2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로 노심 핵설계 전산 코드(SCAN) 개발과 응용
Development and Application of CANDU-PHWR Neutronics Design Code SCAN

홍인섭 , 김창효
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

김봉기
한국전력기술 주식회사

민병주 , 석호천
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

2군 중성자 에너지 그룹 모형에 기초한 3차원 중수노심특성 해석용 SCAN(SNU CANDU-PHWR Neutronics Code) 코드를 개발하고 상업용 중수노심 핵설계 해석 코드인 RFSP (Reactor Fuelling Simulation Program)의 성능과 비교하였다. SCAN 코드의 전산능을 검증하기 위해 월성 3호기의 Phase-B 초기 시운전 상태에 대한 노물리 시험을 모사하였으며, 그 결과를 RFSP 코드 결과 및 월성 3호기의 실측 결과와 직접 비교하였다. 이 비교를 통해 검증 대상이 된 문제들에 대한 중성자 유효 증배 계수 및 노심 열출력 분포 예측 능력 면에서 SCAN 코드는 RFSP 코드 성능과 유사한 정도의 정확도를 보유하며, SCAN 코드가 채택한 가속화 수치 기법에 의해 RFSP보다 전산 속도면에서는 약 3.5 배 이상 효율적이고 중성자속의 수렴도 측면에서도 월등하게 개선되었음을 입증하였다. 또한 각종 노심 제어기구의 반응도가(Reactivity Worth)를 발전소 실측값과 비교한 경우에서도 SCAN 코드 결과가 RFSP 코드 결과보다 향상되었음을 보였다.

Abstract

SCAN(SNU CANDU-PHWR Neutronics Code) code based on three-dimensional full two-group diffusion theory model is developed and validated against RFSP(Reactor Fuelling Simulation Program) code made for CANDU reactors. We analyzed the phase B reactor physics test cases of Wolsong unit 3 by the SCAN code and compared the SCAN analysis with the corresponding RFSP analysis and the Wolsong unit 3 physics test measurements. We showed that the SCAN code could predict the effective multiplication factor and power distributions as accurately as the RFSP code. We also showed it to be the 3.5 times faster in computational speed and the better flux convergence than the RFSP. And we showed that SCAN calculations are better against RFSP analysis of reactivity worth of control devices.

1. 서론

국내의 상용 중수노심 설계용 전산 코드 체계는 캐나다로부터 도입된 PPV(POWDERPUFS-V)/RFSP(Reactor Fuelling Simulation Program)[1]를 중심으로 확립되어 왔다. RFSP는 방대한 분량의 코드로 다양한 노심 계산 모듈을 포함하고 있어 중수노심의 설계 뿐 아니라 각종 노물리 현상 분석에 이르기까지 중수로 노심 해석 전반에 활용되는 상용 코드이다. 그러나 그 방대함에 따른 몇 가지 문제점도 포함하고 있다.

RFSP 코드는 격자 계산용 코드인 PPV를 포함, 980여 개의 소스 파일로 구성된 방대한 코드로 중수노심 설계와 핵연료 관리, 노내 중성자속 분포 측정을 통한 연소이력 추적 및 과도 상태 노심 모사에 이르기까지 각종 중수로 운전 모사에 필요한 대부분의 코드들을 모듈의 형태로 내장하고 있어 그 응용 범위가 매우 넓다.

그러나 RFSP 코드는 오히려 그 방대함으로 인하여 제 3자에 의한 코드의 개량작업이 어려우며 운전 지원을 위한 새로운 방법론을 직접 적용하는 것도 매우 어렵다. 국내에서는 그 기밀성으로 인해 이러한 어려움은 더욱 커질 수 밖에 없는 실정이며 이에 따른 기술 의존성 또한 크다. 천연우라늄 핵연료 주기에 적합한 1.5군 그룹 중성자속 확산 모형인 RFSP 코드는 최근 CANFLEX 등의 고연소도 개량핵연료 주기 도입 연구 과정에서 AECL이 RFSP 코드를 완전 2군 모형으로 개량함으로써 해결하였다. 그러나 이 과정에서 개량 코드의 국내 도입까지는 오랜 시간과 노력이 소요되었다.

중수로 해석기술의 발전 및 기술 자립을 위해서 전산 코드에 대한 개량 또는 개발 및 검증과정은 필수적인 것이라 하겠다. 그러나 국내에는 4기의 월성 원전이 가동 중에 있으며 발전소의 다양한 실측값들이 있음에도 불구하고, 현재까지 이를 활용하여 독자적인 중수노심 설계 해석용 코드를 개발한 경험은 전무한 실정이다.

