECL을 사용하여 DCA에서 수행한 핵연료 종류에 따른 기포반응도를 격자길이 22.5 cm에 대해 재분석하였다. 1.2 wt%  $UO_2$  핵연료와 0.54 wt%  $PuO_2-UO_2$  핵연료에 대해서는 냉각재 기포분율이 0%, 30%, 70%, 87% 100%(Air)인 경우에 대한 Material Buckling과 기포반응도를 측정한 실험 결과를 이용하였다.

WIMS-D5는 69 그룹 ENDF/B-VI(WLUP) 라이브러리를 사용하고 WIMS-AECL은 89 그룹 ENDF/B-VI(AECL) 라이브러리를 사용하여 수행하였다. 격자계산을 위한 모델로 핵연료, clad, 냉각재, 압력관, 칼란드리아관과 감속재를 구성하였으며 그림2에 나타내었다. 이 모델을 이용하여 핵연료 종류와 기포분율에 따른 무한증배계수, 유효증배계수를 계산하고 기포분율 변화에 따른 기포반응도를 계산하였다.

### 3. 해석 결과 및 논의

기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가를 위하여 일본 JNC에서 수행한 중수감속임계로(DCA) 임계실험 자료를 이용하여 WIMS-D5 코드와 WIMS-AECL 코드로 격자해석을 수행하였다. 또한 WIMS-D5의 기포반응도의 신뢰도를 평가하기 위해 WIMS-AECL 해석결과와 비교를 위하여 핵연료종류와 기포분율에 따른 무한증배계수, 유효증배계수와 기포반응도를 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 표3에서 무한증배계수는 기포분율이 증가함에 따라 커지며 WIMS-AECL과 WIMS-D5의 결과는 평균 20 mk 정도 차이를 보인다. 그림3과 그림4는 격자길이 22.5 cm일 때 1.2 wt%  $UO_2$ 와 0.54 wt%  $PuO_2-UO_2$  핵연료에 대한 기포분율에 따른 무한증배계수의 계산 결과이다. 두 코드 계산 결과는 기포분율 30%와 70%일 때가 기포분율 0%, 87%, 100%일 때 보다 차이가 크다. 이는 기포분율 30%와 70%일 때 열에너지영역에서 단면적을 고려하여 실험시 봉소를 첨가하였는데 봉소에 포함된 보론의 흡수단면적의 영향이 격자계산에 크게 반영되어 나타난 것으로 보인다. 따라서 향후 보론의 영향에 대한 평가가 수행될 필요가 있다.
- (2) 유효증배계수는 표3에서 보는바와 같이 WIMS-D5코드의 결과에서 평균 0.5%의 오차를 보이고 WIMS-AECL 코드의 결과 평균 1.8%의 오차를 보인다. 기포분율에 따라서는 기포분율이 증가할수록 오차가 적어지는 경향을 보인다. 이는 실험시 각 기포분율에 대한 구성물질의 성분비에 대한 정확도의 문제라 생각되며 이에 대한 평가가 필요하다. 핵연료 종류에 따라서는 Pu의 함량이 커질수록 WIMS-AECL보다 WIMS-D5의 오차가 적게 나타난다. 따라서 Pu 단면적에 대한 신뢰성 평가가 필요하다. 이상 유효증배계수의 결과에 따르면 WIMS-D5코드가 실험결과와 더 잘 일치하는 경향을 보인다.
- (3) 중수로에서 기포반응도는 냉각재 상실 사고 시 양의 반응도를 보이는 것이 일반적이거나 본 연구에서 사용한 DCA 노심의 경우 격자길이가 22.5cm로 현 중수로의 격자길이(28.575cm) 보다 작고 냉각재에 경수를 사용하므로 음의 기포반응도를 보인다. 표4는 기포분율 변화에 따른 기포반응도 실험결과와 계산결과를 나타낸 것이다. 실험결과와 마찬가지로 기포분율의 변화가 커짐에 따라 기포반응도가 음의 방향으로 커지는 경향을 보이며,  $UO_2$  핵연료보다  $PuO_2-UO_2$  핵연료에서의 기포반응도가 더 작다.
- (4) 향후 여러 가지 모델에 대한 다양한 실험 자료를 바탕으로 WIMS-D5 코드의 검증이 수행되어야 하고 코드에서 개선이 요구되는 부분을 국내 기술로 개량할 필요가 있다. 또한 WIMS-D5/RFSP 노심 출력 계산 체계를 구축하여 노심출력 계산을 수행·검증하여야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- [1] WIMSD, NEA Data Bank Documentation, No. 1507/01. 1998.
- [2] WIMS-D Library Update, IAEA-DOC-DRAFT, 2002. 5.
- [3] DONNELLY J.V., "WIMS-CRNL: A User's Manual for the Chalk River Version of WIMS", AECL-8955, Atomic Energy of Canada Limited, 1986.
- [4] 민병주, 석호천, T. Hazama, N. Aihara, "Study on Analyses of Experimental Data at DCA", KAERI/TR-1426/99, 한국원자력연구소, 1999.
- [5] 최항복, 민병주, 노규홍, 양미경, "중수로 핵연료 기포반응도 실험 결과 분석", KAERI/TR-1997/2001, 한국원자력연구소, 2001.

