

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성1호기 핵설계보고서를 이용한 WIMS-AECL 코드평가
Evaluation for the Code WIMS-AECL Using Wolsong-1
Physics Design Manual

박동환, 김윤희, 최 훈, 김용배, 이창섭
한전전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

월성 1호기 핵설계보고서의 계산결과를 WIMS-AECL코드를 이용하여 비교, 평가하고, 향후 핵설계 시 WIMS-AECL 코드를 이용한 핵설계 방법론을 구축하고자 하였다. 이에 우선적으로 핵연료 채널내 감속재, 냉각재, 핵연료 온도변화에 따른 반응도 변화효과를 고려하여 계산하였다. 특히 LOCA시 정반응도 주입량 계산에 필수적인 냉각재 기포 변화에 따른 반응도 변화도 계산하였다. 온도나 기포반응도 효과 모두 초기장전 핵연료에서 유사하였으나, 핵연료의 연소가 진행됨에 따라 그 차이가 커졌다.

Abstract

A comparison and evaluation of the cell-codes WIMS-AECL was performed for Wolsong-1 physics design manual. This study was done as part of establishment for WIMS based physics design. Most parameters which have effect on reactivity coefficient like temperature of moderator, coolant, fuel and purity of coolant and moderator were considered. Specially the calculation of void reactivity which is current hot issue for positive reactivity insertion in LOCA was also performed. All of WIMS-AECL results was similar with PPV based calculation in the fresh fuel. However, there is a tendency that the deviation between the two codes increases as the fuel burnup increases.

1. 서론

현재 중수로는 국내에서 총 4기가 운전중이고, 원자력 전체 발전량의 약 20 %를 차지하고 있으나 후속호기의 경수로형 결정으로 중수로 기술 보유국인 캐나다로부터 중수로의 핵심기술 및 실험자료를 협조받기 어려운 실정이다. 캐나다 원자력공사(AECL)는 지금까지의 운전경험과 실험으로 밝혀진 설계 문제점을 수시로 보완해 왔으며, 규제기관은 발전소 안전 관련부분을 일반 안전현안(Generic Action Item;GAI)으로 분류하여 전력회사의 꾸준한 기술개발을 유도하고 있다. 이에 캐나다에서 제기되고 있는 현안들을 조사하고 국내에서도 대처방안들을 연구함으로써 중수로 설계기술의 개발과 신뢰성 구축이 상당히 절실한 시점이다. 특히 캐나다 규제기관(Candian Nuclear Safety Commission ; CNSC)은 핵설계 코드의 부정확성을 파악하여 전력회사에 중수로 일반 안전현안(GAI)항목으로 이의 해결책을 요구하였고, 향후 안전성 분석보고서(FSAR) 개정 심사 시 robust physics 코드의 적용을 기본요건으로 규정한 바 있다. 국내에서는 현재 월성 1호기 주기적 안전성 평가를 수행하고 있지만 GAI에 대한 준비가 전무한 상태이므로 국내 중수로 설계기술의 기초자료를 확보하는 것이 우선적이다. 이에 월성 1호기 핵설계자료(Physics Design Manual)[1]를 WIMS-AECL [2]코드를 이용하여 비교, 평가하고 계산결과를 면밀히 검토하며, 중수로 핵설계 기술의 기초자료를 정확히 인지해야 할 필요가 있다.

이에 WIMS-AECL 코드를 이용한 격자계산결과를 비교평가하고자 한다.

2. 중수로 노심 핵설계 계산 체계

2.1. POWDERPUFS-V

POWDERPUFS-V[3] 코드는 거의 모든 중수로의 노심격자 상수를 계산하기 위하여 사용되는 코드이며, ZEEP와 ZED-2 연구로에서 천연우라늄을 대상으로 실험자료를 보정하는 방법에 근거한 실험식코드이다. 중수로의 핵연료 채널 모사시 핵연료, 냉각재, 감속재를 원형 면적으로 계산하여 점모델로서 계산한다. 월성 1호기 핵설계보고서 또한 상기 코드를 사용하여 설계하였으며, 현재에도 월성 모든호기의 핵설계를 위하여 사용중에 있다.

2.2. WIMS-AECL

WIMS-AECL 코드는 영국에서 개발한 WIMS 코드를 개량한 것으로서 69그룹 WINFRITH 라이브러리와 89그룹 ENDF/B-V, VI 라이브러리를 사용할 수 있다. 또한 일반 격자상수 뿐 만 아니라 단일 격자구조의 반응율, 임계도, 중성자속 분포를 계산할 수 있다. 또한 핵연료 다발내의 중성자속 분포와 핵연료 봉이 배열된 각 원형 배열에 대한 출력밀도를 계산할 수 있다. 상기 코드는 현재 캐나다에서 수행중인 신형 중수로의 설

계를 위하여 사용하고 있으며, 향후 중수로용 핵설계를 위한 코드로 사용할 예정이다.