본 연구의 목적은 중수노심 해석 방법론의 확립과 기술 자립성을 높이기 위하여, 독자적인 중수노심 설계 해석용 코드인 SCAN 코드를 개발하고 그 성능을 검증하는데 있다. 검증을 위하여 SCAN 및 RFSP 코드에 격자 상수 계산용으로 WIMS-AECL[2], 증분 격자 상수 계산용으로 MULTICELL 코드를 똑같이 적용하고, 월성 3호기의 Phase-B 초기 노심 계산을 각각 수행함으로써 SCAN 코드 성능을 RFSP 코드 성능과 비교 평가하였다.

2. SCAN 코드의 특성

SCAN 코드는 3차원 2군 확산 방정식에 대한 유한 차분 해법(FDM ; Finite Difference Method) 코드로서 up-scattering 항을 포함하고 있어 완전한 2군 중성자 확산 모형에 의한 노심 계산을 실행할 수 있으며, 동시에 기존의 1.5 군 중성자 확산 모형을 이용한 노심 계산에도 응용이 가능하다. SCAN 코드의 중성자 확산 방정식 풀이를 위한 대수 방정식 형태는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A_1} & -\mathbf{U_1} \\ -\mathbf{R} & \mathbf{A_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{o}_1 \\ \ddot{o}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{k} \begin{pmatrix} \mathbf{F_1} & \mathbf{F_2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{o}_1 \\ \ddot{o}_2 \end{pmatrix}$$

SCAN 코드는 SOR(successive over relaxation)법과 멱승(power iteration)법을 결합한 재래식 반복계산 해법을 이용하는 RFSP 코드와는 다른 반복계산 기법을 이용하고 있다. 즉, Inner iteration법으로 SOR

법과 BICG-STAB(Bi Conjugate Gradient Stabilization)법을, 그리고 outer iteration법으로 Two-parameter Chebyshev법과 Wielandt법을 사용하고 있다[3][4]. 이 중 SOR/Two-parameter Chebyshev법이 전산시간 및 수렴도 측면에서 재래식 반복계산 해법보다 우수하여 SCAN 코드에서는 이 가속기법을 표준 반복계산 기법으로 활용하고 있다.

또한 SCAN 코드는 객체 지향 프로그래밍(OOP) 언어인 C++로 작성하였기 때문에 유지, 보수가 쉬운 장점을 가지며 HP Unix를 비롯한 Linux, Windows 등의 전산 운영체계에서 기동이 가능하여 여러 전산 시스템에 이용이 가능하다.

그림 1은 격자 상수 계산용으로 WIMS-AECL 코드, 증분 격자 상수 계산용으로 MULTICELL 코드를 결합한 SCAN 코드의 중수노심 해석 전산과정의 흐름도이다.

3. CANDU-PHWR 노심 구조

그림 2는 전형적인 CANDU-6 가압 경수로[5]를 나타낸 것으로 총 380 개의 핵연료 채널을 가진다. 노심 반응도 제어 기구는 수직 방향으로 14 개 영역에 설치된 액체영역제어계통(LZCU, Liquid Zone Control Unit), 21 개의 조정봉(ADJ, Adjuster rod), 4 개의 흡수봉(MCA, Mechanical Control Absorber) 및 28 개의 정지봉(SOR, Shut-Off Rod)들로 구성되며 수평 방향으로는 액체 형태 독물질 삽입 노즐(LPI, Liquid Poison Injection nozzle)을 가진다. SCAN 코드에서는 이러한 모든 노심 제어 기구들을 포함한 각종 구조체 물질들을 모두 모사할 수 있으며 2군 중성자 확산 방정식의 유한차분해를 구하기 위해 노심을 사용자의 계산 목적에 따라 자동으로 공간 분할할 수 있도록 하였다.

그림 3은 RFSP 코드의 노심 공간 분할 체계에서 흔히 이용되는 바와 같이 노심을 수평 방향으로 42 개, 수직 방향으로 34 개의 격자로 분할한 예이다. 그림에서 작은 원은 중수 노심의 notch 부분의 경계를 나타낸 것이며 큰 원은 notch를 제외한 노심 중간 부분의 경계를 나타낸 것이다. 코드 검증을 위해 수평, 수직 그리고 축 방향으로 42×34×20 모형으로 공간 분할하였다. 이 공간 분할 모형은 RFSP 코드에서 이용하는 44×36×22 모형과 동일하며, 이러한 구조로 분할할 경우 노심의 총 격자 수는 21,696 개이다.

