'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성 4호기 노물리 시험자료를 이용한 WIMS/(MULTICELL)/RFSP 코드 시스템의 계산성능 검증

Benchmark Calculations of WIMS/(MULTICELL)/RFSP Code Using Phase-B Physics Test at Wolsong Unit 4.

류 석진, 민 병주, 석 호천
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문은 WIMS-AECL/(MULTICELL)/RFSP 코드 시스템을 이용한 WIMS-AECL 코드의 계산성능 검증을 월성 4호기의 시운전 자료를 대상으로 수행한 결과를 기술하고 있다. 본 검증 계산은 임계 보론 농도, 보론 반응도가, AVZL(Average Zone Level) 반응도가, 제어 기구들의 반응도가, 냉각재·감속재 계통의 온도 반응도 계수 및 중성자속 분포 측정에 대하여 실시하였다. 그 결과 AVZL 반응도가는 월성 2, 3호기의 검증 계산 결과보다 낮았다. 낮은 수치를 보인 AVZL 반응도가는 제어장치의 반응도가 측정에 전체적인 영향을 미친다. 따라서 조절봉과 조절봉 군을 제외한 제어기구들의 반응도 및 냉각재의 온도 반응도 계수는 월성 4호기가 월성 2, 3호기 검증계산 결과에 비해 낮은 값을 보였다. 특히 감속재 온도 반응도 계수의 측정 결과는 본 계산결과에 비해 모든 감속재 온도 변화 영역에서 측정치와 비교적 큰 차이를 보였다. 이는 보론 농도를 변화시킴에 따라 차이를 줄일 수가 있다.

ABSTRACT

The validation of the WIMS-AECL lattice code were performed with the results of the Phase-B physics test at Wolsong unit 4 in order to use a physics design code of CANDU reactor. The calculations were carried out for critical boron concentration, boron worth, calibration of liquid zone level, reactivity worths of various control devices, heat transport temperature reactivity coefficient and moderator temperature reactivity coefficient, and flux scan. Reactivity of AVZL(Average Zone Level) of Wolsong unit 4 has relatively small value compared with those of Wolsong units 2 and 3. All reactivity worths of reactor control

devices of Wolsong unit 4 were estimated to be relatively lower values compared with those of Wolsong units 2 and 3. Since reactivity of AVZL affects all reactor control devices worths, the discrepancy between measured and calculated values of the moderator temperature reactivity coefficients is especially large for all temperature range. But the discrepancy of the moderator temperature reactivity coefficients could be reduced by the adjustment of boron concentration. To elaborate the causes for these differences, further studies need to be made.

1. 서 론

천연 우라늄 핵연료를 사용하는 CANDU형 원자로의 노물리 설계 및 해석을 위한 주 격자코드로 POWDERPUFS-V(PPV)[1]가 사용되고 있다. 이 코드는 천연우라늄 핵연료에 대한 실험식을 근거로 설계된 코드이기 때문에 고연소도가 목적인 저농축 또는 순환 우라늄 핵연료의 격자상수 계산에는 이용될 수 없다. 따라서 AECL과 KAERI 연구자들은 개량형 저농축 또는 순환 우라늄 CANDU 핵연료의 개발을 위하여 다중그룹 중성자 수송코드인 WIMS-AECL의 사용을 제안하였다. 따라서 WIMS-AECL 코드[2]를 CANDU형 원자로의 노심 설계를 위한 격자코드로 사용하기 위해서는 검증이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 월성 4호기 시운전 자료를 이용한 검증 계산을 통하여 WIMS-AECL 코드의 계산 성능을 평가하고 이미 수행된 월성 2, 3호기[3]검증 계산과 비교하였다.

2. WIMS-AECL/(MULTICELL)/RFSP 계산 체계

먼저 격자상수를 계산하기 위해 WIMS-AECL 코드를 사용하였다. WIMS-AECL은 다군 중성자수송코드이며 89그룹 ENDF/B-V라이브러리를 사용하였다. 본 계산에서의 중성자 그룹 수는 계산시간 및 정확성을 고려하여 ENDF/B-V의 89그룹 중에서 33그룹을 선택하였다. 또한 노심 내에 핵연료와 수직으로 분포되어 있는 각종 반응제어기구들(Adjuster Rods, MCA(Mechanical Control Absorbers), SOR(Shutoff Rods))에 대한 증분격자상수들의 계산을 위해 3차원 SUPERCELL 모델이 가능한 MULTICELL 코드[4]를 사용하였고, 실제 노심모사를 위해서는 CANDU 원자로에서 각종 노심 계산에 이용되는 3차원 유한 차분법 코드인 RFSP 코드[1]를 사용하였다. 앞으로 WIMS-AECL/(MULTICELL)/RFSP코드 체계는 WIMS- AECL/RFSP코드 체계와 동일하게 사용한다.