3. 핵설계 계산결과

3.1. 격자계산결과

3.1.1. 방출연소도에 따른 무한증배계수 변화

핵설계에 앞서 월성 1호기 핵연료 채널의 핵설계 자료를 표 1에 나타내었으며, 1호기의 자료를 비교 평가하기 위해 2,3,4호기의 자료 또한 같이 명시하였다.

그림 1.에서와 같이 방출연소도에 따른 무한증배계수를 계산하였다. WIMS-AECL 코드의 계산결과가 월성 1호기의 결과에 비하여 과소평가하는 경향을 보였다. 이에 대한 원인을 분석하기 위해 우선적으로 핵분열물질의 원자밀도수를 비교하였다. 그림 2.는 U-235의 원자밀도수를 나타내며, 그림 3.은 U-235에 대한 U-238의 비율을 연소도에 따라 나타낸 그림이다. WIMS-AECL의 계산결과에서 U-235는 월성 1호기의 결과에 비하여 천천히 연소가 되며 그에 따라 그림 4, 5, 6 에서 볼 수 있는 것처럼 PU-239, 240, 241의 원자밀도 수의 Buildup이 월성 1호기에 비하여 느린 것을 알 수 있다.

3.1.2. 감속재 온도변화에 따른 반응도 변화

월성 1호기 핵설계보고서 자료에는 반응도 계수계산을 네가지로 나누어 계산한다. 초기장전 핵연료(fresh clean fuel), Saturating fission product(SFP) fresh clean fuel, fresh clean fuel(with 9ppm, boron in moderator), 평형상태 핵연료(equilibrium fuel) 이다. 상기 네가지의 계산중에 초기장전 핵연료와 평형상태 핵연료에 대하여만 계산을 수행하였다.

감속재의 온도변화시 감속재 온도와 밀도를 동시에 고려하는데 감속재 온도는 셀의 중성자 스펙트럼에 영향을 끼치므로 핵분열 물질의 흡수단면적과 핵분열 단면적에 영향을 주며, 감속재 밀도는 감속재의 확산계수, 감속면적, 공명이탈확률에 영향을 준다. 감속재온도는 20℃부터 10℃ 증가하여 90℃까지 계산을 수행하였으며, 그에 따른 감속재 밀도 또한 동일하게 변화시켜 계산을 수행하였으며, 정상상태 무한증배계수를 기준으로 반응도 변화를 살펴보았다. 그림 7.과 표 2.에서와같이 초기장전 핵연료의 경우 동일하게 감속재 온도계수가 부(-)의 반응도계수값을 나타내고, 평형상태 핵연료의 경우 정(+)의 반응도계수값을 나타내었으나, WIMS-AECL의 결과가 월성 1호기의 결과에 비하여 과대평가 하는 경향을 보였으며, 평형상태로 갈수록 그 차이는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이는 앞서 제시한 것처럼 초기장전 후 연소도에 따라 발생하는 핵분열 물질(PU239, PU241)의

차이에 기인한다.

3.1.3. 냉각재 온도변화에 따른 반응도 변화

냉각재의 온도변화시 감속재 온도반응도변화와 마찬가지로 온도와 밀도를 동시에 고려하는데 냉각재 온도의 변화는 냉각재의 밀도와 중성자 스펙트럼에 영향을 준다. 냉각재 온도는 20°C부터 20°C증가하여 350°C까지 계산을 수행하였으며, 정상상태 무한증배계수를 기준으로 반응도 변화를 살펴보았다. 계산결과 그림 8.과 표 3.에서처럼 두 핵연료 상태에 대하여 같은 경향을 보였으나, 감속재 온도변화와는 달리 WIMS-AECL의 결과가 월성 1호기의 결과에 비하여 과소평가 하는 경향을 보였으며, 평형상태로 갈수록 그 차이는 더욱 커짐을 알 수 있다. 또한 뒤에서 논의 되겠지만 순수한 밀도변화에 따른 반응도 변화는 정(+)의 반응도효과를 가진다. 이에 초기장전핵연료의 경우 중성자 스펙트럼에 의한 반응도 변화는 (-)의 반응도효과를 가진다고 볼 수 있다.

3.1.4. 핵연료 온도변화에 따른 반응도 변화

핵연료 온도변화에 따른 반응도변화의 원인은 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 핵연료 온도가 증가하면서 Doppler broadening에 의한 U-238의 공명흡수영역의 증가를 야기하고, 이에 공명이탈확률을 감소시키는 것과 열중성자 재생계수의 변화를 가져오는 중성자 스펙트럼의 변화이다. WIMS-AECL의 계산결과는 그림 9.와 표 4.에서와 같이 초기장전 핵연료의 경우 거의 유사한 값을 나타내는데 평형상태 핵연료로 진행되면서 그 차이가 커진다. 마찬가지로 핵연료 연소에 따른 핵분열생성물의 원자밀도 변화차이가 그원인이라고 할 수 있다.

