

중수감속임계로(DCA) 격자의 기포반응도 해석

Analysis on Void Reactivity of DCA Lattice

민병주, 노규홍, 최항복, 양미경
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로 핵연료의 기포 반응도는 냉각재 상실 사고시 원자로에 양의 반응도를 주입시켜 출력을 급격히 상승시킨다. 따라서 원자로 설계/해석에서 기포 반응도의 계산은 충분한 신뢰도를 확보해야 하며, 이를 위한 실험 자료의 평가가 필요하다. 중수감속임계로(DCA)에서 수행된 노물리 실험 자료 중 30, 70, 87, 100%의 기포분율에서의 기포반응도 측정 자료를 이용하여, WIMS-AECL과 MCNP 코드의 성능을 평가하였다. 사용한 핵연료는 1.2 w/o UO₂, 1.5 w/o UO₂, 5SPu, 8SPu 핵연료이며 기포분율이 증가할수록 무한증배계수가 커지며, 그 중 1.2 w/o UO₂ 핵연료와 1.5 w/o UO₂ 핵연료의 경우는 WIMS-AECL의 결과와 MCNP-4B의 결과는 약 1 % 내외로 잘 일치한다. 그러나 Pu이 포함되어 있는 5SPu와 8SPu 핵연료의 경우는 10 %이상의 차이가 난다. 또한 플루토늄의 경우, 냉각재 기포반응도는 기포분율 증가에 따른 spectrum hardening으로 인하여 핵연료 내의 플루토늄 함유량이 증가할수록 더 음의 값을 갖는다.

ABSTRACT

In case of loss of coolant accident, the void reactivity of CANDU fuel provides the positive reactivity and increases the reactor power rapidly. Therefore, it is required to secure credibility of the void reactivity for the design and analysis of reactor, which motivated a study to assess the measurement data of void reactivity. The assessment of lattice code was performed with the experimental data of void reactivity at 30, 70, 87 and 100 % of void fractions. The infinite multiplication factors increased in four types of fuels as the void fractions of them grow. The infinite multiplication factors of uranium fuels are almost within 1 %, but those of Pu fuels are over 10 % by the results of WIMS-AECL and MCNP-4B codes. Moreover, coolant void reactivity of the core loaded with plutonium fuel is more negative compared with that with uranium fuel because of spectrum hardening resulting from large void fraction.

1. 서론

중수로에서 냉각재가 상실되면 핵연료다발의 기하학적 특성과 중수의 강력한 감속 능력으로 인해 노심에 양의 기포반응도가 주입되고, 원자로 출력은 급격히 상승하게 된다. 기포반응도는 냉각재 상실사고 시 원자로의 출력을 결정하는 중요한 변수이고, 그 크기에 따라 원자로의 안전성이 결정되므로, 원자로의 설계/해석 과정에서 기포반응도의 신뢰도가 확보되어야 한다. 이를 확인하기 위한 일련의 실험들이 캐나다 ZED-2에서 여러 차례 수행된 바 있다[Ref.1]. ZED-2에는 fresh fuel에 대한 실험자료는 있으나 irradiated fuel에 대한 실험자료가 부족하여 이에 대한 실험을 최근에 수행하였다.

일본 JNC(Japan Nuclear Cycle Research Institute)의 중수 감속재와 경수 냉각재를 사용하는 임계로(중수 감속 임계로, Deuterium Critical Assembly)에서는 저농축 우라늄과 MOX 핵연료 다발에 대한 임계 실험을 수행한 바 있다.[Ref.2-6]

이 중수 감속 임계로는 Advanced Thermal Reactor(ATR)를 개발하기 위하여 만들어진 임계로이다. ATR은 혼합핵연료(MOX)를 이용한 압력관형 중수감속, 비등 경수 냉각 원자로이며, 이러한 노형에서는 냉각재 중의 기포가 원자로 안전성에 미치는 영향, 연소도의 증가에 따른 핵 특성의 변화 등 기존의 경수로와 다르나, 일부 중수로와 비슷한 점이 있다.