3. 월성 4호기 노물리 시험자료를 이용한 노심 모사

CANDU 원자로에서 Phase-B 시험은 초기 임계 접근과 노물리 설계를 확인하기 위한 저출력 운전 그리고 제어 및 방호 계통의 수행능력을 평가하는 단계로서 0.1% FP[5][6]에서 수행된다. 월성 4호기 임계 운전조건은 표 1과 같으며 Phase-B 노물리 시험 절차[6]는 다음과 같다.

- 최초 임계 접근
- 보론의 반응도가 측정
- 액체영역제어계통의 반응도가 측정
- 제어 기구들(조절봉, 흡수봉, 정지봉 및 조절봉 군, 정지봉 군)의 반응도가 측정
- 냉각재 계통의 온도 반응도가 측정
- 감속재 계통의 온도 반응도가 측정
- 중성자속 분포 측정

최초 임계 접근에 대한 임계 보론 농도 계산시 출력의 폭주를 방지하기 위해 MCA를 50 % 정도 삽입하여 수행하는데, MCA 위치[6]나 MCA의 삽입 기준에 따라 그 값은 약간의 차이를 보인다. 본 연구에서는 MCA의 100% 삽입 기준을 MCA 중심부와 Calandria 중심부가 일치 할 때인 657.185cm로 하였다. 또한 50% 삽입시는 MCA 하단부가 Calandria 중심에 위치하여야 하나 MCA 하단부가 Calandria 중심에 오지 않고 그림 1에서 보는 바와 같이 55% 삽입시 MCA 하단부가 Calandria 중심에 오게 된다. 그러므로 운전조건에서 44.55%의 MCA 삽입에 대해서는 표 2에 나타난 바와 같이 5%가 보정된 49.55%(325.6352cm)를 사용하였다.

또한 액체영역 제어계통 반응도가의 경우 액체영역 수위변화에 따른 반응도가는 선형적이지 않기 때문에 3rd order polynomial fitting function으로 근사한 후 이 function을 통하여 AVZL 변화에 대한 반응도 변화를 역산하였고, 그 방법을 사용하면 다음 식(1)과 같다.

$$\rho(z) = A z^3 + B z^2 + C z + D \qquad (1)$$

여기에서 z는 액체영역 평균수위이고, ρ는 액체영역수위에 해당되는 반응도, 그리고 A, B, C, D는 fitting coefficients 이다. 따라서, AVZL z_1과 z_2 변화에 따른 반응도 변화는 아래와 같은 식(2)가 되며, 측정값 AVZL에 대한 반응도를 3rd order polynomial fitting function과 근사하여 얻어진 계수는 그림 2와 같다.

$$\Delta\rho(z_1, z_2) = A(z_1^3 - z_2^3) + B(z_1^2 - z_2^2) + C(z_1 - z_2) \qquad (2)$$

4. 결과 및 논의

액체영역 제어계통의 반응도가는 보론 반응도가에 의존하는 값이고 원자로에서 실험적으로 얻을 수 있는 모든 자료는 액체영역 평균수위의 변화로써 관측되는 값임을 감안할 때 보론 반응도가와 그에 의존하는 액체영역 제어계통의 반응도가를 계산하는 것은 매우 중요하다. 표 3과 그림 3에서는 액체영역 평균수위 45%에 대하여 보론농도 6ppm 11ppm 사이의 반응도 변화를 통한 보론 반응도가를 보여주고, 최초 임계에 도달시 보론농도를 나타내었다. 월성 4호기의 경우

WIMS-AECL/RFSP의 보론 반응도가는 8.2066mk/ppm으로 월성에서 계산한 PPV/RFSP의 반응도가 8.2880mk/ppm[6]과 잘 일치하였다. 그러나 월성 4호기의 임계보론농도는 측정치보다 약 0.9ppm 정도 적으며 월성 2, 3호기의 계산결과와는 큰 차이를 보인다.