3.1.5. 냉각재 기포변화에 따른 반응도 변화

1차 냉각재계통의 파단사고나 고장시 핵연료 채널의 냉각재에 기포가 발생함으로써 순간적으로 반응도가 변화를 일으킨다. 이에 따라 full void부터 partial void까지 반응도 변화를 계산하여 비교하였다. 그림 10.과 표 5.에서와 같이 냉각재 온도에 따른 반응도 변화와 마찬가지로 정(+)의 반응도 변화를 보이며, 기포발생시 반응도가 급격히 증가하며, full voiding의 경우 가장 큰 값을 나타내었다. WIMS-AECL의 결과는 과소평가하는 경향을 보였으며, 연소가 진행됨에 따라 차이는 줄어들었다. 이 또한 핵연료 연소에 따른 핵분열생성물의 원자밀도 변화차이가 그원인이라고 할 수 있다.

4. 결과 및 향후계획

이상 핵설계 시 우선적으로 고려해야하는 연소도에 따른 무한증배계수의 변화와 감속재, 냉각재, 핵연료온도변화에 따른 반응도변화를 비교하였다. 모든 차이는 연소가 진행됨에 따른 원자밀도수의 차이에 기인하는 것이며, 이는 실험식에 근거한 POWDERPUFS-V코드와 수송이론에 입각한 WIMS-AECL 코드의 차이 때문이다. 이에 근본원인인 원자밀도수 차이의 원인을 찾아내고, 향후 사용하게될 코드인 WIMS-AECL코드의 정확성을 평가하여야 한다.

참고 문헌

1. Design Manual DM 59-01100 : CANDU 600 Generating Station Physics Design Manual, AECL, 1980.
2. J. Grififiths, " WIMS-AECL Users Manual", RC-1176 COG-94-52, AECL, 1994.
3. E.S.Y. Tin and P.C. Loken, "POWDERPUFS-V Physics Manual", TDAI-31 part 1, AECL, 1979.

표 1. 월성 1호기 핵설계 기본자료

	Wolsong-1	Wolsong-2/3/4
UO ₂ Density(g/cm ³)	10.449747	10.6
냉각재 온도 (°C)	290	288
냉각재 밀도 (g/cm ³)	0.804055	0.807859
냉각재 순도 (a/o)	99.722	99.0
감속재 온도 (°C)	68	69
감속재 밀도 (g/cm ³)	1.085575	1.085089
감속재 순도 (wt%)	99.722	99.833
총 핵분열 출력 (MW)	2180	2158.5

표 2. 감속재 온도변화에 따른 반응도 변화

Temp.(°C)	WIMS-ACEL		Wolsong-1	
	Fresh Clean	Equilibrium	Fresh Clean	Equilibrium
20	1.55	-3.47	0.97	-5.49
30	1.36	-2.64	0.86	-4.31
40	1.09	-1.87	0.71	-3.15
50	0.74	-1.18	0.50	-2.01
60	0.35	-0.51	0.24	-0.88
68	0.00	0.00	0.00	0.00
70	-0.09	0.12	-0.07	0.22
80	-0.59	0.74	-0.43	1.30
90	-1.15	1.41	-0.84	2.34

표 3. 냉각재 온도변화에 따른 반응도 변화

Temp.(°C)	WIMS-ACEL		Wolsong-1	
	Fresh Clean	Equilibrium	Fresh Clean	Equilibrium
20	-2.07	-10.31	0.51	-8.68
40	-2.34	-10.01	0.16	-8.33
60	-2.53	-9.61	-0.14	-7.90
80	-2.65	-9.14	-0.39	-7.40
100	-2.71	-8.55	-0.60	-6.86
120	-2.71	-7.93	-0.78	-6.28
140	-2.71	-7.21	-0.91	-5.66
160	-2.67	-6.44	-1.00	-5.00
180	-2.56	-5.62	-1.04	-4.32
200	-2.40	-4.73	-1.03	-3.61
220	-2.16	-3.80	-0.96	-2.86
240	-1.47	-2.79	-0.81	-2.09
260	-0.98	-1.72	-0.57	-1.28
280	-0.36	-0.59	-0.22	-0.44
290	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.46	0.61	0.26	0.45
320	1.39	1.90	0.95	1.40
350	3.60	4.27	2.65	3.08

