

**WIMS/D5와 MCNP를 이용한 CANDU 기하학적 모델이 격자 물리에
미치는 불확실성 분석**

권태안, 홍성택, 이영준, 오세기

전력에너지연구실 아주대학교

김만웅, 이상규

한국원자력안전기술원 규제기술연구부

**Geometrical Model Effects on CANDU Lattice Physics Uncertainties in
Calculations of WIMS/D5 and MCNP with ENDF/B-VII**

T. A. Kwon, S. T. Hong, Y. J. Lee, and S. K. Oh

Energy System Division

Ajou University, Suwon

; and

S. K. Lee and M. W. Kim

Safety technology Division

Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon

1. 서론

현재 국내에서 가동 중인 4기의 CANDU형 중수로, 월성 1, 2, 3, 4호기 가운데 1호기는 2010년이 되면 설계수명에 도달하게 된다. 따라서 현재 원자로를 설계수명 이후에도 제한된 기간 동안 안전운전의 타당성을 보장받기 위해서는 부품교체와 같은 hardware 개선방법 이외에 설계당시 사용했던 설계 및 안전해석용 software에 내재하는 불확실성을 줄임으로 안전해석의 보수성을 유지하면서 충분한 안전여유도를 확보하고 있음을 증명하여야한다

안전해석 불확실성 분석에는 가상사고의 발생과 더불어 진행과정 동안 발전소의 주요계통 각 부분별, 부품별 열수송 능력을 확인하는 시스템 열수력해석의 불확실성과 함께 원자로의 출력치이를 모사하는 노심해석의 불확실성이 연계되어야한다. 노심해석의 불확실성 가운데 노심격자 해석을 위해 설계시 사용되었던 코드인 1군 충돌확률이론 PPV¹⁾의 불확실성이 가장 클 것으로 예상하고 있다. 왜냐하면 PPV는 당시 컴퓨터성능으로 신속하게 계산하기 위해 격자실험에서 얻은 경험식모델에 의존하므로 시대가 요구하는 정밀도로 다양한 운전 상태를 모사하기에는 한계가 있는 것으로 평가되기 때문이다. 이를 개선하는 방법으로 캐나다에서는 WIMS/D4를 자체적으로 개선한 WIMS-AECL²⁾을 사용하고 있다.

본 연구는 격자해석의 불확실성 요소 가운데 먼저 상이한 기하학적 모델이 제공하는 오차 범위를 평가하는 목적으로 IAEA 회원국들이 공동으로 참여하여 ENDF/B-VII를 바탕으로 개선한 172군 핵자료라이브리리를 장착한 WIMS-IAEA와 ENDF/B-VII 연속에너지 핵자료라이브리리를 장착한 확률론적 중성자수송코드 MCNP4B³⁾를 병행하여 사용하였다. WIMS는 PPV와 유사하게 충돌확률이론으로 중성자수송방정식의 근사해를 구하므로 CANDU 핵연료 다발을 몇 개의 균질화된 동심원영역으로 나눈 기하학적 모델을 사용하는 반면에 MCNP는 다발 내 연료봉들의 배치를 실제와 동일하게 기하학적 구조로 모델링한 것을 사용하기 때문에 두 방법을 병행하는 것은 공명에너지영역에서의 자기차폐(self-shielding)효과를 비교하는데 유용하다.

다발형 핵연료집합체로 구성된 CANDU 노심격자 단면에 대한 WIMS 기하학적 모델은 설계자에 의해 ANNULUS 입력변수로 제공되는데, 격자 중앙에서부터 4개의 동심원영역에 각각 1, 6, 12, 18개의 핵연료봉고리를 포함하도록 동심원의 외경값이 계산된다. 이따라서 각 동심원영역 간의 냉각재유로면적과 핵연료봉의 단면적합의 비가 동일하지 못하고 설계자의 선택에 따라 서로 약간의 차이를 보일 수 있다.