액체영역 제어계통의 반응도가는 WIMS-AECL/RFSP 계산에서의 배치당 보론농도를 측정치의 반응도가로 적용하여 액체영역 제어계통에 대한 계산을 수행하였으며 결과는 표 4에 나타내었다. WIMS-AECL/RFSP 코드로 계산한 AVZL 예측 반응도가는 월성 2, 3, 4호기 모두 비슷한 값을 보였으나, AVZL 반응도가의 측정치는 월성 2, 3호기보다 낮은 값으로 반응도에 따른 수위변화가 덜 민감하였다. 이 경향은 각 제어기구 및 냉각재·감속재의 수위변화에 따른 반응도가 계산에까지 영향을 미친다.

제어장치의 반응도가를 표 5 표 9에 정리하였다. 조절봉과 조절봉군을 제외한 나머지 제어장치의 반응도가는 낮은 AVZL 반응도가의 영향으로 계산치에 비해 측정값이 다소 낮다. 조절봉의 경우 월성 2, 3호기의 전 반응도가(total reactivity worth) 오차는 각각 3.09% -6.34%로 월성 4호기의 전반응도가인 오차 2.44% 보다 크며, 조절봉군에서는 월성 2, 3, 4호기의 반응도가 오차는 각각 -0.81%, -5.93%, 4.14%로 월성 3호기에서의 오차가 가장 크다. 흡수봉과 흡수봉군 및 정지봉의 경우 반응도가 오차는 월성 4호기가 월성 2, 3호기보다 약 10% 더 크게 나타났다.

냉각재·감속재 계통의 온도 변화에 따른 반응도 변화를 각각 표 10과 표 11에 나타내었다. 냉각재 온도반응도 계수 측정은 감속재의 온도를 약 35℃ 로 유지시키고, 냉각재 온도는 35℃ 260℃까지 약 15℃씩 증가시켜 임계상태의 액체영역 평균수위를 측정하였다. 냉각재의 온도가 높아짐에 따라 액체영역의 평균수위가 하강하는데 평균수위가 일정 수준 이하로 낮아지면 정확한 측정이 어려워 수위를 인위적으로 상승시켜 다시 측정을 시작한다. 낮아진 수위를 높여 주기 위해서는 조절봉 및 조절봉군을 인출하여 노심 반응도를 높여주는 방법이 있다. 따라서, 조절봉 또는 조절봉군을 이용하여 노심 반응도를 제어할 수 있는 온도영역에서는 수위의 인위적 상승 직후 정확한 냉각재 및 감속재 온도와 액체영역의 수위를 측정하여야한다. 즉, 수위 상승 전의 상태에서 반응도를 산출한 후 수위의 인위적 상승 직후의 반응도를 산출하면 수위 상승 전·후의 반응도 차이를 통하여 냉각재 온도 반응도 계수를 얻을 수 있다. 그러나 인위적 수위 상승 구간이 있었던 95℃ 110℃, 155℃ 170℃, 185℃ 200℃ 영역에서는 수위상승 전의 값을 알 수 없으므로 정확한 반응도를 구하기 힘들었다. 본 연구에서는 그 온도 영역에 대하여 PPV/RFSP의 AVZL 반응도가로 인위적 수위 상승전의 수위를 추정해서 반응도를 구했다. 또한 65℃에서 측정치의 반응도가 낮게 나오는 이유는 그 온도 구간에서 변화되는 수위 변화가 작게 일어났기 때문으로 예측된다. 감속재 온도 반응도 계수는 모든 감속재 온도 영역에서 60% 내·외의 큰 차이를 보인다. 그리고 보론 농도를 증가시키면 감속재 온도 반응도 계수도 증가한다. 따라서 감속재 온도 반응도계수의 측정시 보론 농도에 대한 정확한 시험 조건이 필요하다.

마지막으로 수평 및 수직 중성자속 분포는 다음의 5가지 경우에 대해서 각각 측정했고 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

- Case # 1 : Nominal case,
- Case # 2 : MCA bank # 1 50% inserted with adjusters,
- Case # 3 : MCA all inserted with adjusters,
- Case # 4 : Without adjuster bank # 1, 2, 3, and 4,
- Case # 5 : Without all adjusters.