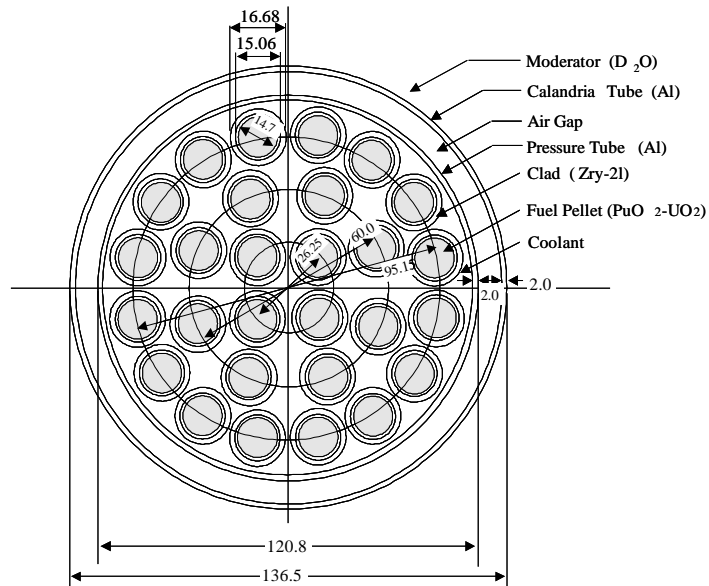


그림 1 28 연료봉 DCA 단면도  
 (0.54 wt% PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> 핵연료)