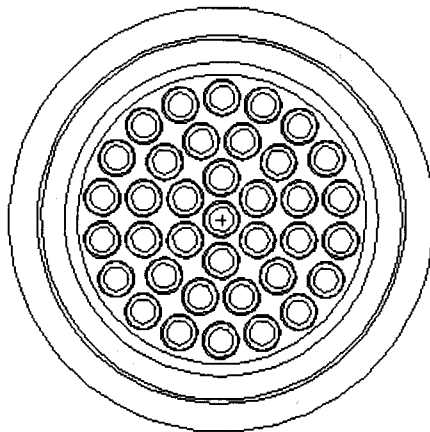
본 연구에서는 WIMS-IAEA와 MCNP4B를 이용하여 CANDU 노심격자에 대한 기하학적 모델의 변화가 반응도 및 반응율과 같은 노물리 특성에 미치는 불확실성 영향이 핵연료의 연소도 증가에 따라 비교 분석하였다.

2. 시뮬레이션 모델

앞서 논의한대로 두 코드의 핵자료라이브러리는 ENDF/B-VII으로 일치시키므로 사용된 핵자료의 차이에서 오는 불확실성의 편중(bias)은 제거하였다. 그러나 사용된 핵자료라이브러리가 갖는 고유한 불확실성은 IAEA의 임계도실험 benchmark test 결과를 이용하여 별도의 평가가 이루어져야할 것이다.

MCNP4B는 연속에너지, WIMS-IAEA는 172군 라이브러리를 각각 사용하였으며, WIMS-IAEA에서는 중간공명(Intermediate resonance)모델을 가정하여 자체 내에서 자기차폐효과를 계산하는데 반해 MCNP 연속에너지 옵션은 통계오차범위 안에서 이러한 오차원인을 제거한 계산이 이루어질 수 있다. 그리고 핵연료 온도를 MCNP4B 라이브러리에 맞게 두 코드 모두 상온(294°K)으로 맞추었으므로 공명영역에서의 도플러효과를 배제할 수 있다는 장점이 있으나 운전온도(687°C)와 상이하므로 연소도특성은 실제와 다를 수 있다. 그밖에 다른 구조 및 물성 파라미터 값은 WOLSONG 2호기 안전성분석보고서⁴⁾와 각종 기술보고서 자료를 참조하였다.

WIMS의 ANNULUS 입력자료 가운데 동심원 반경값을 변화시켜 무한중배계수, k_{∞} 의 값이 최대 및 최소가 되는 두 경우(approximate maximum, approximate minimum)를 각각 Case1 및 Case2로 정하고 이 경우에 대해 주요 노물리 특성값을 비교하였다. 두 경우에 대해 사각형 노심격자를 동심원으로 재구성한 모형을 그림1에 나타냈으며 붉은색 부분이 동심원 내에 있는 핵연료 pellet 및 피복관 면적의 총합과 동일한 동심원대의 면적이며 그 외곽은 그 사이의 냉각재유로 면적의 합에 대응한다.