본 연구에서는 그 동안 일본의 DCA에서 얻어진 임계로 실험 자료[Ref.7]들이 중수로 평형노심 상태의 기포반응도 평가에 사용될 수 있는지를 검토하기 위해 중수로 노심 해석에 사용되는 코드인 WIMS-AECL [Ref.8]과 MCNP-4B [Ref.9] 코드를 사용하여 검증 계산을 수행하였다.

2. 중수감속 임계로(DCA)의 개요

DCA는 노심내 중성자의 거동 파악에 주안을 둔 설계로 중성자속 레벨은 10^9 n/cm²·s 이고 최대출력은 1 kW 이다. 노심의 외주 및 하방에서 새어나온 중성자가 그 외측에 있는 물질에서 산란되어 다시 노심에 돌아오는 것을 방지하기 위해 노심탱크의 벽두께가 얇고(10 mm) 하부에는 흡수체(B₄C)가 설치되어 있다. 탱크의 크기는 직경 3 m, 높이 3.5 m, 연료유효길이 2 m 이다.(그림 1 참조)

단위격자의 크기, 즉 격자핏치는 상하부 페어로 한 그리드판 방식이며, 노심내로 실험 삽입물 등의 출입을 위하여 수평 및 수직 실험공간이 설치되어 있다(그림 2 참조). 사용된 핵연료의 유효 길이는 2 m이다. 실험에 사용된 핵연료는 3개의 환으로 구성된 28-봉 다발이다. 이 핵연료 다발은 압력관, 공기 및 칼란드리아관에 의해 중수 감속재와 격리되어있다. 또한 핵적으로 중요한 냉각재 기포 반응도의 측정을 위해 냉각재 중의 기포 양을 정량적으로 억제하기 위하여 모의 기포재도 사용할 수 있다. 연료집합체는 분해가능한 구조이며, MOX연료 펠레트 내의 조사박(箔)도 측정할 수 있는 글로브 박스가 구비되어 있다. 그 외 중수감속재 중에 B를 용해, 제거하는 장치, 중수 및 경수를 80 °C까지 승온시킬 수 있는 장치, 연료체를 600 °C까지 승온시킬 수 있는 장치 등을 구비하고 있다.

그림 1과 2는 DCA 노심과 상부 그리드판(25 cm)의 단면도를 보여주고 있다. 그림 3과 4는 UO₂와 PuO₂-UO₂ 핵연료다발의 구조에 대해 각각 도시하였다.

3. 계산 방법

본 논문에서는 WIMS-AECL과 MCNP 코드를 사용하여 DCA에서 수행된 네 가지 핵연료의 기포반응도를 재분석하였다. 이 때 사용한 노심구조는 다음과 같다.

- 28 핵연료 봉으로 구성된 1.2 wt% enriched UO_2 핵연료 단일노심
- 28 핵연료 봉으로 구성된 1.5 wt% 와 1.2 wt% enriched UO_2 핵연료 2 영역 노심
- 28 핵연료 봉으로 구성된 5SPu 와 1.2 wt% enriched UO_2 핵연료 2 영역 노심
- 28 핵연료 봉으로 구성된 8SPu 와 1.2 wt% enriched UO_2 핵연료 2 영역 노심

위의 모든 계산에 사용한 격자피치는 CANDU 노심의 격자피치에 가까운 25.0 cm 격자피치를 사용하고, 0%, 30%, 70%, 87%와 100%의 기포분율에서 기포반응도계산을 수행하였다.

또 각각의 핵연료에 대하여 기포 분율의 변화에 따른 무한증배계수와 기포반응도 변화율을 WIMS-AECL과 MCNP 코드로 계산하였다.

WIMS-AECL 격자 계산에는 89그룹 ENDF/B-V와 ENDF/B-VI 라이브러리를 사용하여 수행하였다. 격자계산을 위한 모델로서 핵연료, clad, 냉각재, 압력관, 칼란드리아관과 감속재등으로 구성하였다. 수송계산을 위한 적분 선과 각의 수를 민감도 계산을 통해 각각 139와 7로 정하였고, 감속재 영역의 간격 분할은 0.5 cm로 하였다.