표 4. 핵연료 온도변화에 따른 반응도 변화

Temp.(°C)	WIMS-ACEL		Wolsong-1	
	Fresh Clean	Equilibrium	Fresh Clean	Equilibrium
1200	-3.11	0.64	-3.76	-0.98
1100	-1.95	0.37	-2.37	-0.65
1000	-0.77	0.13	-0.94	-0.27
936	0.00	0.00	0.00	0.00
900	0.44	-0.06	0.53	0.17
800	1.70	-0.21	2.04	0.67
700	3.01	-0.31	3.60	1.25
600	4.38	-0.36	5.21	1.90
500	5.83	-0.37	6.88	2.66
400	7.38	-0.27	8.63	3.52
300	9.28	0.14	10.45	4.49
200	11.34	0.64	12.38	5.60
100	13.50	1.33	14.45	6.92
20	15.28	2.07	16.23	8.16

표 5. 냉각재 기포변화에 따른 반응도 변화

Density(g/cc)	WIMS-ACEL		Wolsong-1	
	Fresh Clean	Equilibrium	Fresh Clean	Equilibrium
0.0001	23.54	12.57	19.08	11.98
0.1	20.17	11.17	16.23	10.15
0.3	14.08	7.72	11.02	6.87
0.5	8.32	4.48	6.33	3.95
0.7	2.88	1.42	2.07	1.29
0.804055	0.00	0.00	0.00	0.00
0.9	-2.37	-1.62	-1.83	-1.15
1	-5.15	-2.78	-3.66	-2.30
1.2	-10.18	-5.67	-7.11	-4.48