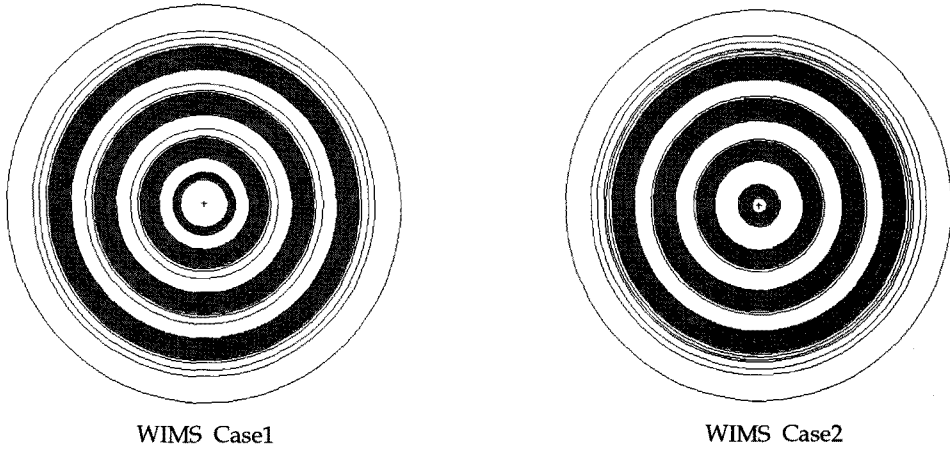


그림1. 격자해석의 기하학적 구조 모델

3. 결과 및 고찰

가. 무한증배계수, k_{∞}

Cold Clean 상태의 초기노심격자에 대한 WIMS 모델 Case1 및 Case2와 MCNP의 무한증배계수 k_{∞} 값을 비교한 결과를 표1에 나타내었다. MCNP 값을 기준할 때, WIMS ANNULUS 모델은 3.0mk 이내에서 underestimate하며 이 가운데 동심원 간의 경계값에 따른 최대가능 오차범위로서 WIMS Case1과 Case2의 Δk_{∞} 는 약 0.4mk에 이른다.

	WIMS		MCNP
	Case1	Case2	
k_{∞}	1.138973	1.139399	1.14172($\pm 0.091\%$)
$k_{\infty,MCNP} - k_{\infty,WIMS}$ (%상대오차)	0.002747(-0.24%)	0.002321(-0.20%)	-

표1. 초기 노심의 무한증배계수 k_{∞}

한편 WIMS 모델에 있어서 연소도에 따른 두 경우의 k_{∞} 변화를 시뮬레이션하여 그림2에 도시하였다. 앞서 지적한대로 연소도계산에서 정상운전시 온도조건을 고려하지 않았으므로 절대값은 실제와는 상이할 것이지만 상대적 불확실성은 같은 경향을 보일 것으로 예상된다. 그림에 의하면 두 경우 간 Δk_{∞} 값의 차는 연소가 진행되면서 노심평균연소도 부근에 해당하는 4000MWD/MTU까지 최대값인 0.2mk까지 벌어지며 그 이후부터는 큰 변화가 없음을 보인다. 결론적으로 설계자에게 허용된 동심원 경계반경 선택에 따르는 k_{∞} 계산의 불확실성은 평형연소도 이후에는 핵연료의 연소도에 무관하게 거의 영향을 미치지 않는 것으로 평가하였다.

