

WIMS-D5를 이용한 중수로 노심 안전 해석

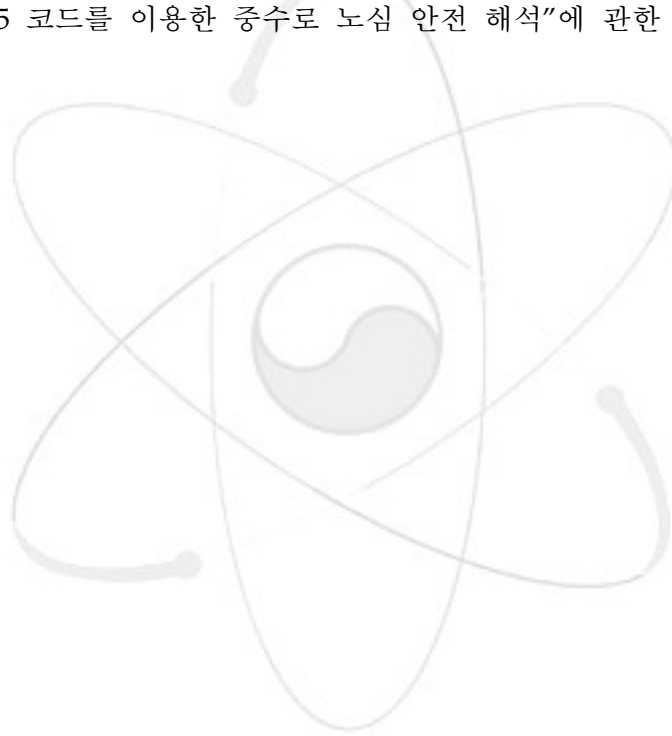
Numerical Benchmark of WIMS-D5 Against  
WIMS-AECL and POWDERPUFS-V

*KAERI*

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2002년도 “중수로 안전해석체제 수립 및 요소기술 개발” 과제에서 수행한 “WIMS-D5 코드를 이용한 중수로 노심 안전 해석”에 관한 기술보고서로 제출합니다.



2003. 3.

주저자 : 김원영

공저자 : 민병주

# 요 약 문

## I. 제 목

WIMS-D5 코드를 이용한 중수로 노심 안전 해석

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

중수로 노심은 양의 기포반응도를 가지고 있으므로 대형 LOCA시 노심 출력이 급격히 증가한다. 현재 원자로 내의 운전 조건과 연소도에 따른 실험자료의 부족으로 기포 반응도에 관한 오차가 잘 정의되지 않아 현재의 이론 모델과 컴퓨터 코드의 검증에 문제가 따르고 있다. 따라서 원자로 설계 및 해석에서 기포반응도 계산의 신뢰도를 확보하기 위해서는 실험자료의 평가와 더불어 코드의 검증이 필요하다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

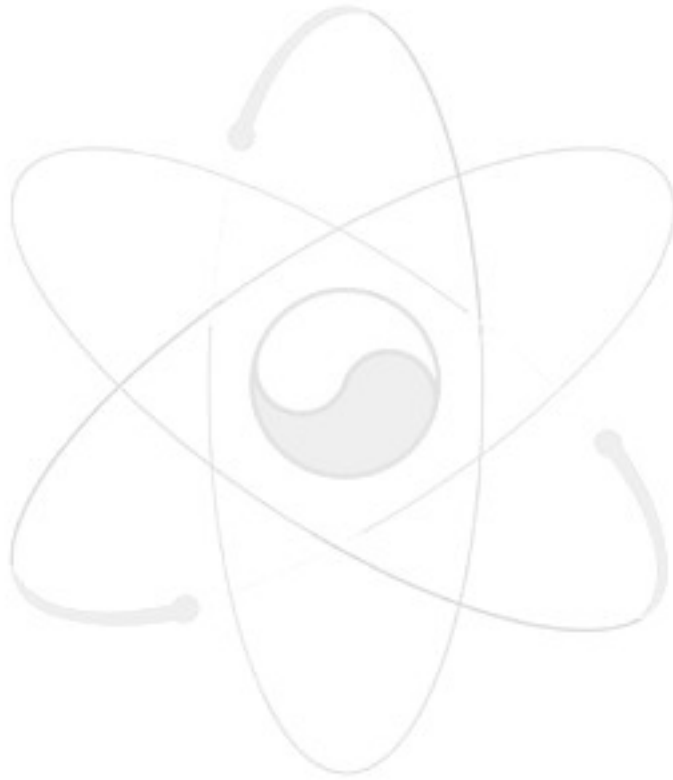
본 연구에서는 기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가를 위하여 CANDU(CANadian Deuterium Uranium) 원자로의 격자특성에 대한 WIMS-D5코드와 WIMS-AECL 코드, 그리고 POWDERPUFS-V(PPV) 코드의 계산결과를 비교하였다.

## IV. 연구개발결과

계산시 사용되는 물리적 변수는 ENDF/B-VI 라이브러리에 근거하여 생성되었고 CANDU 원자로는 천연 우라늄을 핵연료로 사용하였다. 그 결과 WIMS-D5, WIMS-AECL, PPV 코드의 격자계산을 비교하면 무한증배계수 계산 결과 PPV를 기준으로 WIMS-D5는 연소 초기에 0.4%, WIMS-AECL은 2.1%의 오차를 보이며, 연소가 진행됨에 따라 WIMS-D5는 2.0%, WIMS-AECL은 2.1%의 오차를 보인다. CANDU 원자로의 격자특성을 보기위해 핵연료 온도변화계수, 냉각재 온도변화계수, 감속재 온도변화계수를 비교한 결과, 기포가 없는 격자인 경우 초기에는 WIMS-D5가 WIMS-AECL 보다 PPV 코드의 결과와 더 잘 일치함을 알 수 있지만 연소가 진행됨에 따라 PPV 코드의 계산 결과와 비교할 때, WIMS-AECL이 WIMS-D5보다 적은 오차를 보임을 알 수 있다.

## V. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가 결과는 차후 중수로 노심 안전 해석 시 WIMS-D5 코드의 적용성을 확인하기 위한 기초 자료로 활용될 것이다.



# SUMMARY

## I. Project Title

Numerical Benchmark of WIMS-D5 Against WIMS-AECL and POWDERPUFS-V

## II. Objective and Importance of the Project

Since CANDU reactors have a positive void coefficient reactivity, there is an increase in core power in the postulated event of a large LOCA. However, the current validation of the theoretical models and computer codes are such that errors associated with void reactivity calculations are not well defined due to a lack of experimental data at in-reactor operating conditions and fuel burnups. Therefore, the benchmark calculations have been performed for WIMS-D5 against POWDERPUFS-V(PPV) and WIMS-AECL using CANDU(CANAdian Deuterium Uranium).

## III. Scope and Contents of Project

The numerical benchmark of reactor physics codes for safety analysis was performed, which considers the effect of Void Reactivity. In this project we will give an effort to validate the reactor physics codes for safety analysis considering the effect of the void reactivity. For the CANDU reactors, the lattice parameters were generated for the natural uranium based on the ENDF/B-VI library of WIMS-D5 and WIMS-AECL codes. The calculation results using WIMS-D5, WIMS-AECL and POWDERPUFS-V(PPV) Codes for the CANDU reactors were examined.

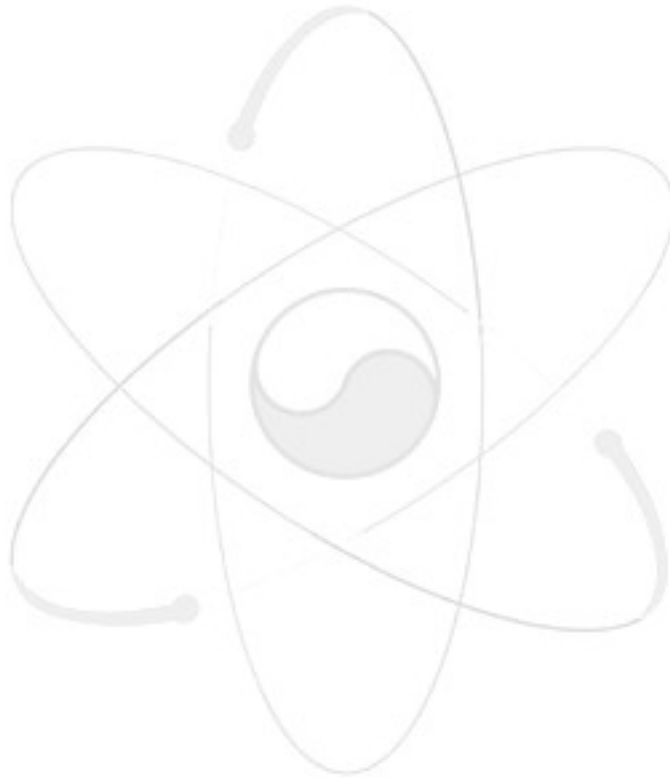
## IV. Result of Project

When comparing the infinite multiplication constant, the results show that at the beginning the prediction errors of WIMS-D5 and WIMS-AECL against POWDERPUFS-V are 0.4% and 2.1% and at the 4000MWD/T, 2.0%, 2.1%, respectively for CANDU reactors. The results shows that the values obtained from WIMS-D5 calculation are in the agreement with from those of PPV at the beginning whereas WIMS-AECL are in the agreement with the WIMS-AECL results as burnup increase in the comparison of fuel/coolant/moderator

temperature coefficients in the cooled lattice.