4. 코드 검증

SCAN 코드의 검증을 위하여 월성 3호기 원전의 Phase-B 노물리 실험(Phase-B Post Simulation)[6][7] 중 95가지 경우를 채택하였다.(표 1 참조)

여기에서 'Phase-B'란 원자로가 첫 임계로 접근할 때까지의 상태 및 0.1% FP 이하의 저 출력 상태일 때를 말한다. 채택한 95가지 테스트 문제들에 대해 SCAN 및 RFSP 코드에 의한 1.5군 및 2군 계산을 실행하여 코드간 결과 및 실측치와 비교하였다.

월성 3호기의 실측 결과와의 비교 검증을 위하여 선택한 Phase-B Post Simulation 과정은 다음 항목들의 계산을 포함하였다.

a. 보론 반응도가 [mk/ppm]

b. 최초 임계 접근시의 임계 보론 농도 [ppm]

c. ADJ, MCA, SOR 등 반응도 제어 기구들의 반응도가 [mk/unit]
d. 감속재 계통 온도 반응도가 [mk/℃]

5. 계산 결과 및 논의

표 2는 SCAN 코드와 RFSP 코드의 1.5군 및 2군 모형 계산에 대한 유효 증배 계수(K_{eff})의 차이를 평균해서 정리한 것으로 앞서 언급한 95 테스트 문제들에 대한 결과이다. SCAN 코드는 RFSP 코드와 비교하여 1.5군 및 2군 계산 모두에서 그 평균값의 차이가 0.9 pcm 이하로 나타나 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 두 코드 모두 1.5군 계산과 2군 계산의 차이가 128 pcm 정도로 매우 크게 나타났으며 이는 WIMS-AECL 코드 결과에서 생산되는 군정수 단면적 차이에 기인한 것으로 판단된다.

표 3은 코드간 전산 시간을 비교한 것으로 SCAN 코드가 RFSP 코드에 비해 각 계산문제 그룹별로 3.5 배 ~ 5 배 정도 빨라 전산 속도면에서 월등하게 개선되었음을 보여준다. 또한 표 4는 이들 경우에 대한 중성자속의 수렴도를 표시하며 수렴도를 나타내는 값으로는 RFSP 코드에서 사용하는 OCON 이란 변수를 그대로 이용하였다. OCON은 상대 평균 중성자속 차이(Average relative flux differences between iteration steps)로 정의되는데, 표 4의 결과를 보면 SCAN 코드가 RFSP 코드보다 수렴성이 매우 우수함을 알 수 있다.

표 5는 중성자속의 수렴 특성을 더 자세히 알아보기 위해 ADJ Bank들의 반응도가 계산에 쓰인 8가지 경우에 대하여 전산 시간과 OCON을 비교한 것이다. 이 표는 중성자속의 수렴도를 높일 경우 SCAN 코드가 전산 시간 및 수렴성에서 RFSP 코드에 비해 월등함을 보여준다.

두 코드간의 노심 채널출력 차이를 알아보기 위한 예로 표 6과 표 7에서는 각각 1.5군 및 2군 모형 <B6> 문제에 대한 채널출력 분포를 나타내었으며, 최대 채널출력이 발생하는 채널에서의 상대 채널출력 차이가 1.5군의 경우 0.07%, 2군의 경우 0.02%를 나타내어 두 코드가 매우 유사한 채널출력을 예측함을 알 수 있다.

표 8과 표 9는 월성 3호기의 실측 결과와 코드 계산 결과의 차이를 나타낸 것이다. 표 8은 보론의 반응도가와 첫 임계 도달 상태에서의 임계 보론 농도를 각 코드별로 조사한 것으로 SCAN 코드와 RFSP 코드 모두 2군 계산의 경우 1.5군 계산에 비해 보론 반응도가를 매우 낮게 예측하였으며, 이는 표 2에서 보인 결과와 마찬가지로 WIMS-AECL 코드를 이용하여 생산한 군정수 단면적 차이에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 한편 임계 보론 농도는 1.5군 및 2군 계산결과가 각각 8.30 ppm, 8.13 ppm 으로 예측하고 있어 발전소의 실측값인 8.93 ppm 보다 매우 낮게 예측함을 알 수 있다.