MCNP-4B 격자계산에는 핵연료 다발의 대칭성을 고려하여, 효율적인 계산을 위해 반경 방향으로 반사경계 조건을 사용하여 전체의 1/4만 모사하였고, 축방향으로는 무한한 평행관으로 이루어진 2차원 모델을 이용하였다. 구조재를 제외한 핵연료 봉, Cladding, 냉각재, 압력관, 칼란드리아관 및 감속재뿐만 아니라 핵연료봉과 Cladding 사이의 간격까지 모두 모사하였다. 격자에 대한 임계도 계산은 MCNP-4B의 KCODE 카드를 이용해 수행하였고, 모든 격자계산에는 한 주기 동안의 중성자 추출 수를 2000, 초기 비활성 주기 수를 50, 활성주기 수를 500으로 하였다. 핵단면적 자료는 MCNP-4B 코드와 함께 LANL에서 생산하여 배포하는 핵단면적자료를 이용하였다.

4. 계산결과 및 논의

중수감속임계로의 격자특성 중 냉각재 기포반응도의 변화율을 보기 위해 기포분율에 따른 무한증배계수를 계산하였다. 이 계산은 WIMS-AECL코드와 MCNP-4B 코드에 ENDF/B-V와 ENDF/B-VI 핵단면적 자료를 사용하였다. 계산결과는 표1과 표2에 나타내었다.

네가지 핵연료(1.2 w/o UO_2 , 1.5 w/o UO_2 , 5SPu, 8SPu 핵연료)의 경우 기포분율이 증가할수록 무한증배계수가 커지며, MCNP-4B와 WIMS-AECL 코드 계산의 차이도 증가함을 알 수 있다. 1.2 w/o UO_2 핵연료와 1.5 w/o UO_2 핵연료의 경우는 WIMS-AECL의 결과와 MCNP-4B의 결과는 약 1 % 정도로 잘 일치한다. 그러나 Pu이 포함되어 있는 5SPu와 8SPu 핵연료의 경우는 10 %가 넘으며, ENDF/B-V의 경우는 약 11~ 13 % 정도 차이가 나나 ENDF/B-VI의 경우는 약 13 ~ 16 % 정도의 차이가 난다.

Pu이 없는 핵연료의 경우의 무한증배계수는 MCNP-4B와 WIMS-AECL의 결과가 잘 일

치한다. 그러나 Pu이 들어있는 핵연료의 경우는 많은 차이가 있다. 이는 WIMS-AECL코드로 용으로 만들어진 ENDF/B-V와 ENDF/B-VI 핵단면적 자료는 캐나다 AECL에서 천연우라늄을 사용하는 CANDU 핵연료에 사용하기 위하여 만든 것으로 Pu이 섞여있는 핵연료에 대한 실험적 검증이 부족하기 때문이라 생각된다. 이를 확인하기 위하여 WIMS-AECL 계산 결과를 핵단면적 자료간의 비교를 수행하면 UO₂ 핵연료만 사용한 경우는 거의 일치하나 Pu 핵연료를 사용한 경우는 약 3% 내외의 차이를 보인다.

냉각재 기포반응도는 Pu의 경우 커다란 단면적 때문에 우라늄보다 더 음의 값을 갖는다. 이는 ²³⁹Pu와 ²⁴⁰Pu의 0.3 eV 에너지 영역에 giant resonance가 있으므로 Pu이 U보다 기포반응도를 감소시키는데 유효하다. 즉 우라늄의 경우보다 플루토늄의 경우 기포분율 증가에 의해 spectrum hardening이 약 0.3 eV 에너지에서의 중성자 공명흡수를 더 크게 한다. 따라서 핵연료의 플루토늄 양이 증가할수록 더 음의 값을 갖는다.

그림 5와 6은 기포분율에 따른 무한증배계수를 WIMS-AECL과 MCNP코드로 계산한 결과이다. 이때 사용한 핵단면적 자료는 ENDF/B-V이다. WIMS-AECL의 경우는 우라늄과 플루토늄의 경우 차이가 많으나 MCNP의 경우는 비교적 좁은 범위에 분포되어 있다.