#### V. Proposal for Applications

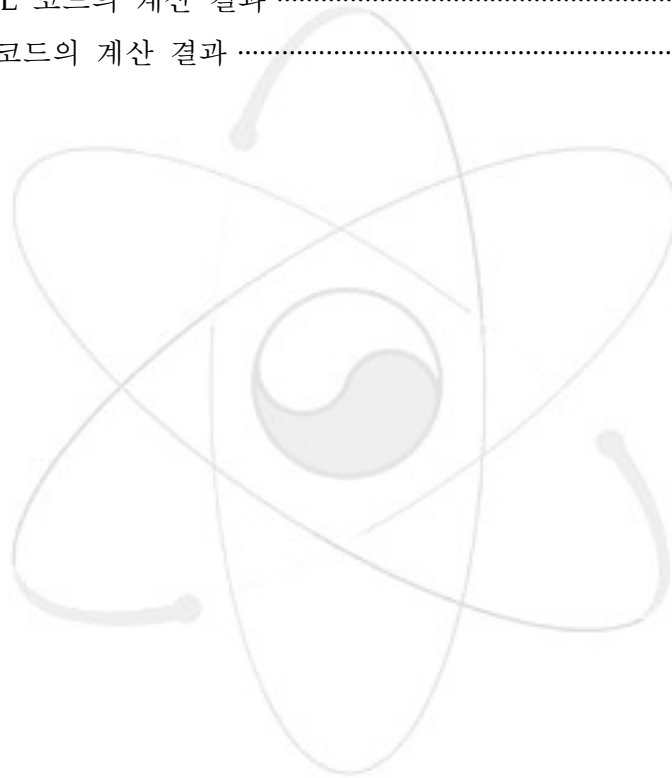
Numerical Benchmark test results of reactor physics codes will be used for a basic data on the safety analysis of reactor core in the PHWR (pressurized heavy water reactor).



# 목 차

제출문 .....	i
요약문 .....	ii
Summary .....	iv
목차 .....	vi
Contents .....	viii
표목차 .....	x
그림목차 .....	xi
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 계산 방법 .....	2
제 1 절 코드와 라이브러리 .....	2
1. POWDERPUFS-V(PPV) .....	2
2. WIMS .....	3
(가) WIMS-D5 .....	3
(나) WIMS-AECL(2-5d) .....	3
제 2 절 격자코드 WIMS와 PPV 모델의 입력 데이터 .....	4
제 3 절 PPV와 WIMS 코드의 모델링 .....	5
1. 핵연료의 밀도 .....	5
2. 구성물질 .....	6
3. 출력과 ENDREGION .....	7
제 3 장 중수로 CANDU에 대한 격자 계산 .....	9
제 1 절 CANDU 격자 모델 .....	9
제 2 절 CANDU 격자 계산 방법 .....	10
제 3 절 계산 결과 및 논의 .....	10
1. 무한증배계수와 냉각재 기포반응도 .....	10
2. 핵연료 온도변화계수 .....	14
3. 냉각재 온도변화계수 .....	15
4. 감속재 온도변화계수 .....	17
제 4 장 결론 및 향후 연구 방향 .....	20

감사의 글 .....	21
참고문헌 .....	20
부록 I 입력 데이터	
A. POWDERPUFS-V 입력 데이터 .....	22
B. WIMS-AECL 입력 데이터 .....	23
C. WIMS-D5 입력 데이터 .....	26
부록 II 코드의 계산 결과	
A. POWDERPUFS-V 코드의 계산 결과 .....	29
B. WIMS-AECL 코드의 계산 결과 .....	30
C. WIMS-D5 코드의 계산 결과 .....	31





# CONTENTS

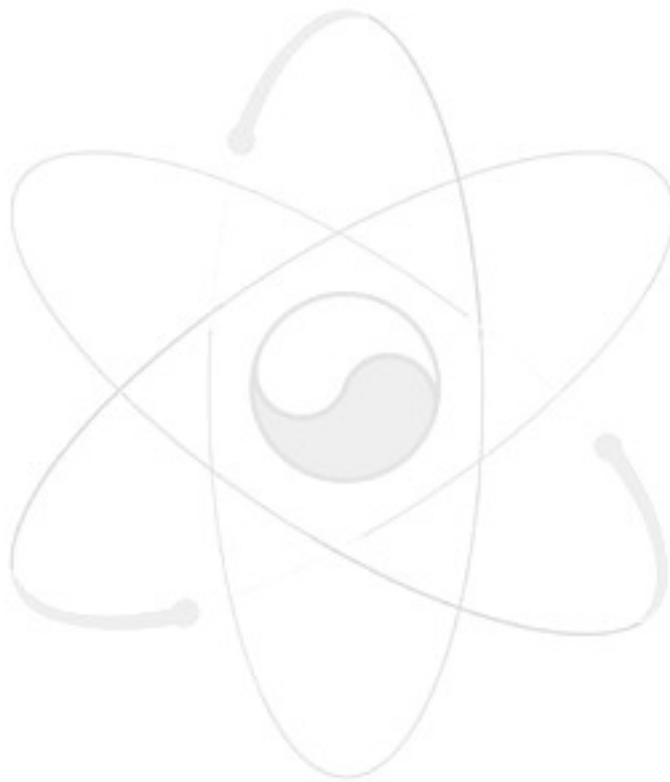
Summary .....	iv
Contents .....	viii
List of tables .....	x
List of figures .....	xi
Chapter 1. Introduction .....	1
Chapter 2. Calculation procedures .....	2
Section 1. Codes and libraries .....	2
1. POWDERPUFS-V(PPV) .....	2
2. WIMS .....	2
(A) WIMS-D5 .....	3
(B) WIMS-AECL(2-5d) .....	3
Section 2. Input data for WIMS and PPV model .....	4
Section 3. Modeling in PPV and WIMS code .....	5
1. Density of nuclear fuel .....	5
2. Compositions .....	6
3. Power and Endregion .....	7
Chapter 3. Calculation on PHWR CANDU .....	9
Section 1. CANDU lattice model .....	9
Section 2. Calculation method .....	10
Section 3. Calculation results and discussion .....	10
1. Infinite multiplication constant and Coolant Void Reactivity .....	10
2. Fuel Temperature Coefficient .....	14
3. Coolant temperature Coefficient .....	15
4. Moderator Temperature Coefficient .....	17
Chapter 4. Conclusions and future plan .....	20
Acknowledgements .....	21
References .....	20

Appendix I Input data

A. Input data for POWDERPUFS-V .....	22
B. Input data for WIMS-AECL .....	23
C. Input data for WIMS-D5 .....	26

Appendix II Calculation results

A. Calculation results of POWDERPUFS-V Code .....	29
B. Calculation results of WIMS-AECL code .....	30
C. Calculation results of WIMS-D5 code .....	31



## 표 목 차

표 2-1	WIMS와 PPV 모델 입력 값 사이의 관계 .....	4
표 2-2	우라늄의 질량과 weight percent .....	6
표 2-3	CANDU 격자와 구성 물질 .....	6
표 2-4	CANDU의 출력과 ENDREGION .....	8
표 3-1	CANDU 격자 셀 .....	9
표 3-2	0% Void 경우: 연소도에 따른 무한증배계수 .....	11
표 3-3	100% Void 경우: 연소도에 따른 무한증배계수 .....	12
표 3-4	무한증배계수의 Over prediction( $\Delta k_{inf}$ ) .....	13
표 3-5	연소도에 따른 냉각재 기포 반응도 .....	14
표 3-6	연소도에 따른 핵연료 온도변화계수 .....	15
표 3-7	연소도에 따른 냉각재 온도변화계수 .....	17
표 3-8	연소도에 따른 감속재 온도변화계수 .....	18

## 그림 목 차

그림 3-1	CANDU 격자 단면 .....	9
그림 3-2	연소도에 따른 무한증배계수의 변화 (0% Void의 경우) .....	11
그림 3-3	연소도에 따른 무한증배계수의 변화 (100% Void의 경우) .....	12
그림 3-4	무한증배계수의 Over Prediction $\Delta k_{inf}$ (PPV-WIMS/AECL, PPV-WIMS/D5) .....	13
그림 3-5	연소도에 따른 냉각재 기포반응도 .....	14
그림 3-6	연소도에 따른 핵연료 온도변화계수 .....	15
그림 3-7	연소도에 따른 냉각재 온도변화계수 .....	16
그림 3-8	연소도에 따른 냉각재 온도변화계수 차이의 변화 .....	17
그림 3-9	연소도에 따른 감속재 온도변화계수 .....	18
그림 3-10	연소도에 따른 감속재 온도변화계수 차이의 변화 .....	19

## 제 1 장 서 론

중수로 노심은 양의 기포반응도를 가지고 있으므로 대형 냉각재 상실사고 (LOCA) 시 노심출력이 급격히 증가한다. 따라서 핵연료와 핵연료 채널의 건전성에 대한 허용기준이 적절하다는 것을 확신하기 위해서는 안전계통의 성능에 대한 건전성을 검증해야 하고, 그의 건전성을 확인하기 위한 안전해석은 출력펄스의 수치적 모사를 통해 이루어진다. 따라서 안전해석 시 보수적인 방법으로 양의 기포반응도 계수를 고려해야 하며, 이 계수에 대한 정확도 평가가 요구된다. 현재 원자로 내의 운전 조건과 연소도에 따른 실험자료의 부족으로 기포 반응도에 관한 오차가 잘 정의되지 않아 현재의 이론 모델과 컴퓨터 코드의 검증에 문제가 따르고 있다. 따라서 원자로 설계 및 해석에서 기포반응도 계산은 충분한 신뢰도를 확보해야하며 이를 위한 실험자료의 평가도 요구된다. 본 연구의 최종 목표는 기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가와 냉각재 상실사고 시 기포 반응도 계산 체계의 개선을 통한 중수로 안전해석 체계의 구축이다.

본 연구에서는 격자 코드인 POWDERPUFS-V, WIMS-AECL과 WIMS-D5를 사용하여 중수로 격자의 물리적 변수들을 계산하고 각 코드들의 차이점을 비교 검토한다. 이를 기초로 기포반응도를 고려한 노심 해석코드로 WIMS-D5로의 체계 개선을 모색하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서 POWDERPUFS-V코드, WIMS-AECL 코드와 WIMS-D5 코드를 이용해 같은 입력 데이터에 대한 격자계산을 통해 차이점을 비교 검토하고 문제점을 도출하고 그 문제점을 개선하고자 한다. 격자 계산을 위한 모델은 CANDU (Canadian deuterium uranium) 중수 원자로를 사용하였고 코드는 POWDERPUFS-V, 89군 라이브러리 ENDF/B-VI를 갖춘 WIMS-AECL(2-5d) 과 69군 라이브러리 ENDF/B-VI를 갖춘 WIMS-D5를 사용하였다.