표 9에서의 각종 노심 반응도 제어 기구들에 대한 반응도가 계산의 경우, SCAN 코드의 결과가 전반적으로 RFSP 코드 결과보다 실측값과의 차이가 적으며 2군 계산의 경우가 1.5군 계산의 경우보다 실측값과 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 감속재 계통의 온도 변화에 따른 반응도 차이는 두 코드 모두 매우 크게 나타났으며 이는 이미 수행된 WIMS-AECL 코드의 검증 과정에서 알려져 있는 결과이다. 한편, 감속재 계통 온도가 35℃ ~ 69℃정도로 변할 때 총 반응도 변화량은 약 1mk 정도로 매우 적은 값임을 고려할 때 실제 반응도 차이는 매우 적으나, 오차의 정확한 원인에 대해서는 추후 연구가 필요하다.

6. 결론 및 향후 과제

중수노심 설계 및 해석을 위하여 SCAN(SNU CANDU-PHWR Neutronics Code) 코드를 개발하였으며 월성 3호기의 Phase-B 테스트 문제들을 통해 전산 특성을 검증하였다. SCAN 코드는 RFSP 코드와 비교하여 중성자 유효 증배 계수 및 노심 열출력 분포 예측에서 유사하며, 가속화 수치 기법을 적용함으로써 전산 속도가 약 3.5 배 이상 개선되었고 중성자속의 수렴도도 월등하게 개선되었다. 또한 대부분의 각종 노심 제어기구의 반응도가 계산에서 SCAN코드가 RFSP 코드보다 발전소의 실측 결과와 비슷하며, 2군 계산의 경우가 1.5군 계산에 비해 향상되었음을 보였다. 그러나 유효 증배 계수 측면 및 보론 반응도가와 임계 보론 농도 예측에서 2군과 1.5군 계산 결과간의 차이가 매우 크며 이는 WIMS-AECL 코드의 격자 단면적 차이에 기인한 것으로 판단한다.

향후 과제로는 연소 계산능의 추가와 RFSP 코드의 Time-average module을 포함한 각종 모듈 개발 및 WIMS-AECL 코드 등의 격자코드와의 연계, 노내 열출력 감시 계통 프로그램의 개발 등을 수행할 계획이며 또한 증분 격자 상수 계산에 연소 계산능을 포함한 MCNAP (Monte Carlo depletion code of SNU) 코드를 활용할 계획이다. 이러한 지속적인 개발 과정을 통해 SCAN 코드는 향후 중수로 노심 설계 및 운전 모사와 연소이력 특성 추적을 비롯한 노심관리, 실측값을 이용한 노내 중성자속 사상 (in-core flux mapping) 등에 다양하게 응용될 수 있을 것이며 중수 노심 해석의 신뢰성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

1. B. Rouben, "Reactor Fuelling Simulation Program-RFSP: Program Description for Microcomputer Version", TTR-370, 1992 December.

2. J. Griffiths, "WIMS-AECL Users Manual", RC-1176, AECL, 1994.

3. I.S. Hong, C.H. Kim, B.J. Min, H.C.Suk, “Three Dimensional Two Group Finite Difference Diffusion Equation Solver for CANDU-PHWR Analysis, FDM3D”, 21st Annual Canadian Nuclear society Conference, Toronto, CANADA, 2000 June 11-14.

4. J.R. Shewchuk, "An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain", School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA 15213 (August 4, 1994).

5. "CANDU6 Generating Station Physics Design Manual", Wolsong NPP 234, 86-03310-DM-000, 1995.

6. 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.

7. 홍인섭, 민병주, 석호천, “WIMS-AECL/(MULTICELL)/RFSP 코드 시스템의 Phase-B Test Results를 이용한 계산성능 검증(월성 2호기)”, KAERI/TR -1419/99, 1997.

표 1 Brief Description for Benchmark Test Problems

Problem Type	Number of Cases	Meaning of Symbol #	Device Condition	Problem Usage
<B#>	6	Boron Concentration	Normal(ADJ in, SOR out, MCA out)	Boron reactivity worth estimation
<guesscb>	1	-	MCA04 inserted 55% vertically, Other devices Normal	Critical boron concentration search
<ZL#>	11	# [%] of Average Zone Controller Level	Normal	Zone level worth estimation
<ADJ#>	22	ADJ rod Unit Number	ADJ# out, Other devices Normal	ADJ rod worth calculation
<MCA#> <SOR#>	5 29	MCA unit number SOR unit number	MCA# or SOR# out, Other devices Normal	MCA and SOR worth calculation
<MT#>	8	Moderator Temperature	Normal	MTC calculation