그림 7과 8의 경우는 기포분율에 따른 기포반응도 변화를 ENDF/B-V 핵단면적 자료를 사용하여 WIMS-AECL과 MCNP코드로 계산한 결과이다. 두 결과는 비슷한 경향으로 플루토늄의 양이 증가할수록 더 작은 차이를 보인다.

그림 9와 10의 경우는 기포분율에 따른 두가지 핵연료(1.2 w/o UO₂, 5SPu)의 무한증배계수를 ENDF/B-V, VI 핵단면적 자료를 사용하여 WIMS-AECL과 MCNP 코드로 계산한 결과를 보여준다. 1.2 w/o UO₂ 핵연료의 경우는 큰 차이가 없으나 5SPu 핵연료의 경우는 WIMS-AECL과 MCNP 코드의 계산결과에 많은 차이를 보인다. 따라서 WIMS-AECL코드에 사용하는 핵단면적 자료는 플루토늄 단면적에 대한 검증 및 보완이 필요하다고 생각된다.

그림 11과 12는 기포분율에 따른 두가지 핵연료(1.2 w/o UO₂, 5SPu)의 기포반응도 변화를 ENDF/B-V, VI 핵단면적 자료를 사용하여 WIMS-AECL과 MCNP 코드로 계산한 결과를 보여준다. 각 핵연료에 대한 두가지 코드의 결과는 비슷한 분포를 보여준다.

이상의 결과는 냉각재 상실사고시 기포반응도 계산에 사용되는 격자코드에 대한 검증계산을 수행한 것으로 WIMS-AECL 코드에 사용되는 핵단면적 자료의 플루토늄 부분의 보완이 필요하다는 것을 보여준다. 그러나 원자로 안전성에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 노심코드의 신뢰도를 제고하여야 한다. 이를 위하여 DCA 실험자료를 이용하여 WIMS-AECL/RFSP 코드 검증계산을 수행할 예정이다.

후기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

1. Jones R. T., "Experiments Performed in ZED-2 in Support of the Irradiation of (Th,Pu)O₂ Fuel (BDL-422) in NRU", AECL-7918, Atomic Energy of Canada Limited, 1984.
2. KOWATA Y. and FUKUMURA N., "Study on Coolant Void Reactivity of Pressure-Tube-Type Heavy Water Lattice by the Substitution Method," *Nucl. Sci. Eng.*, **99**, pp.299-312 (1988)
3. AIHARA N. et al. "Axial Dependence of Partial Void Reactivity in a Light Water Cooled, Heavy Water Moderated, Pressure Tube Type Reactor" , *Nucl. Sci. Eng.* **109**, 158 (1991)
4. HACHIYA Y. et al., "Lattice Parameter Measurements on Cluster-Type Fuel for Advanced Thermal Reactor" , *J. Nucl. Sci. & Tech.* **13**(11), 618 (1976)
5. WAKABAYASHI T. and HACHIYA Y., Thermal Neutron Behavior in Cluster-Type Plutonium Fuel Lattices , *Nucl. Sci. Eng.* **63**, 292 (1977)
6. SHIBA K., Substitution Measurements on 28-Fuel-rod Critical Clusters in D2O and Their Analysis by the Second Order Perturbation Method , *Nucl. Sci. Eng.* **65**, 492 (1978)
7. 민병주, 김순영, 류석진, 석호천, "중수감속임계로의 실험자료 분석", 한국원자력학회 춘계학술대회, 2000. 5.
8. DONNELLY J.V., "WIMS-CRNL: A User's Manual for the Chalk River Version of WIMS," AECL-8955, Atomic Energy of Canada Limited, 1986.
9. BRIESMEISTER J.F., ed., "MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.