제 2 장에서는 코드와 계산 수행 시 사용되는 라이브러리에 대해 설명하였고, WIMS 코드와 POWDERPUFS-V 코드 사이의 입력 데이터가 동일하도록 모델링하였다. 그리고 제 3 장에서는 CANDU 원자로의 격자특성에 대하여 POWDERPUFS-V, WIMS-AECL과 WIMS-D5 코드 등을 통하여 코드평가를 수행하였다. 제 4 장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

## 제 2 장 계산 방법

### 제 1 절 코드와 라이브러리

WIMS(Winfrith Improved Multigroup Scheme) 코드는 영국에서 개발되어 계속 개량되고 있으며, 캐나다에서는 독자적으로 WIMS-D4를 기반으로 하여 WIMS-AECL을 개발하여 중수형 원자로인 CANDU의 격자계산에 적용하고 있다. 현재의 CANDU 원자로의 노심 설계는 격자코드로 POWDERPUFS-V(PPV)를 사용하고 있지만 연소된 핵연료에 대한 불확실도가 많이 내포되어 있어 현재 AECL에서는 설계 및 안전해석을 위하여 WIMS-AECL을 사용하고 있고 최근에는 PPV를 WIMS-AECL로 대체하여 사용하고 있다.

#### 1. POWDERPUFS-V

격자 코드 POWDERPUFS-V(PPV)는 CANDU 격자 계산을 위한 코드이다. 이 코드는 국내에서 월성 원자로의 설계 시 사용되었으며, 반응 단면적, 동위원소의 구성비, 핵연료 다발내의 출력 분포, 반응도와 연소에 따른 격자 파라미터를 계산하기 위해 사용한다. 계산된 격자 파라미터는 노심 계산과 핵연료 관리에 사용된다. PPV 코드는 코드에서 사용하는 모든 경험에 의한 관계식들은 연소되지 않은 새로운 핵연료에 대한 실험을 통하여 만들어 졌으므로 CANDU 격자 타입을 가진 새 핵연료에 적합하다. 따라서 사용되는 감속재는 순도가 높은 중수로 제한되는 반면, 냉각재는 경수, 중수, air와 HB-40이 사용될 수 있다. 핵연료는 단일봉이나 다발의 형태로  $UO_2$ , U,  $U_3Si$ , U-Zr이 사용되고 구조물(structural material)로는 알루미늄과 지르칼로이 합금(Zr-Alloy)으로 제한된다.

#### 2. WIMS

WIMS는 확률론적 충돌(Collision Probability) 이론을 이용하여 2차원 공간에서의 다군 중성자 수송방정식(Multigroup Neutron Transport Equation)을 푸는 결정론적(Deterministic) 코드이다. 코드 계산 결과에 대한 불확실성은 계산하는 방법보다는 핵자료에 있다. 따라서 정확한 원자로 계통해석을 위해 핵자료의 평가가 선행

되어야 한다. 현재 ENDF(Evaluated Nuclear Data Files)는 계속 개선되고 있으며 코드 계산에서 이용되는 라이브러리는 중성자의 반응 단면적을 나타내는 연속적인 에너지를 그룹으로 나누어 평균값을 사용한다. WIMS 코드는 3차원 모델의 경계조건을 이용하여 2차원이나 1차원으로 가정하여 계산하며 모델을 비연속적인 영역으로 나누어 중성자속을 계산한다. 또한 비연속적인 에너지 군과 공간에서의 중성자속을 이용하여 연소도에 따른 동위원소들의 수밀도와 고유치( $k_{inf}$  or  $k_{eff}$ )를 계산한다.

#### (가) WIMSD-5

WIMSD-5B는 1998년 OECD/NEA Data Bank로부터 개방된 코드이다. WIMS-D5에서 사용하는 중성자군은 69그룹과 172그룹의 에너지 그룹으로 구성되어 있다. 라이브러리는 2002년 5월에 완성된 [WIMS-D Library Update : WLUP]을 사용하고 있다. WLUP은 IAEA/ICTP 참석자들이 수행한 다군 원자핵 자료 보완 프로젝트의 일환으로 ENDF/B-VI를 기반으로 완성된 것이다.

#### (나) WIMS-AECL(2-5d)

WIMS-AECL(2-5D)은 AECL에서 중수로 격자계산에 적합하도록 WIMS-D4를 기반으로 개발한 코드이다. WIMS-D4를 기본으로 하고 있기 때문에 WIMS-D5와 유사한 점이 많으며 수송 이론(Transport Theory)을 사용하며, 89 에너지 그룹의 ENDF/B-VI 라이브러리를 이용한다. 이 라이브러리는 최근에 ENDF/B-VI 데이터 파일(Release 5)과 NJOY97 코드를 이용하여 생성되었으며 핵연료의 피복재와 압력관, 그리고 칼란드리아관의 구성 물질인 지르코늄 동위원소에 대한 Resonance 단면적이 개선되었다. 그리고 WIMS-AECL 코드는 격자의 누설(leakage)에 영향을 미치는 평균 수송 거리(mean-free-path)가 큰 영역에서의 분산계수 계산의 정확성을 높였으며 잉여 반응도가 낮은 격자에 대한 임계 베클링 값의 계산의 정확도를 높였다. ENDF/B-VI 라이브러리는 AECL에서 CANDU 격자계산을 위하여 작성한 라이브러리로 압력관이나 칼란드리아관 등의 구성원소가 동일한 경우에도 원소가 이루고 있는 구조물에 대해서 구분하여 작성되었다. 또한 냉각재나 감속재의 경우도 분자단위의 핵자료를 구성하고 있고 산소와 같이 동위원소가 존재하는 원소의 경우에도 동위원소별로 핵자료가 구성되어 있다. WIMS-AECL은 격자계산 후에 노심계산에 사용되는 코드와의 연계를 위하여 출력파일을 포트란 형식의 TAPE 16으로 저장

한다.

## 제 2 절 격자 코드 WIMS와 PPV 모델의 입력 데이터

격자 코드를 사용한 계산 결과의 오차를 최소화하여 비교 검토하기 위해서는 같은 입력 값을 준비하는 작업은 중요하다. WIMS와 PPV 코드의 모델은 크게 압력관의 내부와 외부로 나누어 생각할 수 있다. WIMS와 PPV에서 다루는 모델의 압력관, 공극(air gap), 칼란드리아관, 감속재의 기하학적인 형상은 동일하며, 튜브의 구성물질은 PPV보다 WIMS에서 실제에 가깝게 다루어진다.

압력관의 내부에 대해 PPV와 WIMS의 모델링은 다르다. 먼저 두 코드에서 다루는 핵연료의 질량과 구조물(지르코늄 합금)의 질량은 같아야 한다. PPV의 입력 데이터를 R000(1)~R000(90)이라 할 때 두 코드, PPV와 WIMS의 입력값의 관계는 다음과 같다.

표 2-1 WIMS와 PPV 모델 입력값 사이의 관계

다발의 길이	$L_b = R000(46)$
핵연료의 부피	$V_f = R000(18) \times L_b$
Void의 부피	$V_v = R000(17) \times L_b$
냉각재의 부피	$V_c = R000(28) \times L_b$
지르코늄의 부피	$V_{zr} = R000(19) \times L_b$
핵연료의 외부 반경	$R_f = R000(12) / \{R000(72) \times \pi \times 2\}$
핵연료 Stack의 길이	$L_f = V_f / \{R_f^2 \times \pi \times R000(72)\}$
다발내 endregion의 길이 비	$F_e = (L_b \cdot L_f) / L_b$
핵연료와 피복재 사이의 부피	$V_{fc} = V_v - L_b \times F_e \times F_g \times \pi \times R000(22)^2$
피복재의 내부 반경	$R_g = \{(V_{fc} + V_f) / (L_f \times \pi \times R000(72))\}^{(1/2)}$
피복재의 부피	$V_{cl} = V_{zr} - L_b \times F_e \times F_{zr} \times \pi \times R000(22)^2$
피복재 외부 반경	$R_{cl} = \{(V_{fc} + V_f + V_{cl}) / (L_f \times \pi \times R000(72))\}^{(1/2)}$
핵연료의 밀도	$\rho_f = R000(6)$

\*  $F_g = V_v / \{V_f + V_{zr} + V_v + V_c\}$

\*  $F_{zr} = V_{zr} / \{V_f + V_{zr} + V_v + V_c\}$



핵연료와 피복재 사이의 공극은 WIMS의 계산에서는 피복재의 밀도를  $(R_{cl}-R_g)/(R_{cl}-R_f)$  만큼 낮춤으로서 공극이 없는 것으로 가정하여 계산하였다. 실제로 핵연료와 피복재 사이의 물질은 원자로의 물리적 현상에 중요한 영향을 미치지 못하며, WIMS 코드에서 2차원 중성자속(Neutron Flux)의 분포를 알기 위해 사용되는 확률론적 충돌(Collision Probability) 이론은 핵연료와 피복재 사이 영역에 대한 정확한 결과를 주지 못한다.

WIMS와 노심계산에서의 핵연료 출력 비율(Fuel Power Rating)은 보존되어야 한다. 따라서 핵연료의 길이에 대한 유효 출력 비율  $R_e(W/cm)$ 는  $1000 \times R000(42) \times R000(60)/R000(43)$ 으로 계산된다.

압력관의 구성 물질인 Zr-2.5%Nb에 대해 WIMS에서는 Fe, Cr, Ni, Nb과 Zr은 정확하게 표시되었고, 그 밖의 다른 동위원소는 같은 열중성자 흡수 단면적을 갖는  $B^{10}$ 으로 나타내었다. 밀도는 지르코늄(Zirconium metal)의 밀도  $6.506g/cm^3$ 를 기준으로 불순물을 고려하여 계산되었다. 칼란드리아관과 피복재에 대해서도 같은 방법으로 계산되었다.