모사를 수행하는 동안 액체영역 수위는 40%로 고정하였으며, RFSP 코드내의 INTREP 모듈을 이용하였다. 그림 4와 그림 5에서 보는 바와 같이 수평 및 수직 중성자속 분포는 측정치와 잘 일치한다.

4. 결론

WIMS-AECL/(MULTICELL)/RFSP 코드 시스템을 이용한 WIMS-AECL 코드의 계산 성능 검증을 월성 4호기 노물리 시험자료를 이용하여 수행하였다. WIMS-AECL/RFSP 결과 제어기구의 반응도가 및 온도 반응도 계수 측정에 기준이 되는 액체영역 제어장치의 반응도가는 월성 4호기 노물리 시험 검증계산 결과가 월성 2. 3호기의 노물리 시험 검증계산 결과와 비교하여 볼 때 상대적으로 큰 차이를 보였다. 낮은 액체영역 제어장치의 반응도가는 모든 노심 모사과정에 영향을 미치므로 조절봉과 조절봉군을 제외한 제어기구들 및 냉각재·감속재의 온도 반응도가의 측정치는 계산치보다 상대적으로 낮았다. 또한 감속재 온도 반응도 계수의 계산 결과는 약 60% 내·외의 큰 차이를 보였으나 월성 3호기의 경우, 보론 농도 변화에 따른 민감도계산 결과를 참고하면 월성 4호기에서도 보론 농도를 변화시킴으로써 측정치와 계산치와의 차이를 줄일 수 있다. 본 연구 및 앞서 수행된 월성 2, 3호기와의 검증계산 결과를 볼 때, 각 단계별 시험조건을 정확히 알 수 있다면 오차를 줄일 수 있다. 또한 정지봉이나 흡수봉과 같은 강한 흡수체의 노심 모사시 노심 격자구조의 최적화 연구를 수행하여야 하며, 감속재 내 보론의 정확한 측정 및 온도 변화에 따른 단면적 자료의 평가가 요구된다.

후기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

1. B. Rouben, “Overview of Curent RFSP-Code Capabilities for CANDU Core Analysis”, AECL Report, AECL-11402,1996
2. J.V. Donnelly, "WIMS-CRNL:A User's manual for the Chalk River Version of WIMS", AECL Report, AECL-8955, 1986

3. I.S. Hong, C.H. Kim, B.J. Min, H.C. Suk and B.G. Kim, “Validation of WIMS-AECL With ENDF/B-F Against Phase-B Reactor Physics Tests at Wolsong Units 2 and 3”, Proceedings of the 6th International Conference on CANDU Fuel, Vol 1, pp.40-51, September 26-30, Niagara, CANADA, 1999
4. A.R. Dustur and D.B. Buss, "MULTICELL - A 3-D Program of the Simulation of Reactivity Devices in CANDU Reactors", AECL Report, AECL-7544, 1983
5. **김승민**, “**월성 2호기 노심관리 시운전 시험** Physics Post Simulation”, **월성원자력발전소**, 1997.
6. **박상철**, “**월성 4호기 원자로 동특성 시험**”, **월성원자력발전소**, 1999.

표 1. 월성 4호기의 임계 운전조건

액체영역평균수위 % (AVZL)	15.75
MCA#4 (%) **삽입**	44.55
냉각재 온도(℃ /。K)	34.3625 / 307.5225
감속재 온도(℃ /。K)	34.03 / 307.19
냉각재 순도(a/% / w/%)	99.19 / 99.27
감속재 순도(a/% / w/%)	99.81 / 99.82897
임계 출력	10E-11 FP
임계 보론 농도 (ppm)	9.237

표 2. 기존 MCA 위치 및 삽입 기준에 따른 임계보론농도

MCA **위치** (cm)	MCA **기준**(100%) (cm)	**운전조건** MCA (cm)	**임계보론농도** (ppm)
MCA **위치** - LOWER Y(-561.50) - UPPER Y(-21.50)	657.185	292.7759 (44.55%)	8.3537
		325.6352 (49.55%)	8.3338
	670.215	298.5808 (44.55%)	8.3492
		332.0915 (49.55%)	8.3305
	540	240.57 (44.55%)	8.3867
		267.57 (49.55%)	8.3697
MCA **위치** - LOWER Y(-534.66) - UPPER Y(-20.31)	657.185	325.6352 (49.55%)	8.3350
	670.215	332.0915 (49.55%)	8.3306