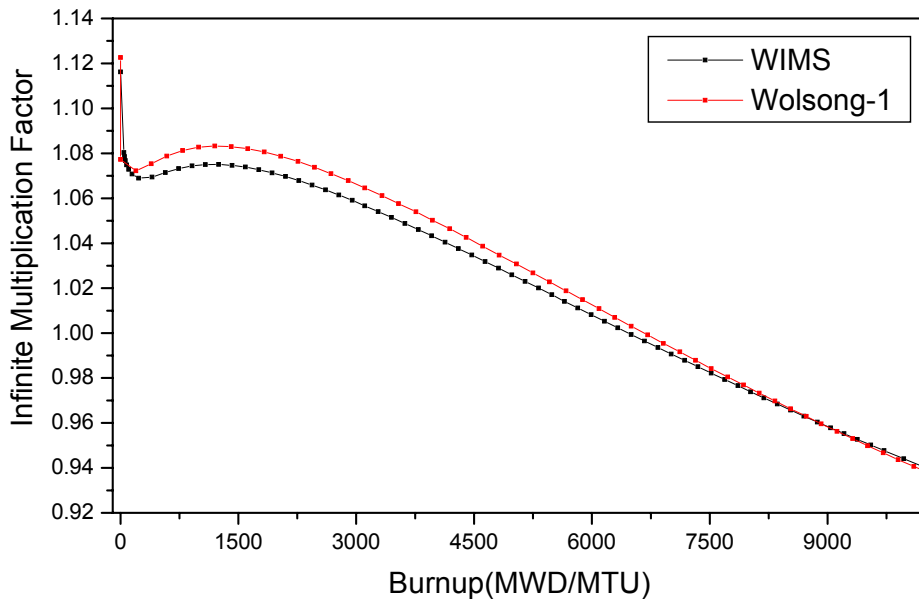


그림 1. 방출연소도에 따른 무한증배계수변화

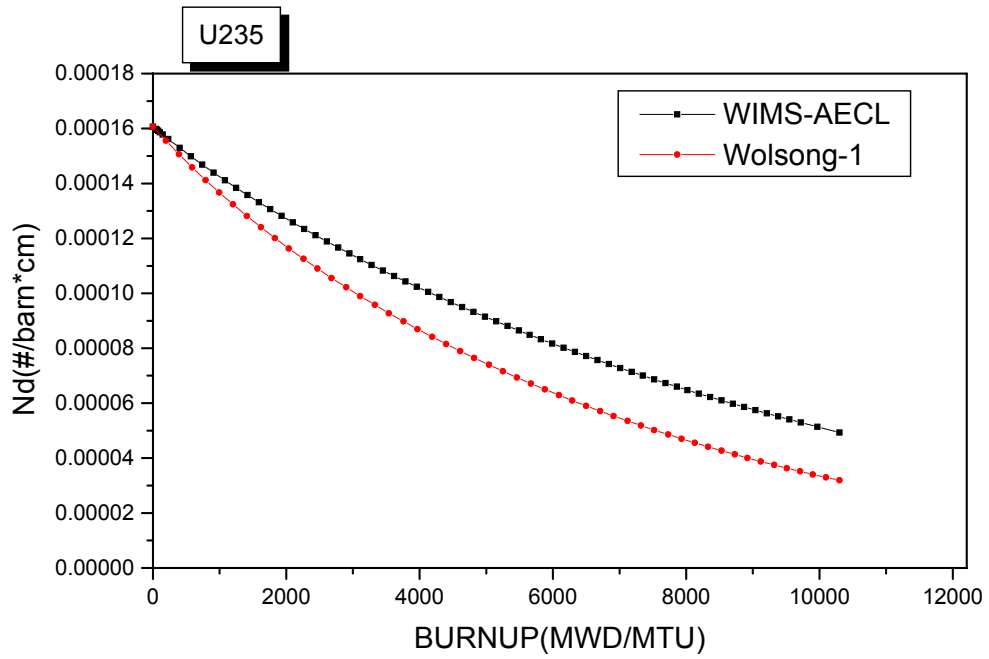


그림 2. 연소도에 따른 U-235 원자밀도수의 변화

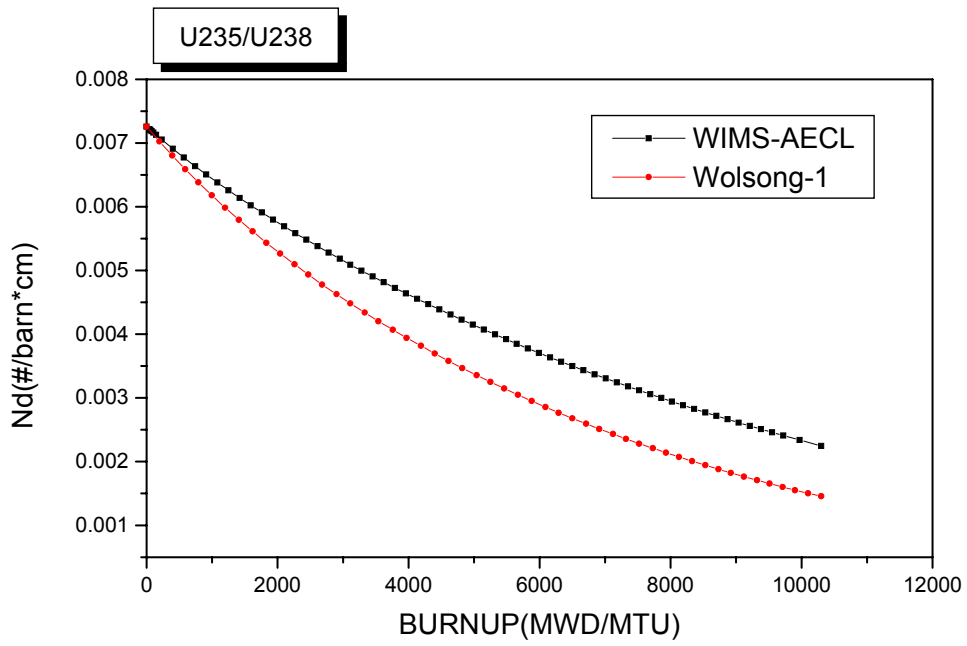