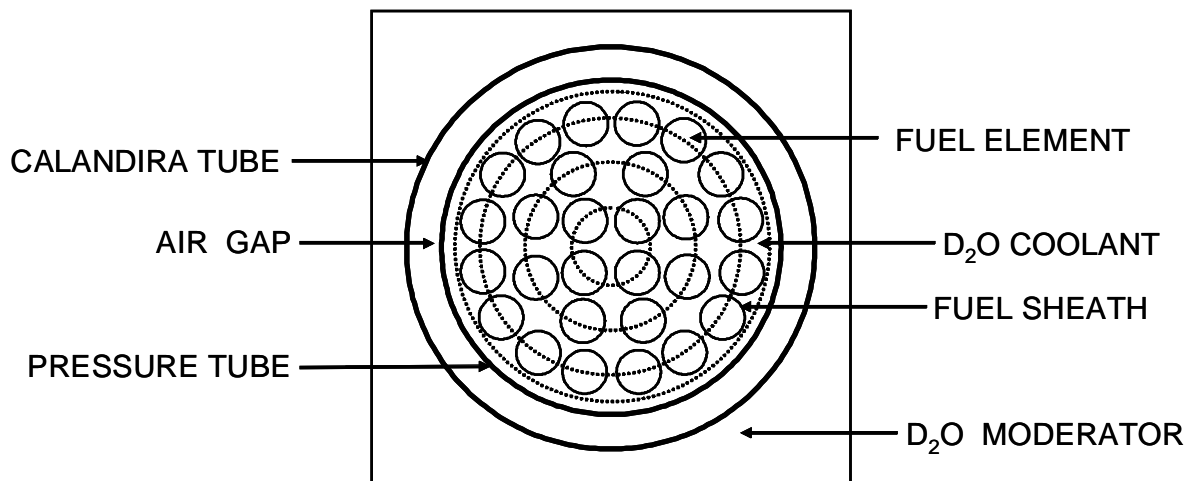


그림 2 WIMS 격자계산을 위한 DCA 격자모델

표 1 기포분율에 따른 냉각재 성분

Simulated void fraction (%)	w/o in Coolant				Density ( $g/cm^3$ )
	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Air	
0	100	-	-	-	0.99777
30	63.17	36.82	0.00921	-	1.0359
70	18.07	71.91	0.0215	-	1.0866
86.7	0.45	99.55	-	-	1.1078
100	-	-	-	100	0.001205

표 2 실험값 Material Buckling, 계산값 Radial and Axial Buckling

Lattice pitch(cm)	Fuel Type	Void fraction (%)	$B_m^2$	$B_r^2$	$B_z^2$
22.5	1.2 wt% UO <sub>2</sub>	0	11.07	8.4138	2.6674
		30	10.96	8.3302	2.6409
		70	10.24	7.7830	2.4674
		87	10.13	7.6994	2.4409
		100	8.83	6.7113	2.1276
	0.54 wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	15.34	11.6593	3.6963
		30	14.51	11.0284	3.4963
		70	12.95	9.8427	3.1204
		87	12.43	9.4475	2.9951
		100	10.85	8.2466	2.6144

표 3 기포분율에 따른 증배계수 : WIMS-D5, WIMS-AECL 격자 계산

Lattice pitch (cm)	Fuel Type	Void fraction (%)	무한증배계수( $k_{inf}$ )		유효증배계수( $k_{eff}$ )		유효증배계수 상대오차×100	
			WIMS-D5	WIMS-AECL	WIMS-D5	WIMS-AECL	WIMS-D5	WIMS-AECL
22.5	1.2 wt% UO <sub>2</sub>	0	1.1824	1.1998	1.0149	1.0218	1.49	2.18
		30	1.1970	1.21630	1.0084	1.0273	0.84	2.73
		70	1.2014	1.2300	0.9966	1.0191	-0.34	1.91
		87	1.2248	1.2460	1.0015	1.0167	0.15	1.67
		100	1.2355	1.2576	1.0014	1.0080	0.14	0.80
	0.54 wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0	1.2502	1.2575	1.0150	1.0197	1.50	1.97
		30	1.2524	1.2680	1.0011	1.0277	0.11	2.77
		70	1.2474	1.2692	0.9994	1.0162	-0.06	1.62
		87	1.2625	1.2776	1.0026	1.0126	0.26	1.26
		100	1.2725	1.2884	1.0012	1.0015	0.12	0.15