표 3. 보론 반응도가와 임계보론농도의 비교

		월성 2호기	**월성 3호기**	**월성 4호기**
Boron Reactivity Worth (mk/ppm)	WIMS-AECL/RFSP	8.225	8.172	8.207
	PPV/RFSP	8.310	8.290	8.288
Critical Boron Concentration (ppm)	WIMS-AECL/RFSP	8.504	8.303	8.334
	Measurement	9.000	8.930	9.237
Critical Boron Concentration Error (%)		-5.51	-7.02	-9.8

※ Error = (WIMS-AECL/RFSP—Measurement)/Measurement×100

표 4. 액체영역 수위변화에 따른 반응도가의 비교

AVZL	월성 2호기			월성 3호기			월성 4호기		
	WIMS (mk/%)	Msm. (mk/%)	Error (%)	WIMS (mk/%)	Msm. (mk/%)	Error (%)	WIMS (mk/%)	Msm. (mk/%)	Error (%)
20% 60%	0.07872	0.07139	10.27	0.07764	0.07282	6.62	-	-	-
20% 70%	-	-	-	-	-	-	0.07604	0.06745	12.72
20% 80%	0.07252	0.06702	8.21	0.07323	0.06894	6.22	0.07313	0.06430	13.73

※ Msm = Measurement, WIMS = WIMS-AECL/RFSP, Error = (WIMS-Msm)/Msm×100

표 5. 조절봉의 개별 반응도가

Number	WIMS-AECL/RFSP (mk)			PPV/RFSP (mk)		
	계산치	**측정치**	**오차**(%)	**계산치**	**측정치**	**오차**(%)
ADJ #1	0.230	0.197	16.60	0.255	0.203	10.87
ADJ #2	0.564	0.516	9.34	0.579	0.532	8.83
ADJ #3	0.696	0.680	2.30	0.728	0.702	3.67
ADJ #4	0.356	0.376	-5.24	0.372	0.387	-3.90
ADJ #5	0.688	0.686	0.26	0.724	0.708	2.23
ADJ #6	0.558	0.552	1.03	0.580	0.569	1.85
ADJ #7	0.228	0.225	1.15	0.235	0.232	1.35
ADJ #8	0.266	0.236	12.91	0.266	0.242	9.75
ADJ #9	0.710	0.628	12.98	0.715	0.649	10.24
ADJ #10	0.908	0.844	7.52	0.942	0.872	8.03
ADJ #11	0.493	0.517	-4.70	0.429	0.534	-7.79
ADJ #12	0.910	0.874	4.09	0.929	0.902	2.95
ADJ #13	0.704	0.687	2.54	0.712	0.708	0.51
ADJ #14	0.263	0.260	1.11	0.261	0.268	-2.50
ADJ #15	0.226	0.203	11.31	0.230	0.209	10.12
ADJ #16	0.559	0.499	12.00	0.576	0.515	11.89
ADJ #17	0.688	0.662	3.92	0.723	0.683	5.79
ADJ #18	0.358	0.366	-2.26	0.367	0.378	-2.80
ADJ #19	0.691	0.684	0.98	0.724	0.706	2.49
ADJ #20	0.554	0.559	-0.87	0.581	0.576	0.79
ADJ #21	0.226	0.224	0.82	0.230	0.231	-0.28
Total	10.733	10.478	2.44	11.191	10.807	3.55

※ **액체영역평균수위** : 40% AVZL

※ **오차**(%) = (**계산치**-**측정치**)/**측정치**×100

표 6. 조절봉군의 반응도가

Number	WIMS-AECL/RFSP (mk)			PPV/RFSP (mk)		
	계산치	**측정치**	**오차(%)**	**계산치**	**측정치**	**오차(%)**
ADJ_B #1	1.368	1.316	3.97	1.380	1.354	1.89
ADJ_B #2	1.408	1.379	2.08	1.460	1.420	2.81
ADJ_B #3	1.412	1.389	1.64	1.466	1.431	2.48
ADJ_B #4	1.977	1.788	10.55	1.952	1.922	1.56
ADJ_B #5	1.345	1.301	3.37	1.405	1.341	4.74
ADJ_B #6	1.345	1.334	0.80	1.403	1.375	2.00
ADJ_B #7	1.879	1.799	4.42	1.896	1.849	2.58
Total	10.734	10.307	4.14	10.962	10.692	2.52