그림 3. 연소도에 따른 U-235/U-238의 변화

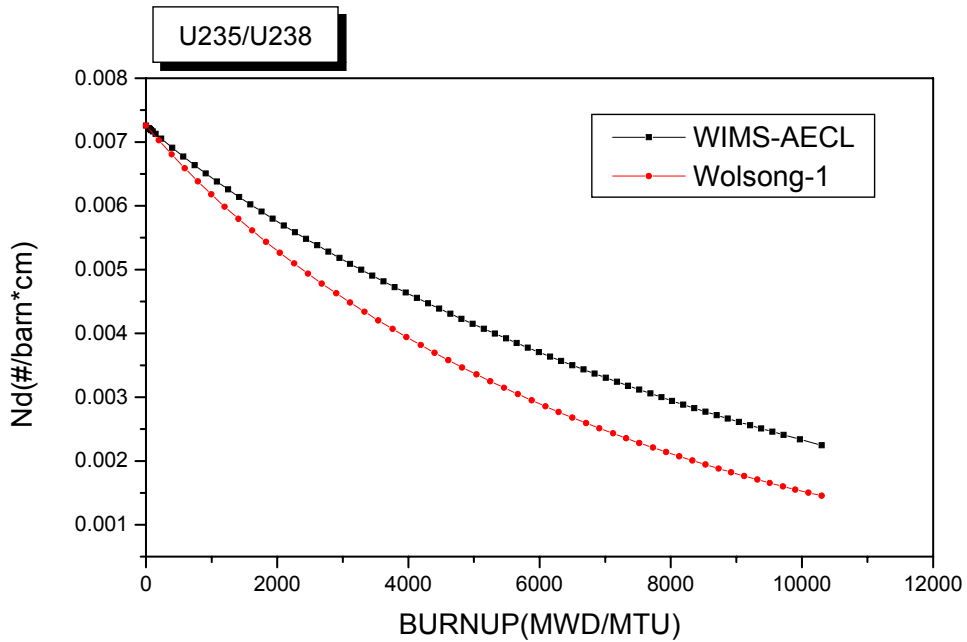


그림 4. 연소도에 따른 U-235/U-238의 변화

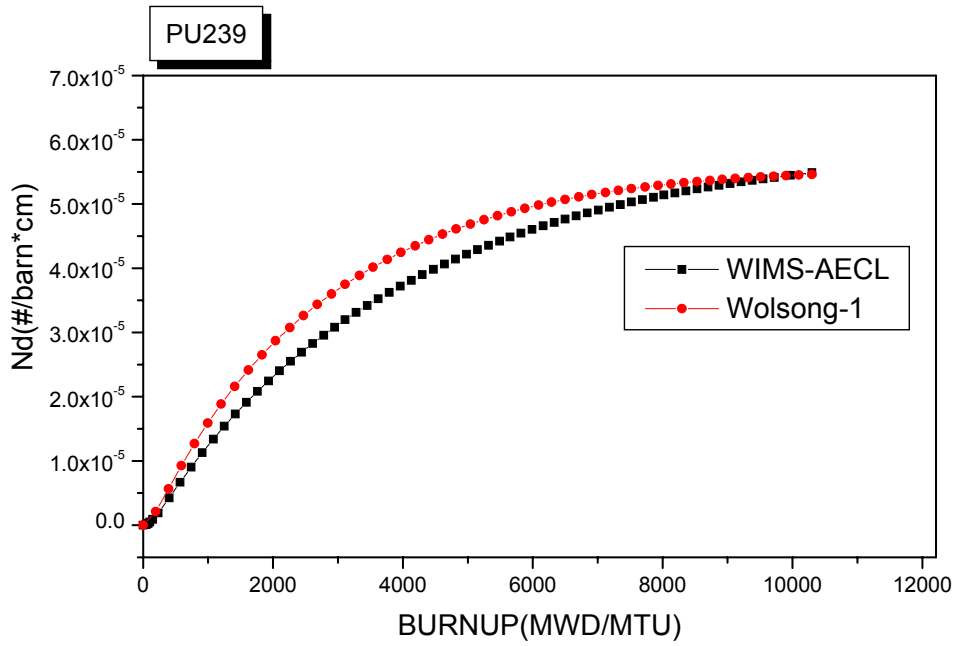


그림 5. 연소도에 따른 Pu-239 원자밀도수의 변화

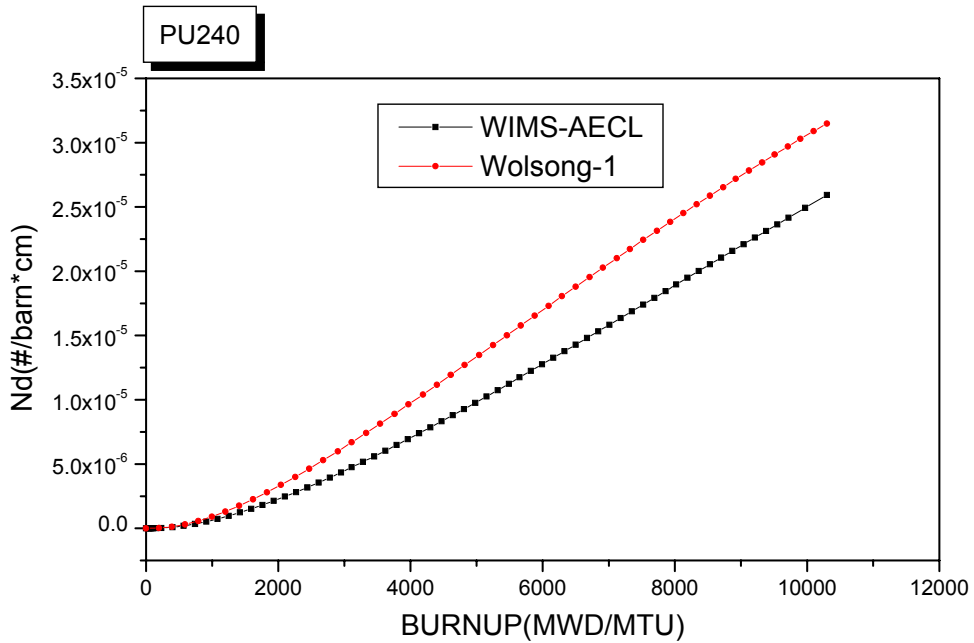