### 제 3 절 PPV와 WIMS 코드의 모델링

#### 1. 핵연료의 밀도

핵연료 다발의 길이는 49.53cm로, 핵연료 stack의 길이는 48cm로 계산하였다. 하나의 다발에 있는 우라늄(U)의 질량은 19033g으로, 따라서  $UO_2$ 의 질량은 21591.0g으로 계산하였다.

$$(1) \text{ Fuel의 부피: } 37 \times \pi R_f^2 \times l = 37 \times \pi (0.61)^2 \times 48 = 2076.12 \text{ cm}^3$$

(  $R_f$  : 펠렛의 반경     $l$  : 핵연료 Stack의 길이 )원자의 질량과 weight percent

(2) 원자의 질량과 weight percent

표 2-2 우라늄의 질량과 weight percent

원 소	질량	Weight percent in U	Weight (=19033×w/o)
U <sup>234</sup>	234.0406	0.005408 w/o	1.029
U <sup>235</sup>	235.043923	0.710972 w/o	135.32
U <sup>238</sup>	238.050784	99.28362 w/o	18896.65
O <sup>16</sup>	15.9949147		2557.932

\* O의 무게: {19033/(0.00005408×234.0406 + 0.00710972×235.043923 + 0.9928362  
×238.050784)}×2×15.9949147 = 2557.932 g

\* UO<sub>2</sub> 무게: 19033+2557.932 = 21590.93 g

(3) UO<sub>2</sub> 밀도

UO<sub>2</sub>의 무게/핵연료의 부피 = 10.40 g/cm<sup>3</sup>

2. 구성물질

PPV와 WIMS 코드에서 사용한 CANDU 격자에 대한 구성물질에 대한 구체적인 입력 값들이다.

표 2-3 CANDU 격자와 구성물질

		설 명	비 고	
			PPV	WIMS
핵연료	구성 물질	UO <sub>2</sub> (천연 우라늄) 온도: 960.0 K 밀도: 10.40 g/cm <sup>3</sup> 하나의 다발에 있는 U의 질량: 19033 g (UO <sub>2</sub> 질량: 21591.0 g) U <sup>234</sup> : 0.005408 % U <sup>235</sup> : 0.0710972 % U <sup>238</sup> : 99.28362 %		
	형상	펠렛의 반경: 0.61 cm Stack의 길이: 48 cm		

표 2-3 CANDU 격자와 구성물질

(계속)

		설 명	비 고	
			PPV	WIMS
Cladding	구성 물질	Zircaloy-4 온도: 561.0 K 밀도: 6.5167 g/cm <sup>3</sup> 하나의 다발에 있는 Zircaloy-4의 질량 : 2398.18 g		공극을 고려한 WIMS에 서의 Zr의 밀도 : 6.3918
	형상	Cladding의 내부 반경: 0.6142 cm 외부 반경: 0.66 cm		
냉각재	구성 물질	밀도: 0.807859 온도: 561.0 K 순도: 99.0 Atom% D <sub>2</sub> O 냉각재의 외부반경: 5.1689 cm		
압력관	구성 물질	Zirconium-2.5% Niobium 온도: 561.0 K 밀도: 6.5083 g/cm <sup>3</sup> 외부 반경: 5.6032 cm		WIMS에 서의 밀도 : 6.5041
칼란드 리아관	구성 물질	Zircaloy-2 온도: 342.0 K 외부반경: 6.5875 cm		
감속재	구성 물질	순도: 99.85 Atom% D <sub>2</sub> O 온도: 342.0 K 밀도: 1.08579 g/cm <sup>3</sup>		
Air		하나의 다발에 있는 Void의 부피 : 46.68 cm <sup>3</sup>		

### 3. 출력과 ENDREGION

PPV와 WIMS 코드 계산에서 사용한 CANDU 격자에 대한 출력은 620kW로

계산하였고, 다발의 길이에 대한 ENDREGION의 길이 비는  $(49.53-48)/49.53=0.03089$ 로 계산하였다. 다음은 코드의 계산에 사용한 구체적인 입력 값들이다.

표 2-4 CANDU의 출력과 ENDREGION

펠렛의 개수		37	P O W E R	Max. bundle power	800 W
다발의 길이		49.53 cm		Total power	620 kW
END- REGION	구성 물질	Zirconium alloy, Gas, Coolant		Linear power rating	12904.87 W/cm (=620000W/48cm)
	형상	길이: 1.53 cm 부피: 128.42 cm <sup>3</sup> (= $\pi \times (5.1689)^2 \times 1.53$ )		Power	32.55 W/g (=620000/19033)

### 제 3 장 CANDU-6 원자로에 대한 격자 계산

#### 제 1 절 격자 모델

본 연구의 목적은 같은 입력 값에 대해 격자 코드 WIMS-AECL과 WIMS-D5, 그리고 POWDERPUFS-V(PPV)의 계산 결과를 비교 검토하는 것이다. WIMS-AECL, WIMS-D5를 이용한 격자 계산은 핵연료봉, 피복재, 냉각재, 압력관, 공극(air gap), 칼란드리아관, 감속재 포함하는 모델에 대해 수행되며 CANDU 격자의 기하학적인 형상과 계산 시 사용된 구성 물질은 그림 3-1 및 표 3-1과 같다.

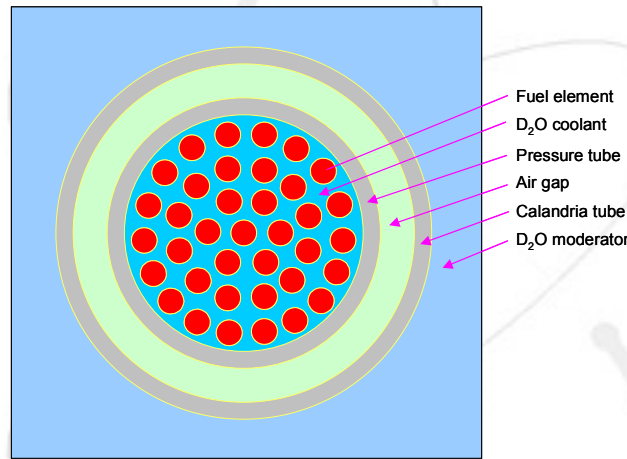


그림 3-1 CANDU-6 격자 단면

표 3-1 CANDU-6 격자

UO <sub>2</sub> 펠렛의 반경	0.610 cm	압력관의 내부 반경	5.1689 cm
피복재 바깥쪽 반경	0.660 cm	압력관의 외부 반경	5.6032 cm
6개 펠렛 링의 각도	0 rad	공극(air gap)	CO <sub>2</sub>
6개 펠렛 링의 반경	1.49 cm	칼란드리아관의 내부 반경	6.4478 cm
12개 펠렛 링의 각도	0.2617994 rad	칼란드리아관의 외부 반경	6.5875 cm
12개 펠렛 링의 반경	2.875 cm	냉각재 밀도/온도(K)	0.807859/560.0
18개 펠렛 링의 각도	0 rad	감속재 밀도/온도(K)	1.085089/342.0

## 제 2 절 CANDU 격자 계산 방법

본 연구에서는 WIMS-D5, WIMS-AECL 및 PPV 코드를 사용하여 CANDU 원자로의 격자특성 중 무한증배계수, 냉각재 기포반응도와 핵연료·냉각재·감속재 온도 변화계수를 비교 분석하여 격자 코드를 평가하고자 한다. WIMS-AECL의 격자 계산에는 89 에너지군 ENDF/B-V 라이브러리를 사용하였고, WIMS-D5의 격자 계산에는 69 에너지군 ENDF/B-VI 라이브러리를 사용하여 수행하였다. 격자계산을 위한 모델은 천연우라늄 핵연료, 피복재, 냉각재, 압력관, 칼란드리아관과 감속재 등으로 구성되었으며, 효율적인 계산을 위해 33군 축약이론을 사용하였다.

## 제 3 절 계산 결과 및 논의

### 1. 무한증배계수와 냉각재 기포반응도

CANDU 원자로의 격자특성 중 냉각재 기포반응도의 변화율을 검토하기 위해 기포분율 0%와 100%인 경우의 무한증배계수를 계산하였다. 이 계산은 WIMS-AECL 코드의 89 에너지군, WIMS-D5 코드의 69 에너지군 ENDF/B-VI 핵단면적 자료를 사용하였다. 계산 결과는 그림 3-2, 3-3, 3-4와 표 3-2, 3-3, 3-4에서 보는 바와 같이 기포분율이 0%와 100%인 경우 연소가 진행됨에 따라 무한증배계수가 PPV보다 WIMS-D5, WIMS-AECL에서 낮게 나타남을 알 수 있다.

기포분율이 0%인 경우는 PPV를 기준으로 WIMS-AECL은 초기에 23mk 높게, WIMS-D5는 4.8mk 높게 예측한다. 연소가 진행됨에 따라 4000MWD/T일 때, WIMS-AECL과 WIMS-D5는 PPV 보다 각각 20.8mk, 26.4mk 낮게 예측한다. Exit 연소도 8000MWD/T일 때는 PPV보다 WIMS-AECL은 8.9 mk 낮게 예측하고, WIMS-D5는 15mk 낮게 예측한다. 이 결과로부터 격자 코드 POWDERPUFS-V와 비교할 때, WIMS-AECL과 WIMS-D5에 의한 결과가 과소 평가되고 있음을 알 수 있다. (그림 3-2, 표 3-2, 그림 3-4, 표 3-4)

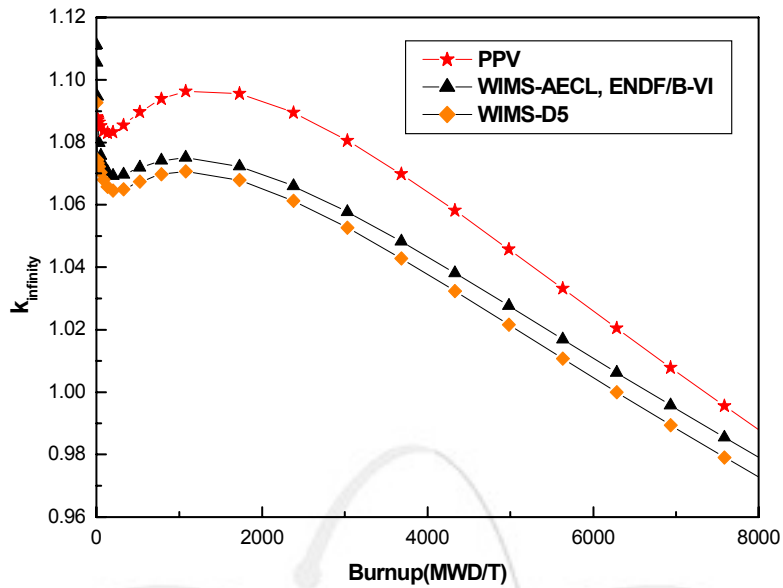


그림 3-2 연소도에 따른 무한증배계수의 변화  
(0% Void의 경우)