※ **액체영역평균수위** : 50% AVZL

표 7. 흡수봉의 개별 반응도가

Number	WIMS-AECL/RFSP (mk)			PPV/RFSP (mk)		
	계산치	**측정치**	**오차(%)**	**계산치**	**측정치**	**오차(%)**
MCA #1	2.124	1.744	21.80	2.081	1.792	16.15
MCA #2	2.112	1.871	12.87	2.068	1.921	7.65
MCA #3	2.122	1.712	23.92	2.079	1.759	18.21
MCA #4	2.107	1.863	13.12	2.069	1.912	8.19
Total	8.465	7.190	17.74	8.297	7.384	12.37

표 8. 흡수봉군의 반응도가

Number	WIMS-AECL/RFSP (mk)			PPV/RFSP (mk)		
	계산치	**측정치**	**오차(%)**	**계산치**	**측정치**	**오차(%)**
MCA_B #1	5.741	4.613	24.46	5.387	4.694	14.76
MCA_B #2	5.746	4.506	27.51	5.391	4.594	17.35
Total	11.487	9.119	25.97	10.778	9.288	16.04

표 9. 정지봉의 개별 반응도가

Number	WIMS-AECL/RFSP (mk)			PPV/RFSP (mk)		
	계산치	측정치	오차(%)	계산치	측정치	오차(%)
SOR #1	1.301	1.143	13.79	1.289	1.174	9.77
SOR #2	1.620	1.485	9.07	1.638	1.527	7.27
SOR #3	1.617	1.486	8.83	1.637	1.528	7.15
SOR #4	1.297	1.202	7.92	1.284	1.235	3.95
SOR #5	1.009	0.827	22.05	1.045	0.844	23.82
SOR #6	2.208	1.788	23.49	2.167	1.837	17.97
SOR #7	2.200	1.807	21.74	2.162	1.857	16.40
SOR #8	0.998	0.884	12.89	1.052	0.906	16.10
SOR #9	1.565	1.133	38.07	1.497	1.164	28.64
SOR #10	2.546	2.080	22.41	2.497	2.134	17.00
SOR #11	2.613	2.223	17.56	2.570	2.278	12.82
SOR #12	2.531	2.209	14.60	2.488	2.264	9.90
SOR #13	1.550	1.303	18.99	1.483	1.338	10.82
SOR #14	1.534	1.182	29.78	1.479	1.214	21.87
SOR #15	1.521	1.342	13.33	1.464	1.379	6.16
SOR #16	1.567	1.135	38.02	1.502	1.166	28.81
SOR #17	2.543	2.057	23.65	2.495	2.111	18.21
SOR #18	2.606	2.218	17.48	2.570	2.274	13.04
SOR #19	2.529	2.189	15.53	2.491	2.244	11.00
SOR #20	1.550	1.286	20.54	1.482	1.321	12.20
SOR #21	1.006	0.796	26.35	1.050	0.814	28.97
SOR #22	2.204	1.686	30.73	2.168	1.732	25.15
SOR #23	2.195	1.773	23.81	2.161	1.821	18.65
SOR #24	0.996	0.871	14.37	1.054	0.891	18.25
SOR #25	1.301	1.130	15.13	1.294	1.160	11.55
SOR #26	1.609	1.431	12.47	1.640	1.470	11.56
SOR #27	1.611	1.472	9.41	1.635	1.512	8.130
SOR #28	1.287	1.200	7.22	1.289	1.231	4.75
Total	49.114	41.338	18.81	48.583	42.426	14.51