표 1 기포분율의 변화에 따른 중수감속임계로의 무한증배계수
 - ENDF/B-V 핵단면적 자료를 이용한 MCNP-4B와 WIMS-AECL 코드의 계산결과 -

	ENDF/B-V	Coolant Void Fraction (%)				
		0	30	70	87	100
1.2 UO ₂	MCNP-4B	1.253	1.276	1.303	1.328	1.344
	WIMS-AECL	1.258	1.282	1.312	1.339	1.356
	Diff.(W-M)	0.005	0.005	0.009	0.011	0.012
1.5 UO ₂	MCNP-4B	1.332	1.353	1.375	1.396	1.412
	WIMS-AECL	1.337	1.358	1.384	1.408	1.425
	Diff.(W-M)	0.005	0.005	0.009	0.012	0.013
5SPu	MCNP-4B	1.300	1.318	1.334	1.353	1.370
	WIMS-AECL	1.175	1.186	1.202	1.221	1.240
	Diff.(W-M)	-0.125	-0.132	-0.132	-0.132	-0.130
8SPu	MCNP-4B	1.372	1.384	1.394	1.409	1.426
	WIMS-AECL	1.255	1.262	1.273	1.290	1.309
	Diff.(W-M)	-0.117	-0.122	-0.121	-0.119	-0.117

표 2 기포분율의 변화에 따른 중수감속임계로의 무한증배계수
 - ENDF/B-VI 핵단면적 자료를 이용한 MCNP-4B와 WIMS-AECL 코드의 계산결과 -

	ENDF/B-VI	Coolant Void Fraction (%)				
		0	30	70	87	100
1.2 UO ₂	MCNP-4B	1.250	1.273	1.302	1.327	1.344
	WIMS-AECL	1.259	1.282	1.312	1.339	1.357
	Diff.(W-M)	0.009	0.009	0.010	0.012	0.013
1.5 UO ₂	MCNP-4B	1.329	1.350	1.374	1.396	1.413
	WIMS-AECL	1.338	1.358	1.384	1.409	1.427
	Diff.(W-M)	0.009	0.008	0.010	0.013	0.014
5SPu	MCNP-4B	1.295	1.312	1.330	1.348	1.366
	WIMS-AECL	1.148	1.158	1.174	1.193	1.214
	Diff.(W-M)	-0.147	-0.154	-0.156	-0.155	-0.152
8SPu	MCNP-4B	1.366	1.377	1.389	1.404	1.422
	WIMS-AECL	1.230	1.236	1.247	1.264	1.286
	Diff.(W-M)	-0.133	-0.141	-0.142	-0.140	-0.136