표 3-2 0% Void 경우: 연소도에 따른 무한증배계수

Burnup (MWD/T)	WIMS-AECL (k)	WIMS-D5 (k)	PPV (k)	Difference(%)	
				WIMS-AECL *	WIMS-D5**
0	1.111	1.093	1.088	2.1	0.4
4000	1.043	1.038	1.064	2.0	2.5
8000	0.979	0.973	0.988	0.9	1.5

\* :  $(k_{inf}^{PPV} - k_{inf}^{WIMS-AECL}) / k_{inf}^{PPV} \times 100$

\*\* :  $(k_{inf}^{PPV} - k_{inf}^{WIMS-D5}) / k_{inf}^{PPV} \times 100$

기포분율이 100%인 경우는 PPV를 기준으로 WIMS-AECL은 초기에 24.7mk 높게, WIMS-D5는 4.3mk 높게 예측하며, 연소가 진행됨에 따라 4000MWD/T일 때, WIMS-AECL과 WIMS-D5는 PPV 보다 각각 17.4mk, 24.5mk 낮게 예측한다. Exit 연소도 8000MWD/T일 때는 PPV보다 WIMS-AECL은 4.26mk 낮게 예측하고,

WIMS-D5는 11.2mk 낮게 예측한다. 이 결과로부터 격자 코드 POWDERPUFS-V와 비교할 때, WIMS-AECL과 WIMS-D5의 결과가 과소 평가되고 있음을 알 수 있다. (그림 3-3, 표 3-3, 그림 3-4, 표 3-4)

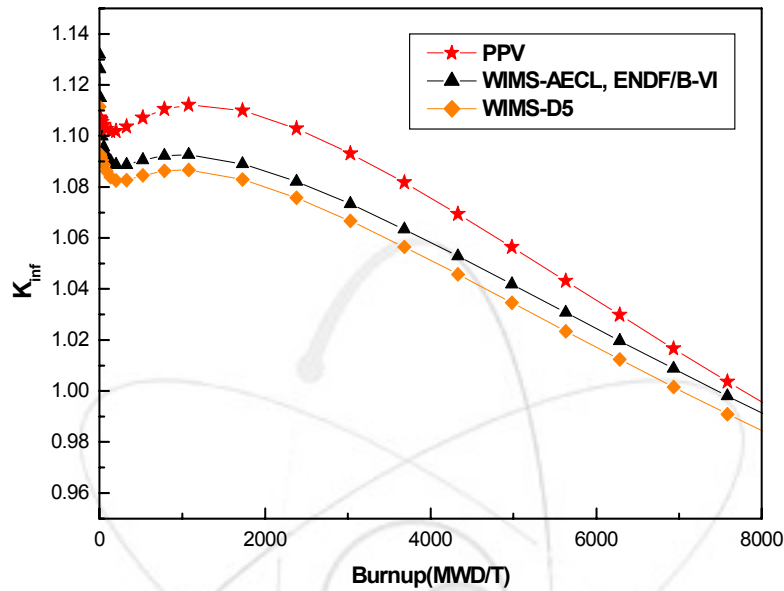


그림 3-3 연소도에 따른 무한증배계수의 변화  
(100% Void의 경우)

표 3-3 100% Void 경우: 연소도에 따른 무한증배계수

Burnup (MWD/T)	WIMS-AECL (k)	WIMS-D5 (k)	PPV (k)	Difference(%)	
				WIMS-AECL*	WIMS-D5**
0	1.132	1.112	1.107	2.2	0.4
4000	1.058	1.051	1.076	1.6	2.2
8000	0.991	0.985	0.996	0.4	1.1

\* :  $(k_{inf}^{PPV} - k_{inf}^{WIMS-AECL}) / k_{inf}^{PPV} \times 100$

\*\* :  $(k_{inf}^{PPV} - k_{inf}^{WIMS-D5}) / k_{inf}^{PPV} \times 100$



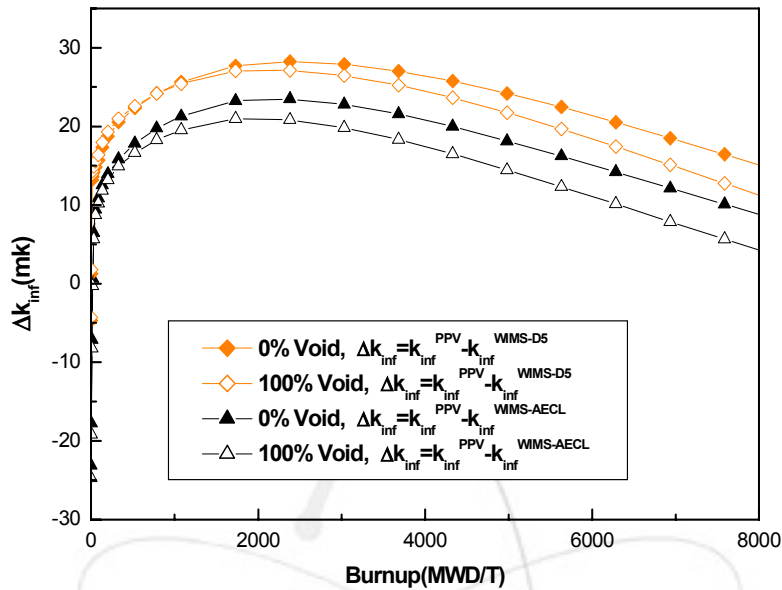


그림 3-4 무한증배계수의 Under Prediction  $\Delta k_{inf}$   
(PPV-WIMS/AECL, PPV-WIMS/D5)

표 3-4 무한증배계수의 Under prediction( $\Delta k_{inf}$ )

Burnup (MWD/T)	Cooled Lattices $\Delta k_{inf}$ (mk)		Voided Lattices $\Delta k_{inf}$ (mk)	
	PPV-WIMS/AECL	PPV-WIMS/D5	PPV-WIMS/AECL	PPV-WIMS/D5
0	-23.1	-4.7	-24.7	-4.3
4000	20.8	26.4	17.4	24.5
8000	8.8	15.1	4.3	11.2

냉각재 기포 반응도는 100% Void의 상태를 냉각재의 밀도가  $0.807859 \times 0.0001$ 라 가정하여 계산하였다. 연소 초기에 WIMS-AECL은 PPV 보다 0.6mk 높게, WIMS-D5는 PPV보다 0.5mk 낮게 예측하지만 4000MWD/T에서 WIMS-AECL, WIMS-D5는 PPV보다 각각 3.4mk, 2.3 mk 높게 예측한다. 연소가 진행됨에 따라 PPV와의 차이는 점점 커짐을 알 수 있다. (그림 3-5, 표 3-5)

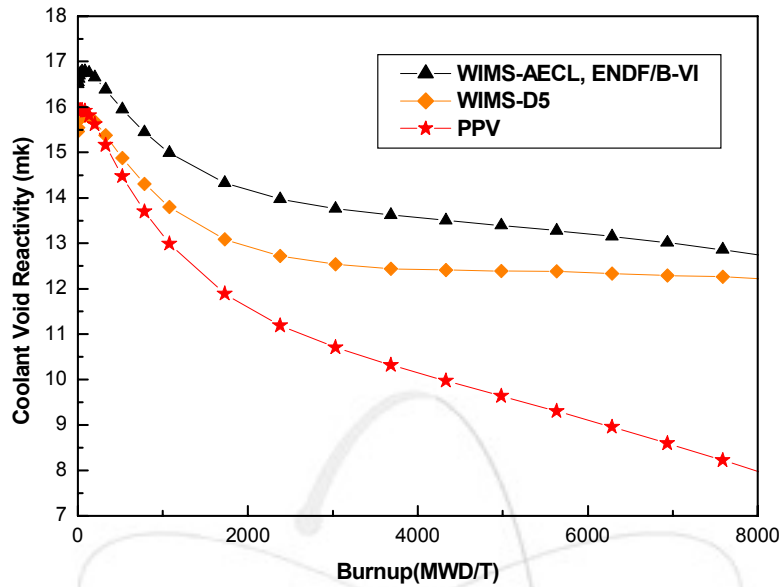


표 3-5 연소도에 따른 냉각재 기포 반응도

Burnup (MWD/T)	PPV (mk)	WIMS-AECL (mk)	WIMS-D5 (mk)	Difference(%)	
				(AECL-PPV)/PPV	(D5-PPV)/PPV
0	15.92	16.50	15.46	3.7	-2.9
4000	10.15	13.57	12.42	33.7	22.4
8000	7.98	12.75	12.22	59.8	53.2

## 2. 핵연료 온도변화계수

중수로에서 핵연료 온도 변화계수는 경수로에 비해 상대적으로 긴 열중성자의 분산시간 때문에 원자로 출력을 크게 증가시키지 못하므로 안전에 영향을 주는 변수는 아니지만 노심의 물리적 특성을 결정짓는 요소이다. 따라서 CANDU 원자로의 격자특성을 보기 위해 핵연료의 온도를 각각  $960.0 \pm 50K$ 로 변화시키면서 핵연료 온도 변화계수를 계산하였다. 계산 결과는 아래의 그림 3-6과 표 3-6에서 보는 바와

같이 WIMS-AECL과 WIMS-D5가 PPV보다 핵연료 온도 변화계수를 높게 예측한다. 초기에는 WIMS-AECL과 WIMS-D5가 각각 0.003mk, 0.002mk 높게 예측하지만, 연소가 진행됨에 따라 두 코드 사이의 값의 차이가 점점 커짐을 볼 수 있다.