표 10. 냉각재 계통 온도변화에 따른 반응도 변화

HT. Temp	WIMS-AECL/RFSP (mk)			PPV/RFSP (mk)		
	계산치	측정치	오차(%)	계산치	측정치	오차(%)
35 (35.06)*	-	-	-	-	-	-
50 (50.01)	-0.866	-1.081	-19.92	-0.913	-1.084	-15.74
65 (65.09)	-0.805	-0.524	53.52	-0.862	-0.552	56.20
80 (79.98)	-0.798	-0.669	19.27	-0.856	-0.648	32.16
95 (95.03)	-0.763	-0.867	-11.96	-0.803	-0.816	-1.64
110 (110.01)	-0.673	-0.561	20.01	-0.796	-0.597	33.43
125 (124.98)	-0.622	-0.505	23.06	-0.751	-0.548	36.97
140 (140.00)	-0.671	-0.629	6.71	-0.721	-0.579	24.50
155 (154.96)	-0.631	-0.864	-26.94	-0.683	-0.793	-13.90
170 (169.98)	-0.494	-0.428	15.36	-0.644	-0.458	40.57
185 (185.03)	-0.645	-0.664	-2.90	-0.601	-0.629	-4.41
200 (200.04)	-0.439	-0.403	8.82	-0.553	-0.428	29.24
215 (215.75)	-0.384	-0.353	8.80	-0.498	-0.390	27.63
230 (230.04)	-0.335	-0.321	4.32	-0.452	-0.311	45.27
245 (245.00)	-0.259	-0.246	5.30	-0.381	-0.234	62.67
260 (260.07)	-0.194	-0.155	25.49	-0.310	-0.140	121.10

※ ( )* : **실측 냉각재 온도**

표 11. 감속재 온도변화에 따른 반응도 변화

Mod. Temp	WIMS-AECL/RFSP (mk)			PPV/RFSP (mk)		
	계산치	측정치	오차(%)	계산치	측정치	오차(%)
75 (74.00)*	-	-	-	-	-	-
70 (69.86)	-0.055	-0.241	-77.19	-0.174	-0.175	-0.63
65 (65.81)	-0.064	-0.190	-66.24	-0.171	-0.166	3.11
60 (59.29)	-0.130	-0.291	-55.30	-0.191	-0.248	-22.98
55 (55.77)	-0.069	-0.230	-70.05	-0.210	-0.192	9.37
50 (49.93)	-0.149	-0.309	-51.84	-0.213	-0.267	-20.10
45 (45.12)	-0.138	-0.371	-62.77	-0.230	-0.310	-25.82
40 (39.89)	-0.147	-0.286	-48.53	-0.214	-0.263	-18.68
35 (35.00)	-0.151	-0.280	-45.98	-0.166	-0.249	-33.33

※ ( )* : **실측 감속재 온도**

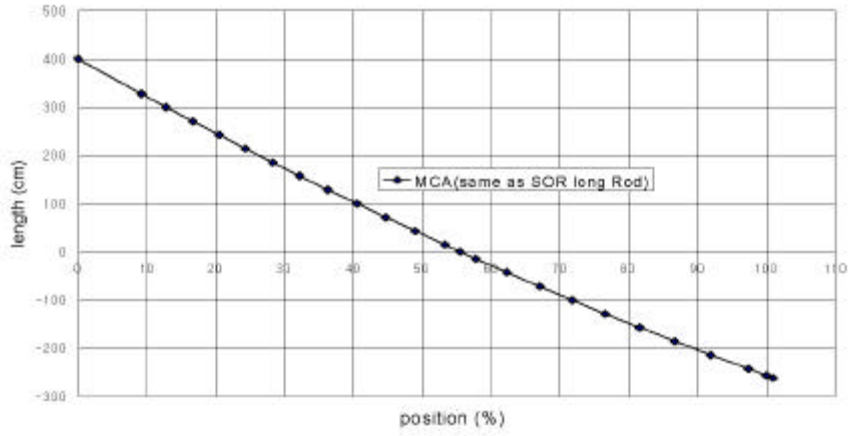
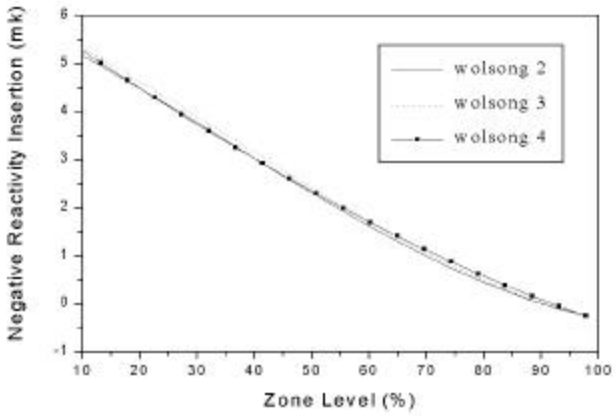