* Additional 13 cases for ADJ bank and MCA bank calculations

표 2 Average K_{eff} Differences for 95 Test Cases

<table>
<tr><th></th><th>Average K_{eff} difference</th></tr>
<tr><td>|SCAN1.5 – RFSP1.5|</td><td>0.008mk (0.76 pcm)</td></tr>
<tr><td>|SCAN2 – RFSP2|</td><td>0.009mk (0.88 pcm)</td></tr>
<tr><td>|RFSP2 – RFSP1.5|</td><td>1.280 mk (128.03 pcm)</td></tr>
<tr><td>|SCAN2 – SCAN1.5|</td><td>1.286 mk (128.55 pcm)</td></tr>
</table>

표 3 Comparison of Time

Problem	Num of Cases	1.5 Group			2 Group		
		SCAN [s]	RFSP [s]	SPEED UP FACTOR	SCAN [s]	RFSP [s]	SPEED UP FACTOR
B6	1	21	332	15.91	21	97	4.68
B7	1	17	124	7.15	17	135	7.83
B8	1	3	103	29.60	4	112	29.78
B9	1	14	150	10.57	17	82	4.73
B10	1	21	131	6.27	21	99	4.78
B11	1	21	96	4.59	21	88	4.22
Guesscb9	1	28	144	5.14	28	72	2.55
ZC0~ZC100	11	206	1667	8.08	201	908	4.51
ADJALL	22	534	2501	4.69	529	1715	3.24
ADJBNKALL	8	147	729	4.97	153	530	3.48
MCAALL	5	159	597	3.75	159	482	3.03
MCABNKALL	5	166	668	4.03	167	543	3.24
SORALL	29	908	3889	4.28	896	2796	3.12
MTALL	8	136	650	4.76	143	767	5.36
TOTAL	95	2381	11781	**4.95**	2378	8426	**3.54**

* SPEED UP FACTOR = CPU Time of RFSP/CPU Time of SCAN

* CPU : HP 9000/120 MHz

표 4 Comparison of Convergence of SCAN and RFSP in terms of OCON

	1.5 Group		2 Group	
	SCAN	RFSP	SCAN	RFSP
Average OCON	**3.000E-06**	**6.838E-06**	**2.991E-06**	**7.840E-06**

$$* \; OCON = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\left| \frac{\sum_{g=1}^{2}\left(\Phi^{m,}{}_{g}{}^{t+1} - \Phi^{m,}{}_{g}{}^{t}\right)}{\sum_{g=1}^{2}\Phi^{m,}{}_{g}{}^{t}} \right|$$

, Convergence Criterion = max. relative flux error = 1.0e-5

표 5 Flux Convergence Characteristics

RFSP1.5G

Flux Convergence Criterion	TIME	Total NITER	Comment	OCON
2.00E-05	747	1461	-	8.48574E-06
1.00E-05	839	1822	-	3.75590E-06
8.00E-06	851	1936	-	3.10903E-06
5.00E-06	934	2382	-	1.87475E-06
3.00E-06	1266	4298	-	8.55955E-07
1.00E-06	3396	(999+999)*8	no convergence	2.17654E-06