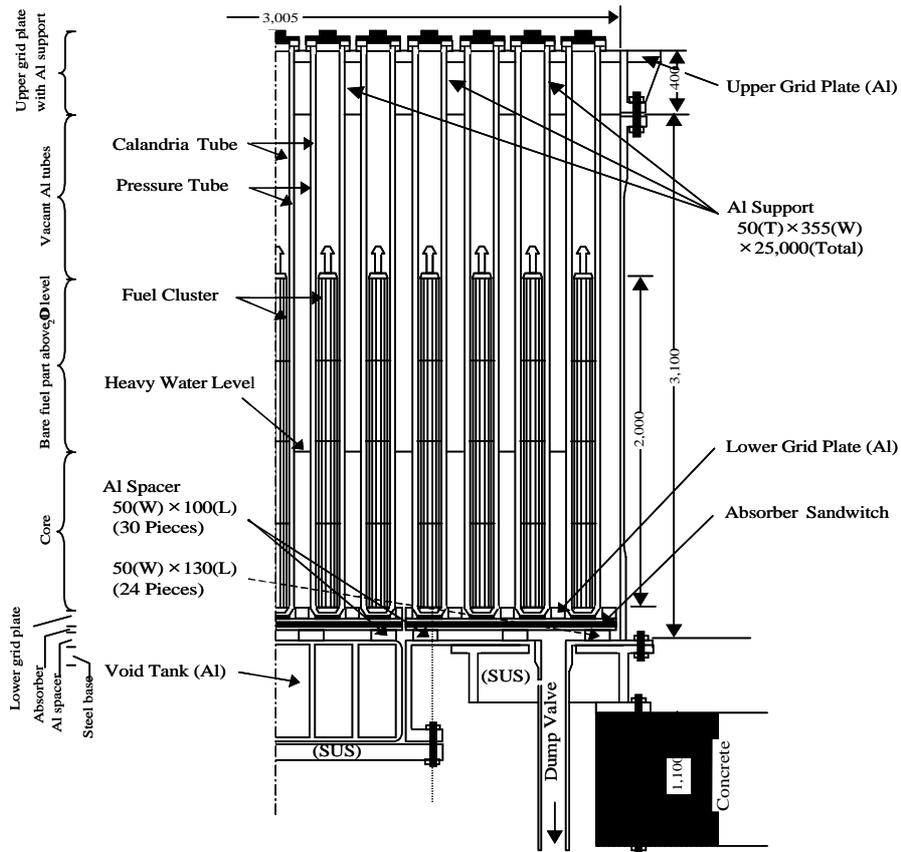


그림 1 DCA 노심의 단면도

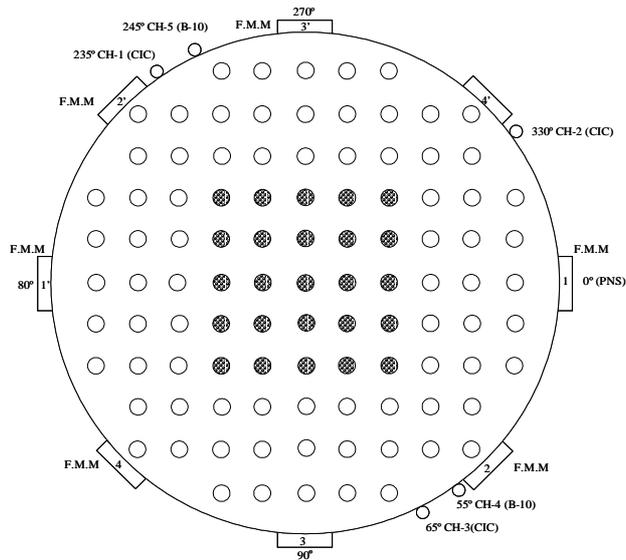


그림 2 상부 그리드판 격자의 단면도 (25 cm)