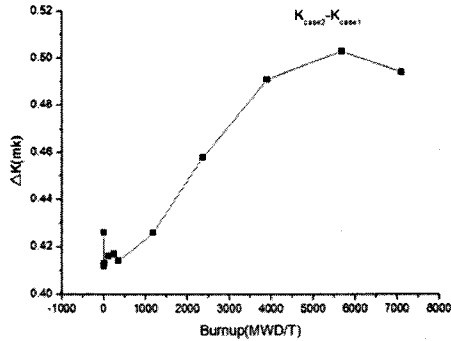
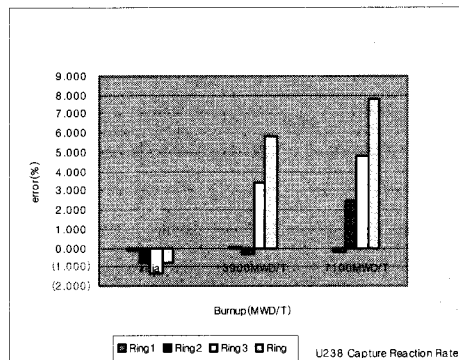
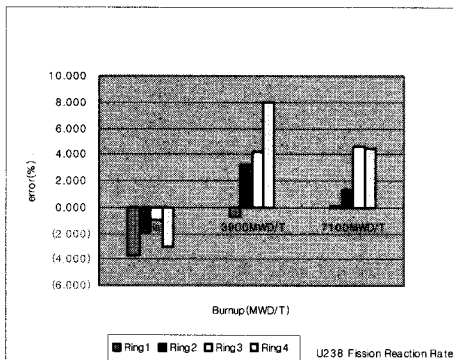
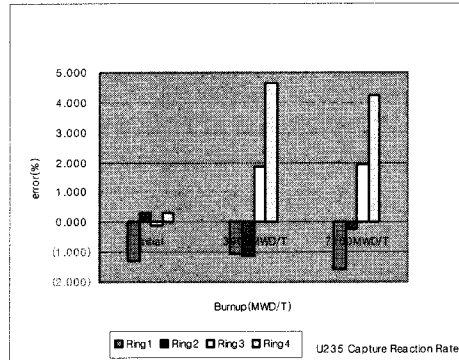
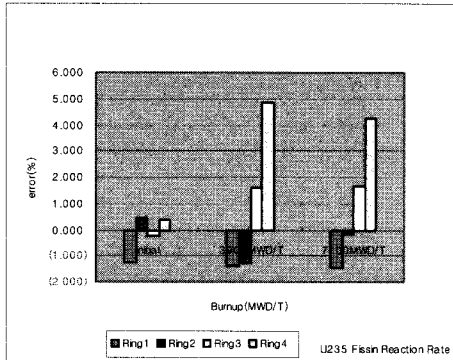


그림2. Burn-up에 따른 k_∞ 비교

나. 우라늄 및 플루토늄 동위원소의 반응율

핵연료의 연소가 진행되면서 핵물질을 구성하는 주요 핵종의 핵분열 및 중성자포획반응의 변화를 WIMS 모델을 이용하여 시뮬레이션하였다. 현재 보유하고 있는 MCNP4B version은 연소도계산을 수행할 수 없으므로 각 연소상태에서 WIMS가 동심원별로 계산한 핵종들의 수밀도값을 사용하여 해당 Ring의 핵연료봉당 반응율을 계산하였다. WIMS 연소도계산은 핵연료다발의 평균연소도가 각각 초기 노심평균 및 교체핵연료의 연소도에 대응하도록 0MWD/MTU, 3900MWD/MTU, 7100MWD/MTU 경우를 선택하였다.

이렇게 계산된 ring별 핵종별 반응율을 그림.3에는 MCNP에 대한 WIMS Case1의 계산편차를, 그림.4에는 WIMS Case2에 대한 Case1의 계산편차를 %상대오차 단위로 정리하였다.