SCAN1.5G

1.00E-05	146	436	-	3.14240E-06
1.00E-06	215	672	-	2.85173E-07
1.00E-15	1495	6309	-	1.40953E-16

* Benchmark problems : <ADJBNK_REF>, <ADJBNK01>, ..,<ADJBNK07> 8 cases

표 6 NORMALIZED CHANNEL POWER DIFF. <B6-1.5G-45%ZL>

SCAN RFSP Diff(%)								0.5897 0.5928 -0.53	0.6265 0.6297 -0.50	0.6470 0.6502 -0.49
Max. CH. Power					0.5347 0.5379 -0.59	0.6560 0.6590 -0.45	0.7642 0.7670 -0.37	0.8335 0.8364 -0.34	0.8770 0.8799 -0.33	0.8905 0.8933 -0.32
Max. Diff.				0.6063 0.6091 -0.46	0.7528 0.7556 -0.37	0.8880 0.8906 -0.30	0.9898 0.9925 -0.27	1.0554 1.0579 -0.24	1.0859 1.0884 -0.23	1.0841 1.0865 -0.22
			0.6246 0.6273 -0.42	0.7935 0.7960 -0.32	0.9506 0.9530 -0.25	1.0771 1.0793 -0.21	1.1634 1.1656 -0.19	1.2108 1.2128 -0.17	1.2228 1.2248 -0.17	1.2013 1.2032 -0.15
		0.5857 0.5880 -0.39	0.7821 0.7842 -0.27	0.9502 0.9523 -0.22	1.0898 1.0919 -0.19	1.1920 1.1938 -0.15	1.2521 1.2537 -0.13	1.2721 1.2734 -0.10	1.2661 1.2673 -0.10	1.2373 1.2386 -0.10
		0.7320 0.7340 -0.27	0.9261 0.9280 -0.20	1.0707 1.0723 -0.15	1.1832 1.1848 -0.13	1.2507 1.2519 -0.10	1.2792 1.2801 -0.07	1.2598 1.2607 -0.07	1.2370 1.2377 -0.05	1.2150 1.2154 -0.04
	0.6345 0.6365 -0.32	0.8530 0.8548 -0.21	1.0338 1.0353 -0.15	1.1351 1.1363 -0.10	1.2167 1.2176 -0.07	1.2628 1.2633 -0.04	1.2641 1.2642 -0.01	1.2217 1.2218 -0.01	1.1458 1.1457 0.01	1.1344 1.1341 0.03
	0.7456 0.7473 -0.23	0.9609 0.9624 -0.16	1.1183 1.1195 -0.10	1.1815 1.1824 -0.07	1.2299 1.2303 -0.03	1.2478 1.2478 -0.00	1.1785 1.1781 0.03	1.1312 1.1307 0.04	1.1008 1.1000 0.07	1.0940 1.0930 0.09
0.5766 0.5786 -0.34	0.8248 0.8264 -0.20	1.0384 1.0397 -0.13	1.1753 1.1761 -0.07	1.2062 1.2067 -0.04	1.2236 1.2235 0.01	1.2102 1.2098 0.03	1.1315 1.1306 0.08	1.0898 1.0889 0.09	1.0613 1.0600 0.12	1.0513 1.0498 0.15
0.6323 0.6345 -0.35	0.8902 0.8917 -0.17	1.0965 1.0976 -0.10	1.2173 1.2178 -0.04	1.2154 1.2154 -0.00	1.2073 1.2069 0.04	1.1403 1.1396 0.07	1.0978 1.0965 0.12	1.0577 1.0561 0.15	1.0266 1.0249 0.17	1.0113 1.0095 0.18
0.6621 0.6642 -0.31	0.9217 0.9232 -0.16	1.1268 1.1276 -0.07	1.2459 1.2461 -0.01	1.2484 1.2482 0.01	1.2283 1.2273 0.08	1.1365 1.1354 0.10	1.0850 1.0834 0.15	1.0400 1.0382 0.17	1.0035 1.0013 0.22	0.9757 0.9735 0.23

표 7 NORMALIZED CHANNEL POWER DIFF. <B6- 2G-45%ZL>

SCAN RFSP Diff(%)								0.5604 0.5628 -0.44	0.6018 0.6041 -0.38	0.6226 0.6249 -0.36
Max. CH. Power					0.5109 0.5134 -0.50	0.6340 0.6362 -0.34	0.7411 0.7431 -0.27	0.8129 0.8148 -0.24	0.8580 0.8599 -0.22	0.8722 0.8740 -0.21
Max. Diff.				0.5830 0.5851 -0.36	0.7344 0.7364 -0.27	0.8709 0.8727 -0.20	0.9735 0.9752 -0.18	1.0403 1.0419 -0.15	1.0724 1.0738 -0.13	1.0711 1.0725 -0.13
			0.6016 0.6035 -0.31	0.7762 0.7779 -0.22	0.9362 0.9377 -0.16	1.0648 1.0662 -0.14	1.1527 1.1540 -0.11	1.2018 1.2028 -0.08	1.2154 1.2165 -0.09	1.1945 1.1954 -0.07
		0.5629 0.5648 -0.34	0.7649 0.7665 -0.21	0.9371 0.9385 -0.15	1.0800 1.0812 -0.11	1.1851 1.1860 -0.08	1.2475 1.2482 -0.06	1.2696 1.2701 -0.04	1.2653 1.2657 -0.03	1.2369 1.2373 -0.03
		0.7117 0.7132 -0.21	0.9124 0.9136 -0.14	1.0618 1.0627 -0.08	1.1784 1.1792 -0.07	1.2499 1.2504 -0.04	1.2811 1.2813 -0.02	1.2647 1.2648 -0.01	1.2434 1.2434 0.00	1.2211 1.2209 0.01
	0.6118 0.6133 -0.24	0.8375 0.8387 -0.14	1.0235 1.0244 -0.09	1.1298 1.1304 -0.05	1.2160 1.2163 -0.02	1.2667 1.2666 0.01	1.2706 1.2703 0.02	1.2308 1.2305 0.02	1.1572 1.1565 0.06	1.1458 1.1451 0.06
	0.7260 0.7274 -0.19	0.9480 0.9492 -0.12	1.1111 1.1118 -0.07	1.1796 1.1800 -0.04	1.2327 1.2327 -0.00	1.2550 1.2546 0.03	1.1892 1.1884 0.06	1.1439 1.1431 0.07	1.1146 1.1136 0.09	1.1080 1.1068 0.11
0.5556 0.5574 -0.32	0.8102 0.8115 -0.16	1.0285 1.0294 -0.09	1.1709 1.1715 -0.05	1.2073 1.2072 0.01	1.2294 1.2290 0.03	1.2205 1.2200 0.04	1.1449 1.1438 0.09	1.1046 1.1035 0.10	1.0771 1.0758 0.12	1.0675 1.0660 0.14
0.6158 0.6177 -0.31	0.8784 0.8797 -0.15	1.0892 1.0900 -0.07	1.2156 1.2159 -0.02	1.2197 1.2196 0.01	1.2161 1.2155 0.05	1.1537 1.1529 0.07	1.1129 1.1116 0.12	1.0742 1.0729 0.12	1.0441 1.0424 0.16	1.0290 1.0273 0.17
0.6465 0.6483 -0.28	0.9113 0.9125 -0.13	1.1212 1.1219 -0.07	1.2461 1.2461 -0.00	1.2555 1.2552 0.02	1.2396 1.2388 0.07	1.1512 1.1501 0.10	1.1015 1.1000 0.13	1.0578 1.0563 0.14	1.0222 1.0203 0.18	0.9941 0.9923 0.18