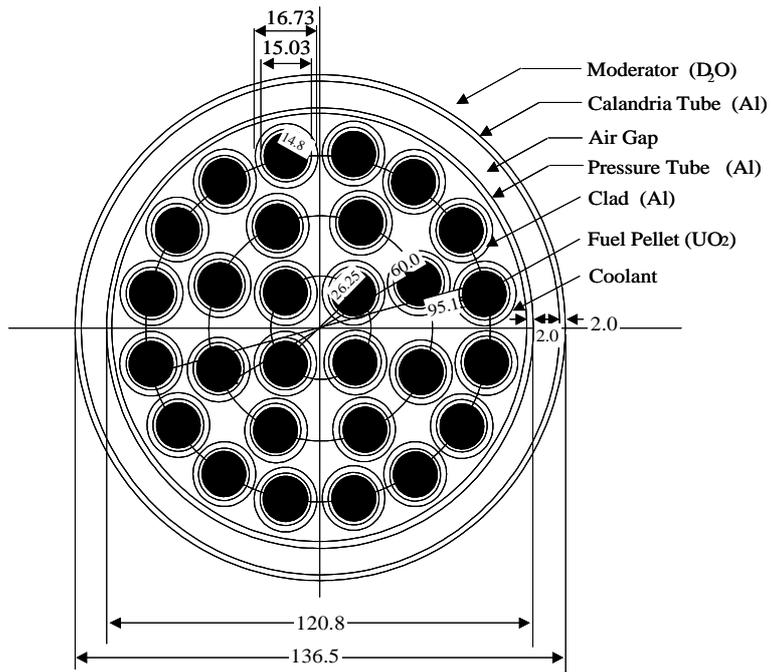


그림 3 28-rod 1.2 wt% UO₂ fuel assembly의 단면도

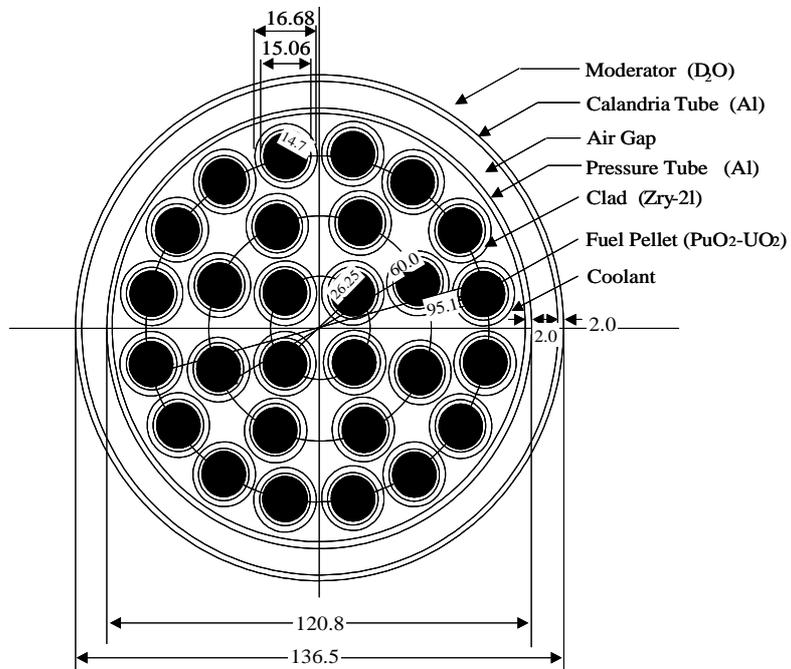


그림 4 28-rod 1.2 wt% PuO₂-UO₂ fuel assembly의 단면도

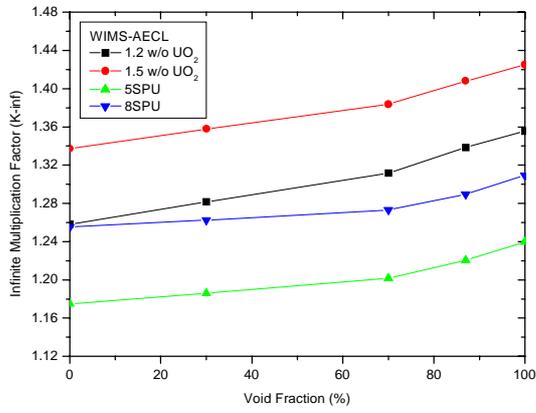


그림 5 기포분율에 따른 무한증배계수의 변화 (WIMS-AECL 코드 사용)

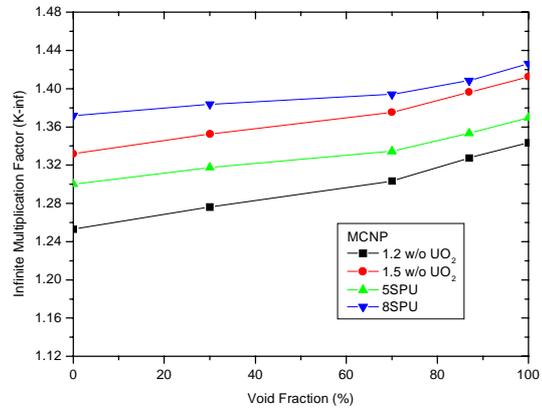


그림 6 기포분율에 따른 무한증배계수의 변화 (MCNP 코드 사용)

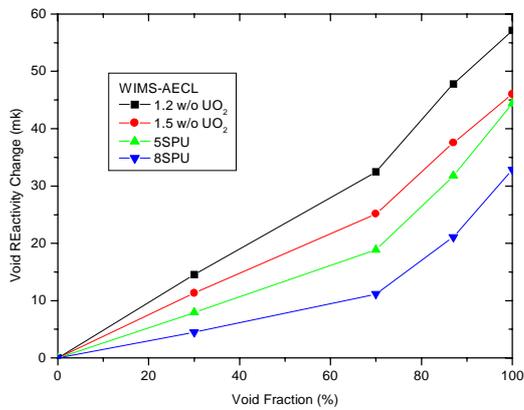


그림 7 기포분율에 따른 기포반응도 변화 (WIMS-AECL 코드 사용)