그림 1. MCA 삽입 %에 대한 길이 환산



계수	월성 2호기	월성 3호기	월성 4호기
A	4.13E-06	3.89E-06	7.24E-07
B	-4.44E-04	-4.20E-04	9.74E-05
C	-5.77E-02	-5.99E-02	-8.12E-02
D	5.79E+00	5.97E+00	6.07E+00

그림 2. 3rd order polynomial fitting function

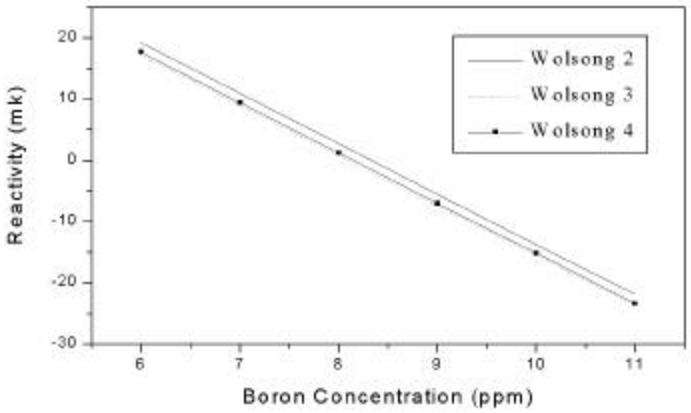


그림 3. 보론농도에 따른 반응도 변화 그래프

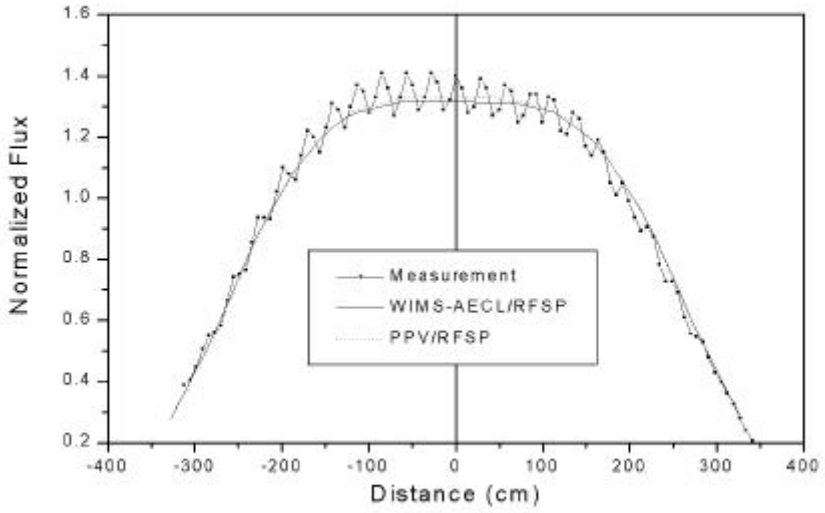


그림 4. **수평 중성자 분포** (CASE #5)

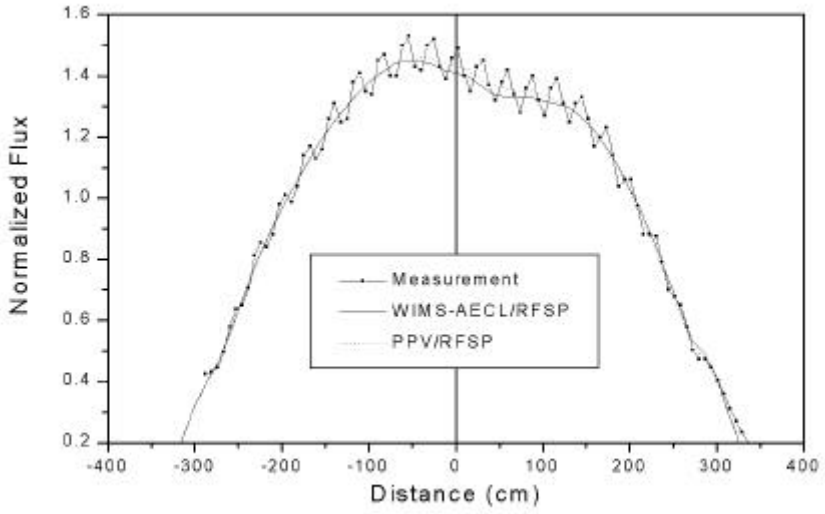


그림 5. **수직 중성자 분포** (CASE#5)