표 8　Boron Reactivity Worth and Critical Boron Concentration
(Wolsong 3 , Phase-B)

	PPV/RFSP1.5	WIMS-AECL/ RFSP1.5	WIMS-AECL/ SCAN1.5	WIMS-AECL/ RFSP2	WIMS-ACEL/ SCAN2
Boron reactivity worth [mk/ppm]	8.2900	8.1724	8.1700	7.7274	7.7267
Critical boron concentration[ppm]	9.0830	8.3031	8.3030	8.1298	8.1294
C.b. concentration diff[%]	1.71	-7.02	-7.02	-8.96	-8.97
C.b. concentration measurement[ppm]	8.9300				

표 9　Total Reactivity Worth Difference
(Wolsong 3 , Phase-B)

	PPV/RFSP1.5	WIMS-AECL/ RFSP1.5	WIMS-AECL/ SCAN1.5	WIMS-AECL/ RFSP2	WIMS-ACEL/ SCAN2
ADJ rods	5.02	-6.34	-5.94	-5.83	-5.43
ADJ banks	0.53	-5.93	-6.04	-5.64	-5.73
MCA rods	7.37	4.85	4.53	4.16	3.83
MCA banks	10.13	13.64	13.33	11.75	11.66
SOR	9.18	6.75	5.89	6.29	5.64
MT 35~69℃	-1.62	-45.46	-48.35	-47.45	-49.59

*Value = (Calculation – Measurement)/Measurement × 100 [%]