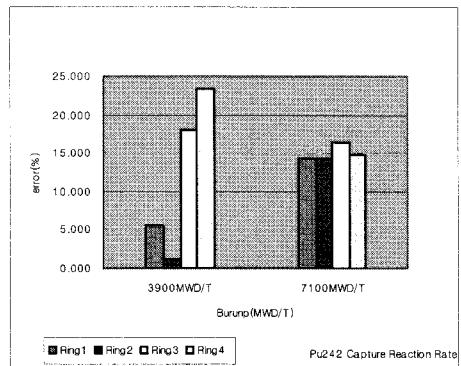
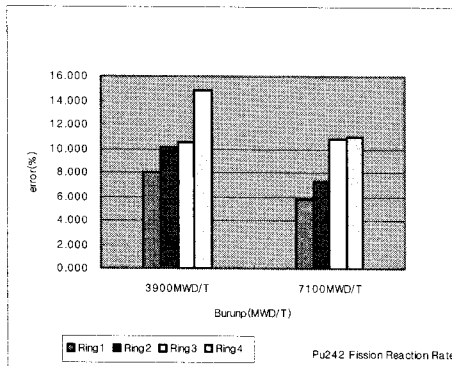
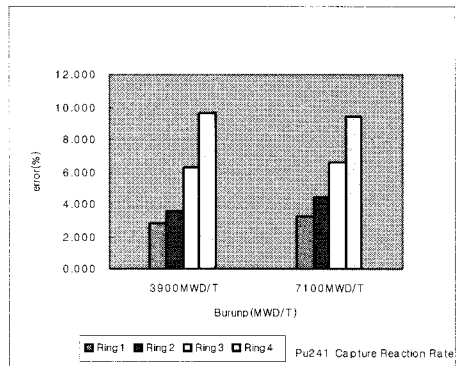
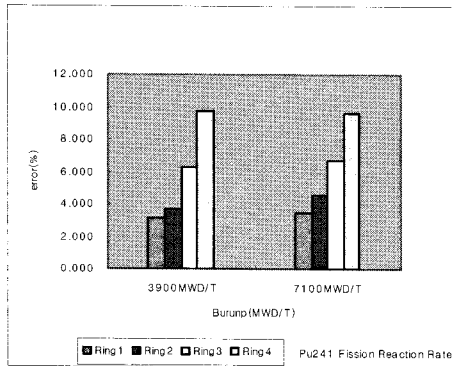
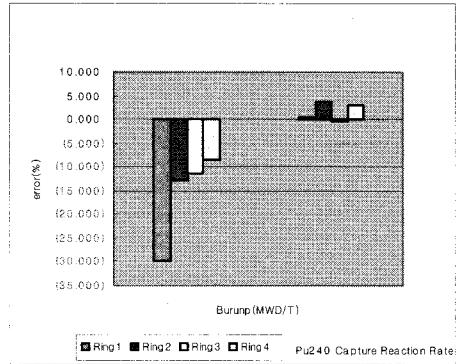
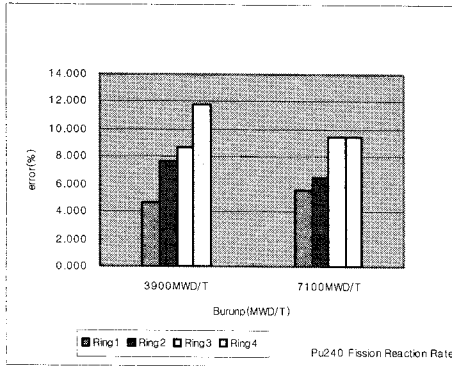
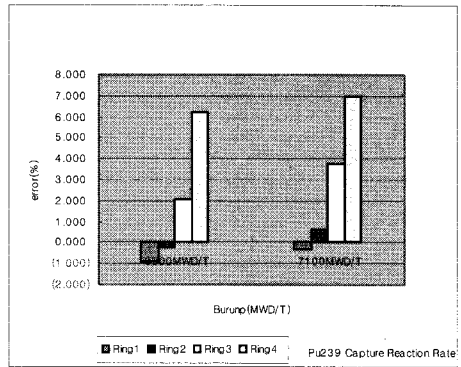
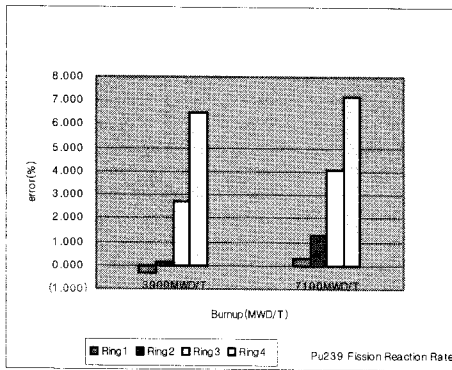


그림3. 초기, 평형, 배출연소도에서 MCNP와 WIMS Case1의 U 및 Pu 핵종별 반응을 비교

그림3에 의하면 MCNP와 WIMS의 계산반응을 편차는 burn-up이 진행함에 따라 최외각 동심원영역인 Ring4가 내부 Ring에 비해 큰 값을 보인다. 특히 U-235 동위원소 경우, WIMS 값이 가장 크게 underestimate하는데 이는 중수감속재와 인접한 Ring의 연화 증성자스펙트럼으로 인해 상대적으로 큰 반응을 가지며 이에 비례하여 핵종수밀도 감소율도 크기 때문이며, 이러한 현상은 Pu-239를 제외한 Pu 동위원소들에 대해서는 약하게 나타났다.