표 4 기포분율 변화에 따른 기포반응도

Lattice pitch (cm)	Fuel type	Change in void fraction (%)	Experiment	WIMS-D5	WIMS-AECL	상대오차	
						WIMS-D5	WIMS-AECL
22.5	1.2 wt% UO <sub>2</sub>	0 → 30	-0.22±0.06	-6.33	5.26	-27.76	24.90
		0 → 70	-2.01±0.26	-18.03	-2.55	-7.97	-0.27
		0 → 87	-2.51±0.31	-16.12	-4.89	-5.42	-0.95
		0 → 100	-6.31±0.43	-13.20	-13.42	-1.09	-1.13
		30 → 70	-1.74±0.25	-11.70	-7.81	-5.72	-3.49
		30 → 87	-2.22±0.29	-6.83	-10.15	-2.08	-3.57
		30 → 100	-6.00±0.41	-6.87	-18.68	-0.15	-2.11
		70 → 87	-0.30±0.09	4.87	-2.34	17.23	-6.79
		70 → 100	-3.96±0.33	4.83	0.56	2.22	1.14
		87 → 100	-3.64±0.32	-0.04	-8.53	0.99	-1.34
	0.54 wt% PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	0 → 30	-2.24±0.54	-13.64	7.62	-5.09	4.40
		0 → 70	-6.81±0.75	-15.32	-3.36	-1.25	0.51
		0 → 87	-9.36±0.88	-12.15	-6.84	-0.30	0.27
		0 → 100	-18.39±1.30	-13.49	-17.81	0.27	0.03
		30 → 70	-4.49±0.63	-1.68	-10.97	0.63	-1.44
		30 → 87	-6.79±0.76	-3.68	-14.45	0.46	-1.13
		30 → 100	-15.09±1.14	-2.33	-25.43	0.85	-0.69
		70 → 87	-1.74±0.46	3.16	-3.48	2.82	-1.00
		70 → 100	-8.63±0.86	1.83	-14.45	1.21	-0.67
		87 → 100	-6.42±0.76	-1.34	-10.97	0.79	-0.71

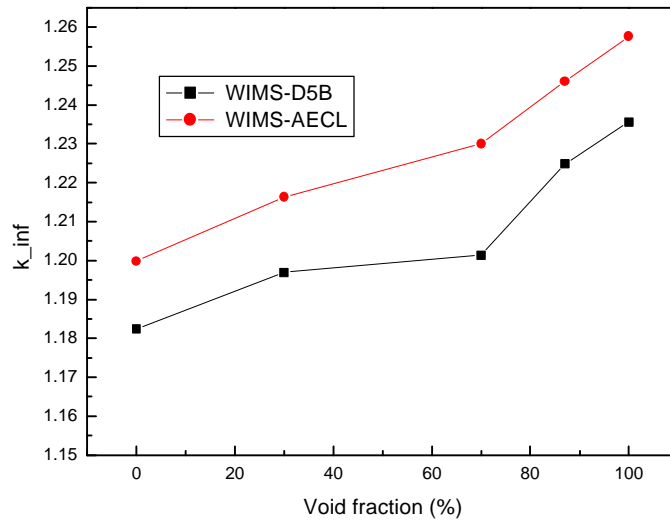


그림 3 1.2 wt% UO<sub>2</sub> 핵연료에 대한  
무한증배계수 계산 결과 비교

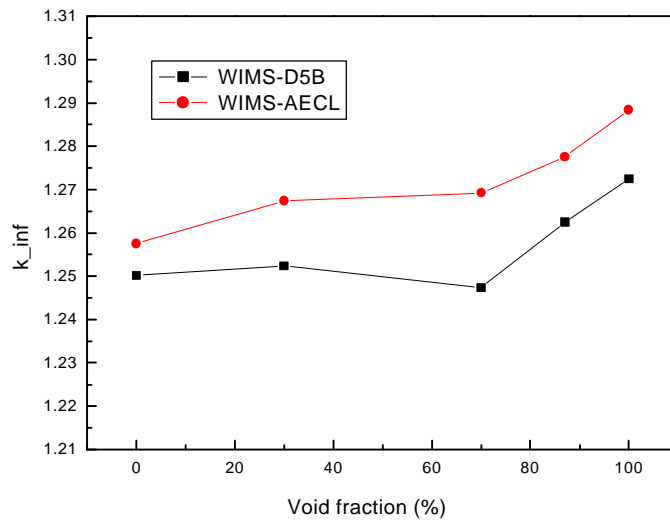


그림 4 0.54 wt% PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> 핵연료에 대한  
무한증배계수 계산 결과 비교