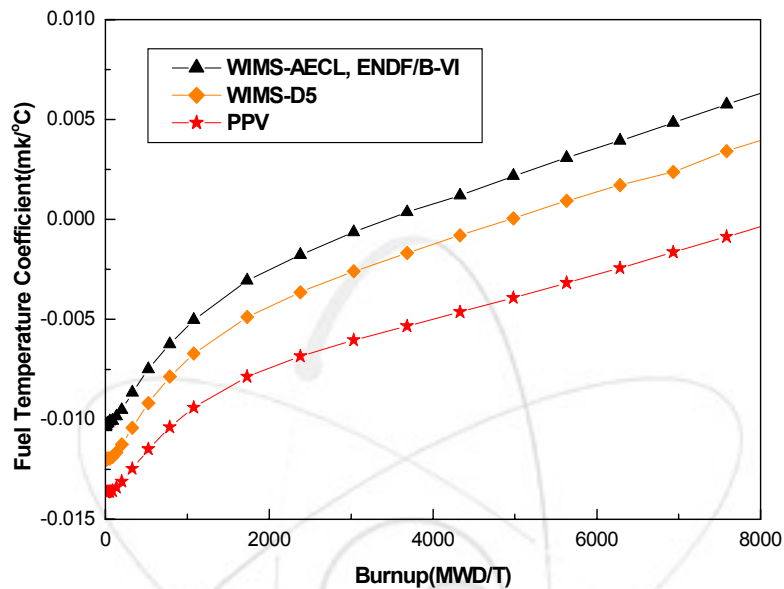


표 3-6 연소도에 따른 핵연료 온도변화계수

Burnup (MWD/T)	PPV (mk/°C)	WIMS-AECL (mk/°C)	WIMS-D5 (mk/°C)	Difference (mk)	
				WIMS/AECL-PPV	WIMS/D5-PPV
0	-0.014	-0.010	-0.012	0.004	0.002
4000	-0.005	0.000	-0.001	0.006	0.004
8000	-0.000	0.006	0.004	0.006	0.004

### 3. 냉각재 온도변화계수

중수로에서 냉각재가 상실되면 노심에 양의 기포반응도가 주입되므로 원자로의 출력은 급격히 증가하게 된다. 천연우라늄을 핵연료로 사용하는 중수로 CANDU

는 양의 기포반응도를 가지고 있으므로 대형 냉각재 상실사고 시 과도출력을 생성한다. 따라서 기포반응도는 원자로의 출력을 결정하는 중요한 변수이고 그 크기에 따라 원자로와 핵연료의 안전성이 결정되므로 설계기준사고 해석에서 그에 대한 신뢰도가 확보되어야 한다.

CANDU 격자 내의 냉각재 온도는  $561.0 \pm 10\text{K}$ 로, 밀도는 각각  $0.807859 \times 0.972470$ ,  $0.807859 \times 1.025608$ 로 하고 격자코드 PPV, WIMS-AECL과 WIMS-D5를 이용하여 냉각재 온도변화계수를 구하여 비교하였다. 계산 결과 그림 3-7, 표 3-7 및 그림 3-8에서 보는 바와 같이 WIMS-AECL과 WIMS-D5이 PPV 보다 냉각재 온도변화계수를 높게 예측한다. 초기 운전 시 WIMS-AECL이 약 0.015mk 높게, WIMS-D5가 0.007mk 높게 예측하지만 연소가 진행됨에 따라 그 차이는 점점 적어져 8000 MWD/T에서 WIMS-AECL은 0.007mk 높게, WIMS-D5는 0.006mk 높게 예측한다. 연소가 진행됨에 따른 냉각재 온도변화계수의 차이에 대해서는 그림 3-8을 보면 알 수 있다.

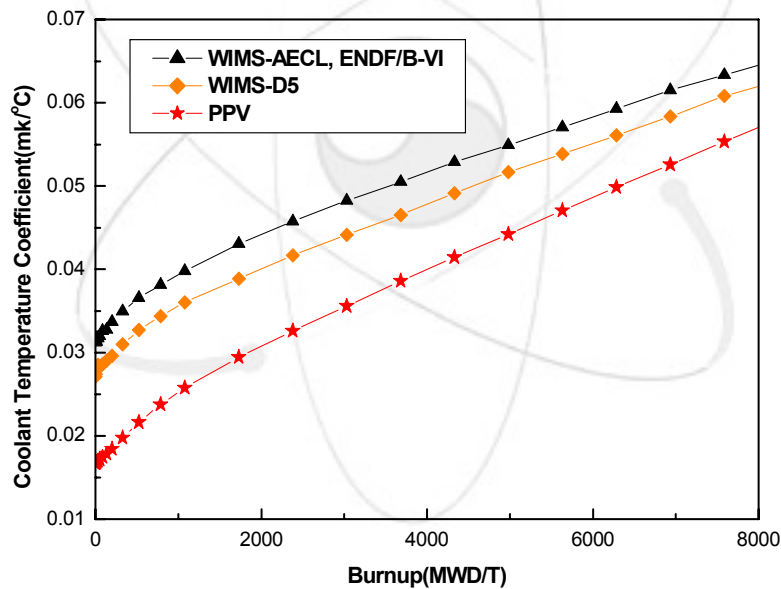


표 3-7 연소도에 따른 냉각재 온도변화계수

Burnup (MWD/T)	PPV (mk/°C)	WIMS-AECL (mk/°C)	WIMS-D5 (mk/°C)	Difference (%)	
				(AECL-PPV)/PPV	(D5-PPV)/PPV
0	0.017	0.031	0.024	86.8	44.3
4000	0.040	0.052	0.047	29.2	19.5
8000	0.057	0.064	0.063	13.1	10.4

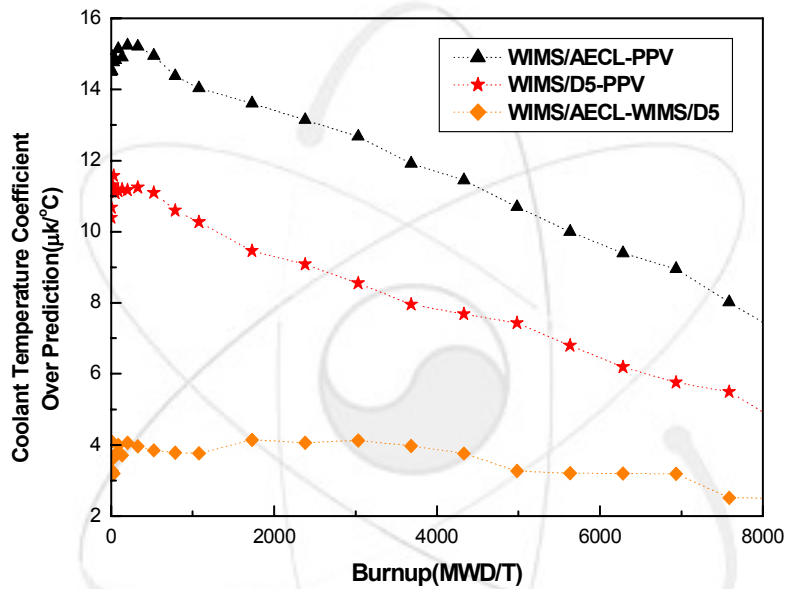


그림 3-8 연소도에 따른 냉각재 온도변화계수차이의 변화

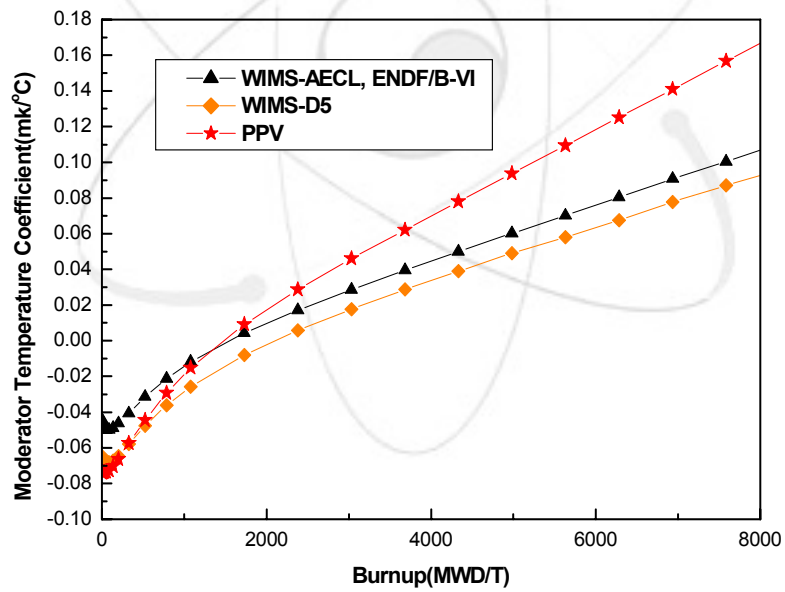
#### 4. 감속재 온도변화계수

CANDU의 격자특성을 결정하는 변수 중 감속재 온도변화계수를 WIMS-AECL과 WIMS-D5, PPV를 사용해 계산하였다. 감속재의 온도를  $342.00 \pm 10K$ , 밀도를 각각  $1.085089 \times 0.993998$ ,  $1.085089 \times 1.005365$ 로 하여 계산한 결과 표 3-8, 그림 3-9 및 그림 3-10에서 보는 바와 같이 WIMS-D5와 WIMS-AECL이 초기 상태에서는 PPV 보다 각각 0.009mk, 0.03mk 높게 예측하지만, 4000 MWD/T일 때 각각 0.036mk, 0.025mk 낮게 예측한다. 연소가 진행됨에 따라 WIMS-AECL, WIMS-D5와 PPV의 차이는 점점 커짐을

알 수 있다.