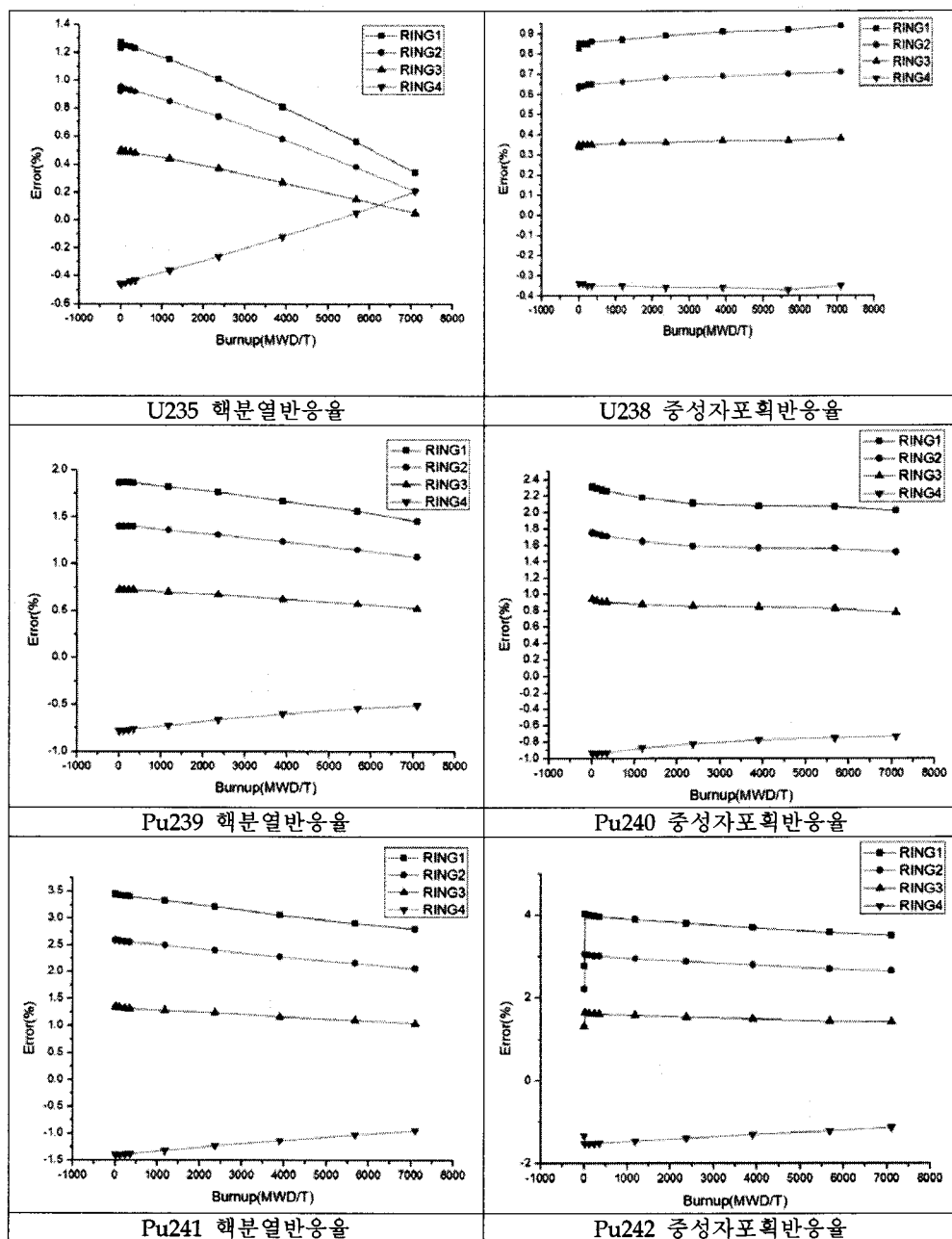


그림4. 연소도에 따른 동위원소별 동심원별 핵분열반응율변화

그림4에 도시된 WIMS Case1, Case2의 두 경우 비교에서는 U, Pu 동위원소 중 핵분열성 및 잠재핵분열성 동위원소의 핵분열반응 및 중성자포획반응의 Ring간 상대오차는 burn-up이 진행되는 동안에도 거의 일정하게 유지된다. 그러나 핵연료봉다발 내부 Ring에 있는 핵연료봉들과 최외각 Ring에 있는 핵연료봉에 대한 반응을 오차는 평균연소도에 대응하는 값을 기준하여 서로 반대방향에 있다. 이러한 경향은 앞서 그림.3과 유사한 것으로서 중성자스펙트럼의 공간중속성이 주요 원인이다

이상에서 살펴본 바에 의하면 CANDU형 노심격자의 노물리 특성은 핵연료봉다발 내에서 공간중속성을 무시할 수 없으며, 이는 주로 중성자스펙트럼의 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해 핵연료봉다발의 내부 Ring과 최외각 Ring에 대해서도 다른 중성자스펙트럼을 갖는 중성자충돌이론으로 WIMS 코드를 개량해야할 것이다. 그렇지 않을 경우, 상세한 중성자수송이론과 핵연료집합체영역의 동심원경계를 정하는 기하학적 모델의 적절성이 함께 고려되어야 할 것이다.

5. 결론 및 향후 연구

CANDU형 중수로의 노심격자를 동심원영역으로 재구성한 WIMS 코드의 기하학적 모델은 MCNP와 3mk이내의 차이를 보인다. 여기에는 핵자료라이브러리의 구조가 다르기 때문인 부분이 포함되나 이로 인한 것보다는 공명에너지영역에서의 공명모델 및 자기차폐 근사모델에 인한 것으로 판단되나 더 많은 상세연구를 통해 확인되어야 한다