그림 1   WIMS-AECL/SCAN Calculation Flowchart for Simulate model

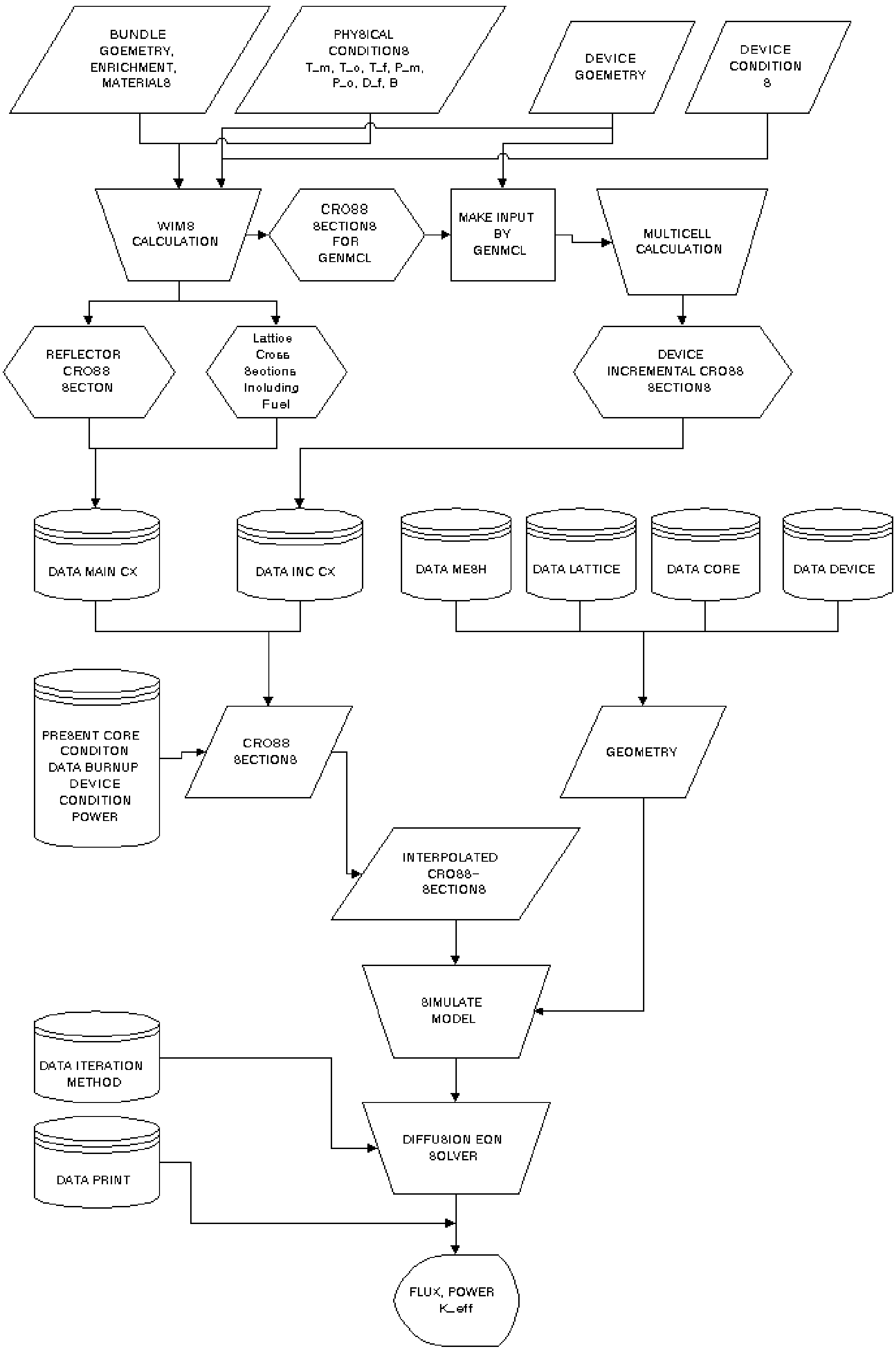

그림 2 CANDU-PHWR Core

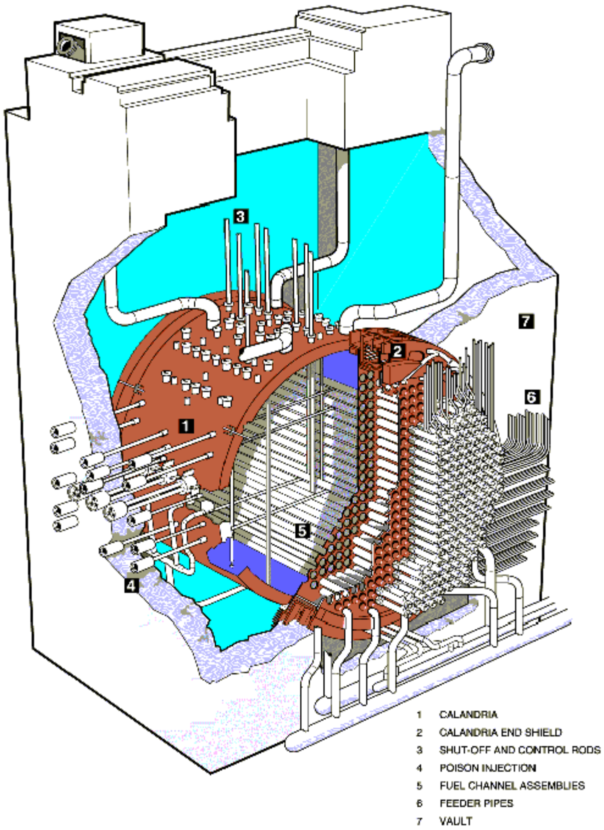

그림 3 Mesh Configuration for CANDU-6 Core (42×34×20 SCAN Model)