표 3-8 연소도에 따른 감속재 온도변화계수

Burnup (MWD/T)	PPV (mk/°C)	WIMS-AECL (mk/°C)	WIMS-D5 (mk/°C)	Difference(mk)	
				WIMS/AECL-PPV	WIMS/D5-PPV
0	-0.074	-0.044	-0.065	0.030	0.009
4000	0.070	0.045	0.034	-0.025	-0.036
8000	0.167	0.107	0.093	-0.060	-0.074



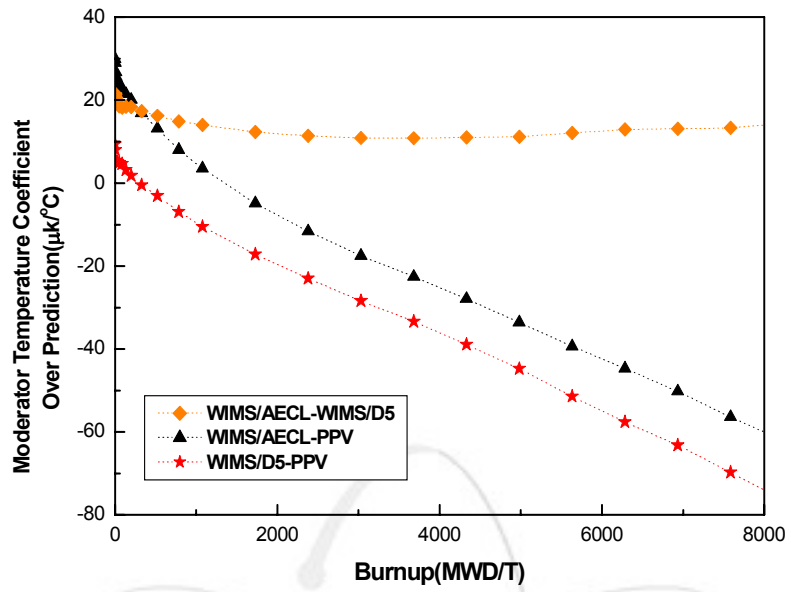


그림 3-10 연소도에 따른 감속재 온도변화계수 차이의 변화

## 제 4 장 결론 및 향후 연구 방향

POWDERPUFS-V, WIMS-D5와 WIMS-AECL를 사용해 냉각 상태와 기포 상태에서의 무한증배계수, 기포반응도, 핵연료 온도변화계수, 냉각재 온도변화계수, 감속재 온도변화계수를 비교하였다. 계산 결과는 다음과 같다.

연소도	무한증배계수(k)		기포반응도(mk)		핵연료 온도변화계수(mk)		냉각재 온도변화계수(mk)		감속재 온도변화계수(mk)	
	PPV -AECL	PPV -D5	PPV -AECL	PPV -D5	PPV -AECL	PPV -D5	PPV -AECL	PPV -D5	PPV -AECL	PPV -D5
0	-0.023	-0.009	-0.66	-0.46	-0.004	-0.002	-0.014	-0.007	-0.030	-0.009
4000	0.021	0.027	-3.41	-2.27	-0.006	-0.004	-0.012	-0.008	0.025	0.026
8000	0.009	0.015	-4.77	-4.24	-0.006	-0.004	-0.007	-0.006	0.061	0.074

위의 결과로부터 무한증배계수는 POWDERPUFS-V에 의한 결과가 다른 코드, WIMS-AECL과 WIMS-D5보다 높게 예측됨을 알 수 있다. 그리고 감속재 온도변화계수를 제외하고 핵연료 온도변화계수, 냉각재 온도변화계수, 그리고 기포 반응도는 연소가 진행됨에 따라 POWDERPUFS에 의한 결과가 WIMS-AECL과 WIMS-D5보다 훨씬 낮게 예측됨을 알 수 있다. 이 결과로부터 POWDERPUFS-V가 다른 코드에 비해 냉각재의 100% Void 상태에서의 무한증배계수를 낮게 예측함으로써 기포반응도가 적게 나타남을 알 수 있다.

따라서 정확한 방법론에 대한 포괄적이고 체계적인 검증과정을 통해 적절한 기포 반응도 오차 허용범위(VREA)를 얻기 위한 근거를 마련하기 위해 격자 셀과 핵자료 라이브러리에 대한 평가가 필요하다. 그리고 핵연료와 핵연료 채널의 건전성에 대한 허용기준이 적절하다는 것을 확신하기 위해서는 안전계통의 성능의 건전성을 검증해야 하고, 그의 건전성을 확인하기 위한 안전해석은 출력펄스의 수치적 모사를 통해 이루어지므로 WIMS-D5를 통한 격자계산과 CATHENA를 연계해 출력펄스의 모사와 정지계통의 건전성을 검증하고자 한다.



## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 수행되었다.

## 참고문헌

- [1] E.S.Y. Tin and P.C. Loken, "POWDERPUFS-V Physics Manual", TDAI-31 part 1, AECL, 1979.
- [2] J. Griffiths, "WIMS-AECL Users Manual", RC-1176 COG-94-52, AECL, 1994.
- [3] M.J. Halsall and C.J. Taubman, "WIMSD: A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis", AEA Technology, 1986.
- [4] B. Arsenault, D.A. Jenkins and A.U. Rehman, "RFSP-IST User's Manual", COG-98-272 Rev.0, AECL, 1999.

## 부록 I 입력 데이터

### A. POWDERPUFS-V 입력 데이터

#### 1.0 PPV

196902

0.0	225.0	1.08579	69.0	0.807859
10.400	687.0	152.0	78.0	0.0
30.889670	141.811490	0.4159343	4.0	99.848
40.0	0.642459	41.91642	7.429947	26.1421
4.94353	5.1689	5.6032	6.4478	6.5875
0.0	288.0	33.6467	1.059	28.575
0.0	20.0	70.0	0.0	50.0
0.0	0.9E+14	0.0	0.024	0.0
0.0	16.15	0.95612	0.0	0.001
49.53	0.0	0.0	0.0	2.2303E+21
0.03	99.89	0.01	0.001	8.0
0.0	0.680E-04	0.0	0.001	0.764
0.0	0.0	0.0	0.7204	0.0
99.2796	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0	37.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
0.0	0.0	0.0	3.0	0.0
0.0	314.27	379.73	0.823	2173.0

## B. WIMS-AECL 입력 데이터

@wims

Title "CANDU NU CASE BY WIMS-AECL"

Cell Cluster

Sequence Pij

Scan

Nrods 37 -12

NDAS

Preout

Annulus # 1.4310 Coolant

Annulus # 2.1790 Coolant

Annulus # 2.9260 Coolant

Annulus # 3.6740 Coolant

Annulus # 4.4210 Coolant

Annulus # 5.1689 Coolant

Annulus # 5.3950 PT

Annulus # 5.6032 PT

Annulus # 6.4478 Gap

Annulus # 6.5875 CT

Annulus # 7.1002 Moder

Annulus # 7.6002 Moder

\*

Npijan #

Polygon # 4 Moder 14.2875

\*

Array 1 1 1 0 0 \* central pin

Rodsub 1 1 0.430 Fuel\_1

Rodsub 1 2 0.610 Fuel\_1

Rodsub 1 3 0.660 Clad

\*

Array 2 1 6 1.490 0 \* first ring

Rodsub 2 1 0.430 Fuel\_2

Rodsub 2 2 0.610 Fuel\_2

Rodsub 2 3 0.660 Clad  
 \*  
 Array 3 1 12 2.875 0.261799 \* second ring  
 Rodsub 3 1 0.430 Fuel\_3  
 Rodsub 3 2 0.610 Fuel\_3  
 Rodsub 3 3 0.660 Clad  
 \*  
 Array 4 1 18 4.333 0 \* outer ring  
 Rodsub 4 1 0.430 Fuel\_4  
 Rodsub 4 2 0.610 Fuel\_4  
 Rodsub 4 3 0.660 Clad  
 \*  
 \*Autotrack 0.05  
 Power 1 32.55 0.1 1 \* a nominal bundle rating  
 Buckling 0.412e-4 0.268e-4 0.412e-5 0.268e-5  
 \*Buckling 2.7e-4 2.7e-4 2.7e-5 2.7e-5  
 \*  
 Tolerance 1e-5  
 fewgroups 4 8 12 16 20 22 24 26 28 31 35 39 41 44 47 50 53 56 59 \$  
 62 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85 87 89 \* 33 groups  
 Suppress 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 -1 1 -1  
 \*  
 Water Coolant 0.807859 561.00 Cool dd2o=99.1  
 Water water1 1.085089 342.00 Moder dd2o=99.85  
 Material boron 1.08579 342.00 Moder b10=198.255 b11=889.899  
 Mixture moder water1 1 boron 0.0 342.00 moder  
 Material PT 6.5041 561.00 Moder Nb93=2.58 \$  
 Zr90pt=50.1160 Zr91pt=10.8990 Zr92pt=16.6405 Zr94pt=16.9324 Zr96pt=2.7248 \$  
 Fe54=2.71E-03 Fe56=4.29E-02 Fe57=1.01E-03 Fe58=1.36E-04 \$  
 Cr50=3.52E-04 Cr52=6.78E-03 Cr53=7.68E-04 Cr54=1.91E-04 \$  
 Ni58=2.39E-03 Ni60=9.14E-04 Ni61=3.96E-05 Ni62=1.26E-04 Ni64=3.19E-05 \$  
 B10=0.00002431  
 Material Gap 0.0014 342.00 Moder C=27.11 O16=72.89

Material CT 6.4003 342.00 Moder \$  
Zr90ct=50.5773 Zr91ct=10.9993 Zr92ct=16.7936 Zr94ct=17.0882 Zr96ct=2.7498 \$  
Fe54=7.83E-03 Fe56=1.24E-01 Fe57=2.90E-03 Fe58=3.92E-04 \$  
Cr50=4.35E-03 Cr52=8.38E-02 Cr53=9.50E-03 Cr54=2.36E-03 \$  
Ni58=3.76E-02 Ni60=1.44E-02 Ni61=6.22E-04 Ni62=1.97E-03 Ni64=5.01E-04 \$  
B10=0.00005962

\*

Material Fuel\_1 10.400 960.00 Fuel O16=13.44251 U235=0.710971 \$  
U238=99.28362 U234=0.005408

Material Fuel\_2 Fuel\_1

Material Fuel\_3 Fuel\_1

Material Fuel\_4 Fuel\_1

Material Zr4 6.3918 561.00 clad \$  
Zr90cl=50.5634 Zr91cl=10.9963 Zr92cl=16.7890 Zr94cl=17.0835 Zr96cl=2.7491 \$  
Fe54=1.22E-02 Fe56=1.93E-01 Fe57=4.520E-03 Fe58=6.09E-04 \$  
Cr50=4.35E-03 Cr52=8.38E-02 Cr53=9.50E-03 Cr54=2.36E-03 \$  
Ni58=4.78E-03 Ni60=1.83E-03 Ni61=7.91E-05 Ni62=2.51E-04 Ni64=6.37E-05 \$  
B10=0.00005962 \*Density times 0.9188