MCNP와 WIMS 코드를 이용하여 핵연료다발의 서로 다른 기하학적 모델이 원인이 되는 노심격자 노물리해석 편차를 전 연소도 구간에 대해 계산하였다. 두 코드 모두 핵연료봉집합체의 최외각 Ring에 배치된 핵연료봉에 대한 핵분열 및 중성자포획반응율이 내부의 핵연료봉에 대한 반응율과 상반된 오차를 갖는다. 이는 CANDU형 노심격자의 노물리 특성은 노심격자의 비균질도(heterogeniety)에 따른 핵연료봉다발 내에서 공간중속성을 무시할 수 없다.

이는 주로 중성자스펙트럼의 변화에 기인하는 것으로 판단할 때 WIMS 코드에서 이러한 오차를 줄이기 위해서는 2 영역 중성자스펙트럼을 이용한 충돌이론으로 개량하는 것이 바람직하며, 그밖에 상세한 중성자수송이론과 핵연료집합체영역의 동심원경계를 정하는 기하학적 모델의 적절성이 함께 결합하는 방법도 고려할 수 있다.

6. 참고문헌

- 1) D.B. Miller and E.S.Y. Tin, "POWDERPUFS-V User's Manual", AECL Report TDAI-31, Part 2, 1976 March
- 2) Reactor Physics Branch Chalk River Laboratories Chalk River, Ontario K0J 1J0, "WIMS-AECL Users Manual", 1994
- 3) Judith F. Briesmeister, "MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", 1997
- 4) KOREA ELECTRIC POWER CORPORATION, "WOLSONG FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT", 1995