그림 6. 연소도에 따른 Pu-240 원자밀도수의 변화

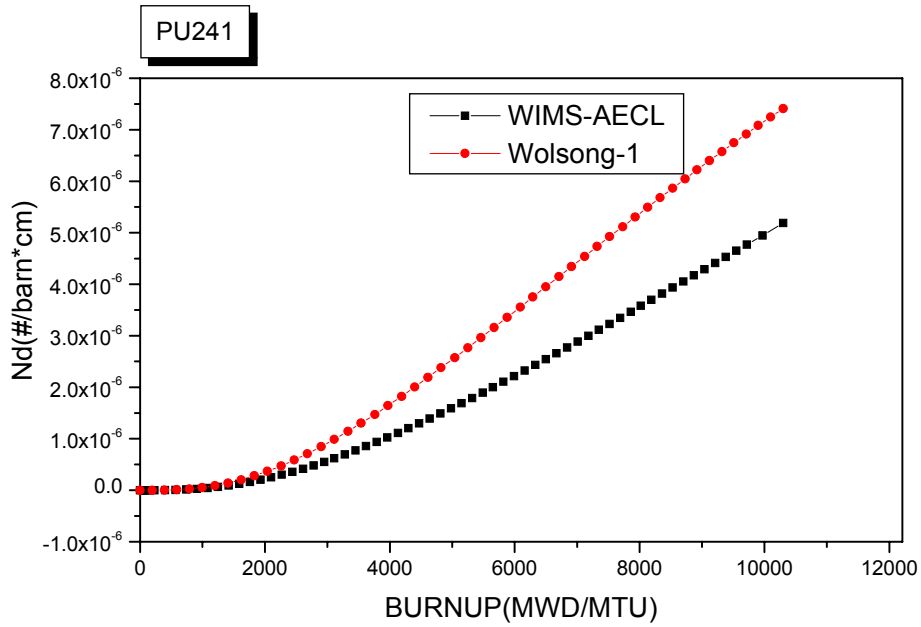


그림 7. 연소도에 따른 Pu-241 원자밀도수의 변화

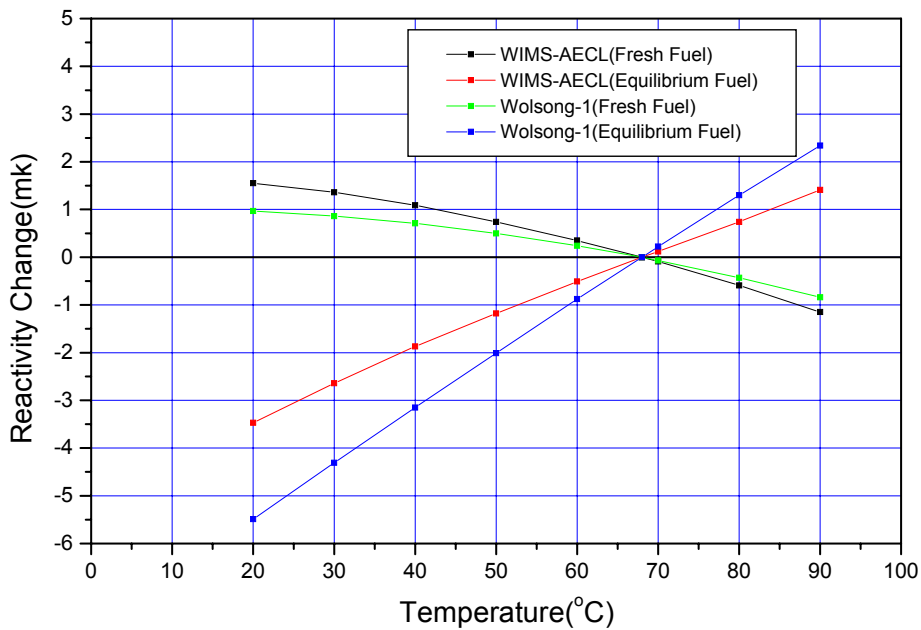


그림 8. 감속재 온도변화에 따른 반응도 변화