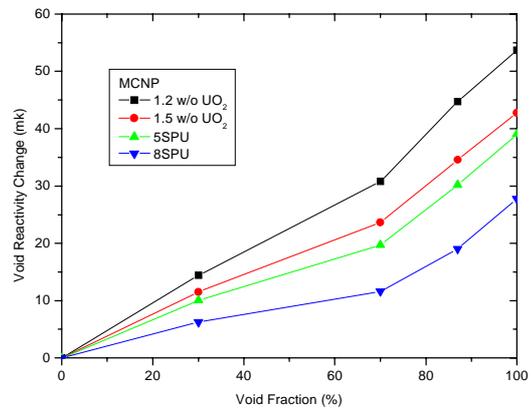


그림 8 기포분율에 따른 기포반응도 변화 (MCNP 코드 사용)

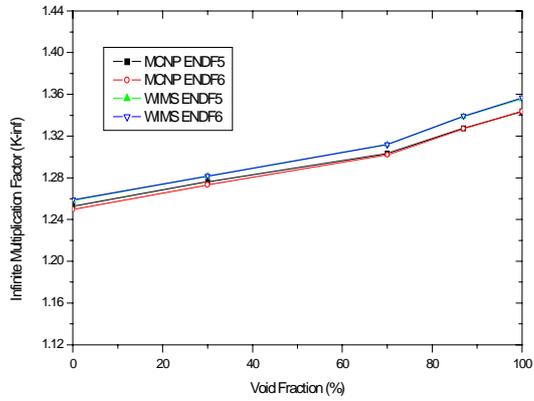


그림 9 기포분율에 따른 1.2 w/o UO_2 핵연료의 무한증배계수

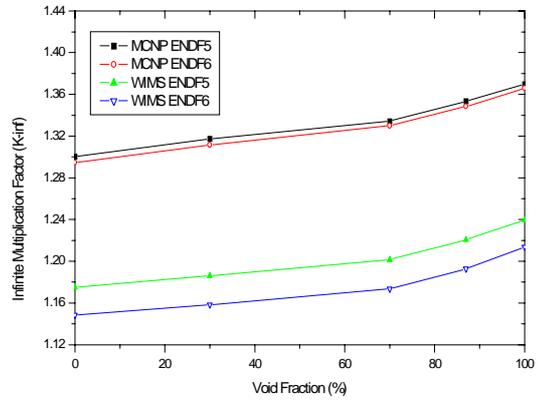


그림 10 기포분율에 따른 5SPU 핵연료의 무한증배계수

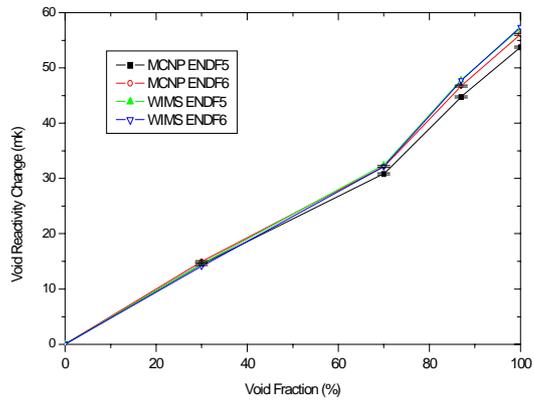


그림 11 기포분율에 따른 1.2 w/o UO_2 핵연료의 기포반응도 변화

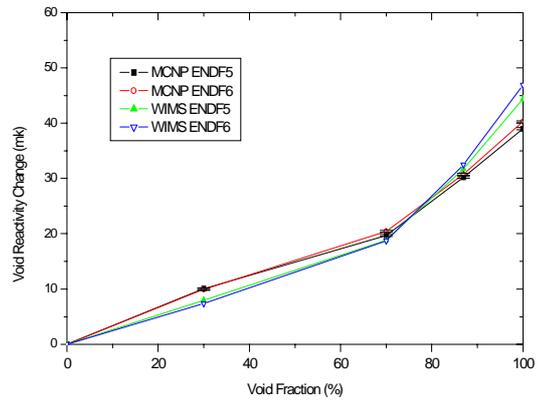


그림 12 기포분율에 따른 5SPU 핵연료의 기포반응도 변화