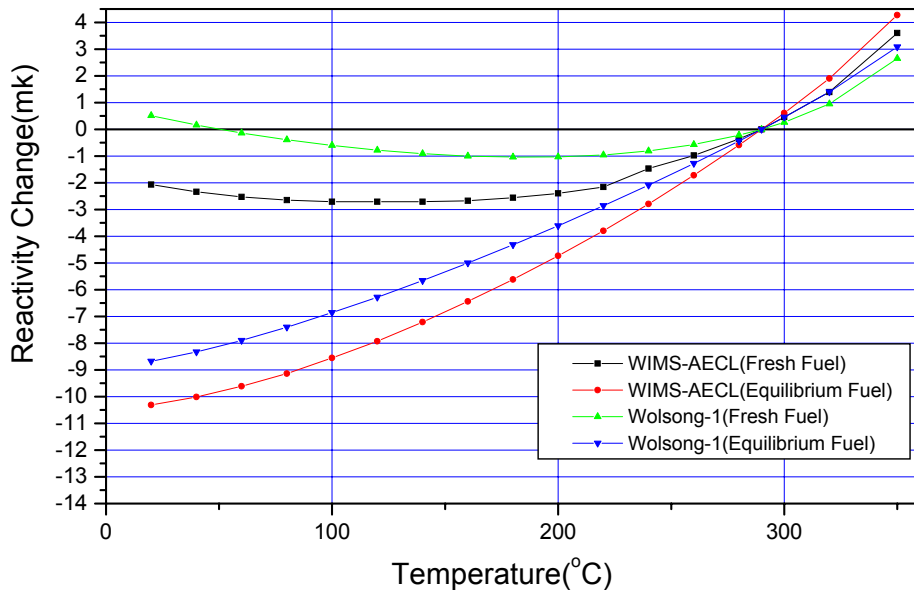


그림 9. 냉각재 온도변화에 따른 반응도 변화

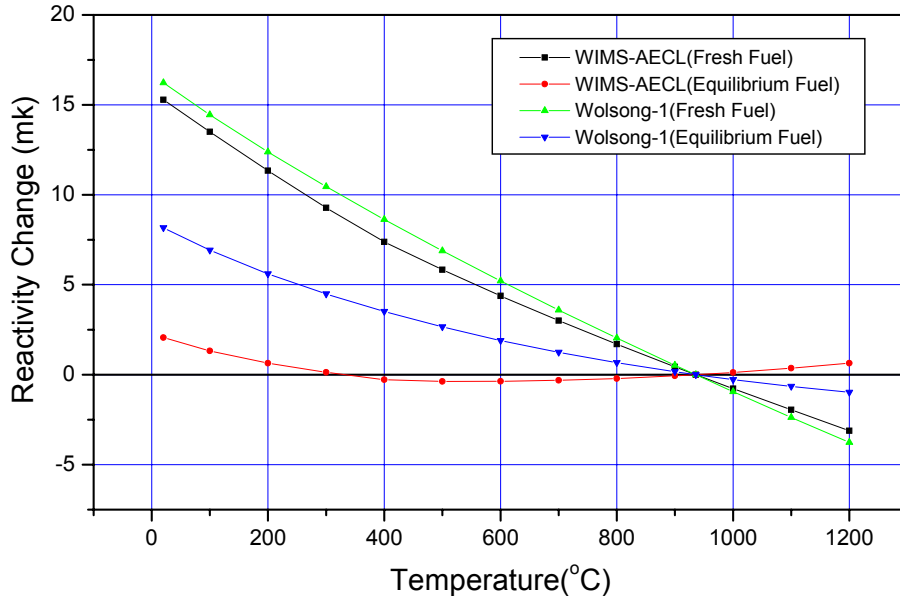


그림 10. 핵연료 온도변화에 따른 반응도 변화

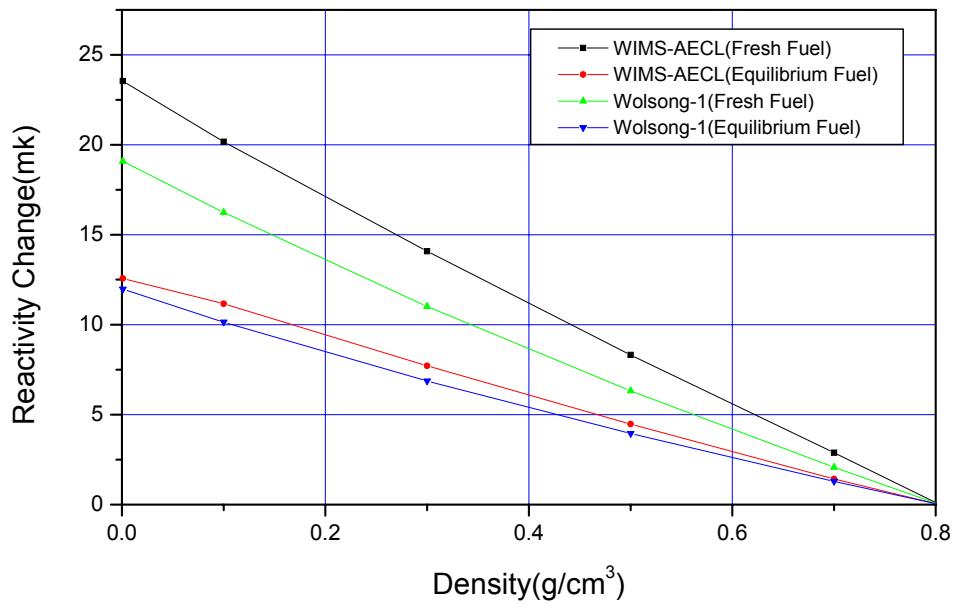


그림 11. 냉각재 기포변화에 따른 반응도 변화