Material Clad Zr4

Mixture Endreg zr4=0.33 coolant=0.53 561.16 -cool

\*

Write 1

POWER 1 32.55 0.1 1

Begin

Benoist

Buckling 0.412e-4 0.268e-4 0.412e-5 0.268e-5

beeone 1

Leakage -6

endcap endreg 0.03089 -1 1.18 6

partition 47 89

partition 4 8 12 16 20 22 24 26 28 31 35 39 41 44 47 50 53 56 59 \$

62 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85 87 89 \* 33 groups

Begin

### C. WIMS-D5 입력 데이터

```

CELL          7
SEQUENCE     4
NRODS        37   -12      100   11    4    3    1
NGROUP       33    2
NMESH        34
NREGION      13    6   *16
NMATERIAL    10    4
PREOUT
*
INITIATE
ANNULUS      1    1.4310  10   *COOLANT
ANNULUS      2    2.1790  10   *COOLANT
ANNULUS      3    2.9260  10   *COOLANT
ANNULUS      4    3.6740  10   *COOLANT
ANNULUS      5    4.4210  10   *COOLANT
ANNULUS      6    5.1689  10   *COOLANT
ANNULUS      7    5.3950   6   *PT
ANNULUS      8    5.6032   6   *PT
ANNULUS      9    6.4478   7   *GAP
ANNULUS     10    6.5875   8   *CT
ANNULUS     11    7.1002   9   *MODER
ANNULUS     12    7.6002   9   *MODER
POLYGON     13     4     9   14.2875
NPIJAN     13
*
ARRAY      1  1  1  1e-10  0
ARRAY      2  1  6  1.490  0
ARRAY      3  1 12  2.875  0.261799
ARRAY      4  1 18  4.333  0
*
RODSUB     1  1  0.430  1  *FUEL1

```

RODSUB	1	2	0.610	1	*FUEL1					
RODSUB	1	3	0.660	5	*CLAD					
RODSUB	2	1	0.430	2	*FUEL2					
RODSUB	2	2	0.610	2	*FUEL2					
RODSUB	2	3	0.660	5	*CLAD					
RODSUB	3	1	0.430	3	*FUEL3					
RODSUB	3	2	0.610	3	*FUEL3					
RODSUB	3	3	0.660	5	*CLAD					
RODSUB	4	1	0.430	4	*FUEL4					
RODSUB	4	2	0.610	4	*FUEL4					
RODSUB	4	3	0.660	5	*CLAD					
*										
MATERIAL	1	10.400	960.16	1	6016	13.44251				\$
		2235	0.710971		8238	99.28362				\$
		234	0.005408		*FUEL1					
MATERIAL	2	1	*FUEL2							
MATERIAL	3	1	*FUEL3							
MATERIAL	4	1	*FUEL4							
MATERIAL	5	6.3918	561.16	2	91	98.1	2056	0.21	52	0.1\$
		58	0.007	1010	0.5962E-04					*Cladding
MATERIAL	6	6.5041	342.16	4	91	97.3126	93	2.58		\$
		2056	0.04678	52	0.008088					\$
		58	0.0035	1010	0.00002431					*Pressure tube
MATERIAL	7	0.00198	342.16	4	2012	27.27	6016	72.73		*Gap
MATERIAL	8	6.4003	342.16	4	91	98.2083	2056	0.135		\$
		52	0.1	58	0.555	1010	0.5962E-4			*Calandria tube
MATERIAL	9	1.085089	342.16	4	3002	19.97	6016	79.88		\$
		3001	0.031		*Moderator					
MATERIAL	10	0.807859	561.16	3	3002	19.82	6016	79.28		\$
		3001	0.0465		*Coolant					
MATERIAL	11	2.5375	561.16	3	91	32.373	2056	0.0693		\$
		52	0.033	58	0.00231	1010	0.1979384E-04\$			
		3002	10.5046	6016	42.0184	3001	0.024645			

\*

FEWGROUP 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 25 26 27 30 33 36 39 42 \$  
45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69

MESH 3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 10

SUPPRESS 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 1

POWERC 1 32.55 0.1 1

BUCKLINGS 0.412E-04 0.268E-04 0.412E-05 0.268E-05

TOLERANCE 1E-05

BEGINC

THERMAL 12

\*BEEONE 1

BUCKLINGS 0.412E-04 0.268E-04 \*0.412E-05 0.268E-05

NOBUCKLING

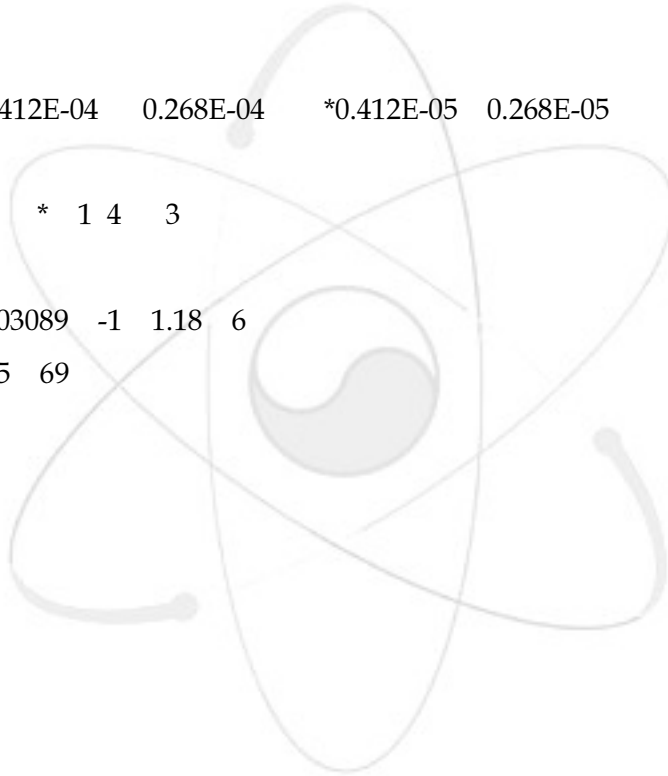
DIFFUSION 2 \* 1 4 3

LEAKAGE -6

ENDCAP 11 0.03089 -1 1.18 6

PARTITION 45 69

BEGINC





## 부록 II 코드의 계산 결과

### A. POWDERPUFS-V 코드의 계산 결과

Burnup	$k_{inf}(mk)$	MTC(mk/°C)	FTC(mk/°C)	CTC(mk/°C)	VC(mk)
0	1.088	-0.074	-0.014	0.017	15.91
3.3	1.088	-0.074	-0.014	0.017	15.91
9.8	1.088	-0.074	-0.014	0.017	15.92
17.9	1.087	-0.074	-0.014	0.017	15.92
30.9	1.086	-0.074	-0.014	0.0016	15.93
50.5	1.085	-0.073	-0.014	0.017	15.92
84.6	1.084	-0.073	-0.014	0.017	15.92
133.5	1.083	-0.070	-0.013	0.018	15.81
198.6	1.083	-0.066	-0.013	0.018	15.62
328.8	1.086	-0.057	-0.012	0.020	15.16
524.1	1.090	-0.044	-0.011	0.022	14.48
784.5	1.094	-0.029	-0.010	0.024	13.69
1077.4	1.096	-0.015	-0.009	0.026	12.99
1728.4	1.096	0.009	-0.008	0.029	11.89
2379.4	1.090	0.029	-0.007	0.033	11.19
3030.4	1.081	0.046	-0.006	0.036	10.70
3681.4	1.070	0.062	-0.005	0.039	10.32
4332.4	1.058	0.078	-0.005	0.041	9.98
4983.4	1.046	0.094	-0.004	0.044	9.64
5634.4	1.033	0.109	-0.003	0.047	9.30
6285.4	1.020	0.125	-0.002	0.050	8.96
6936.4	1.008	0.141	-0.002	0.053	8.59
7587.4	0.996	0.157	-0.001	0.055	8.22
8238.4	0.984	0.172	-0.001	0.058	7.84

\* MTC: Moderator Temperature Coefficient

\* FTC: Fuel temperature Coefficient

\* CTC: Coolant Temperature Coefficient

\* VC: Void Coefficient

B. WIMS-AECL 코드의 계산 결과

Burnup	$k_{inf}(mk)$	MTC(mk/°C)	FTC(mk/°C)	CTC(mk/°C)	VC(mk)
0	1.111	-0.044	-0.010	0.031	16.50
3.3	1.106	-0.045	-0.010	0.031	16.54
9.8	1.095	-0.047	-0.010	0.031	16.63
17.9	1.086	-0.048	-0.010	0.032	16.70
30.9	1.080	-0.049	-0.010	0.032	16.75
50.4	1.076	-0.050	-0.010	0.032	16.78
84.6	1.073	-0.050	-0.010	0.033	16.79
133.5	1.071	-0.049	-0.010	0.033	16.75
198.6	1.069	-0.046	-0.010	0.034	16.66
328.8	1.070	-0.041	-0.009	0.035	16.38
524.1	1.072	-0.031	-0.007	0.037	15.95
784.5	1.074	-0.021	-0.006	0.038	15.44
1077.4	1.075	-0.012	-0.005	0.040	14.99
1728.4	1.072	0.004	-0.003	0.043	14.33
2379.4	1.066	0.017	-0.002	0.046	13.98
3030.4	1.058	0.029	-0.001	0.048	13.76
3681.4	1.048	0.040	0.000	0.050	13.63
4332.4	1.038	0.050	0.001	0.053	13.51
4983.4	1.028	0.060	0.002	0.055	13.39
5634.4	1.017	0.070	0.003	0.057	13.28
6285.4	1.006	0.080	0.004	0.059	13.15
6936.4	0.996	0.091	0.005	0.062	13.01
7587.4	0.985	0.100	0.006	0.063	12.86
8238.4	0.975	0.110	0.007	0.065	12.68

\* MTC: Moderator Temperature Coefficient

\* FTC: Fuel temperature Coefficient

\* CTC: Coolant Temperature Coefficient

\* VC: Void Coefficient

C. WIMS-D5 코드의 계산 결과

Burnup	$k_{inf}(mk)$	MTC(mk/°C)	FTC(mk/°C)	CTC(mk/°C)	VC(mk)
0	1.093	-0.065	-0.012	0.027	15.46
3.3	1.087	-0.066	-0.012	0.027	15.55
9.8	1.074	-0.069	-0.012	0.028	15.72
17.9	1.073	-0.069	-0.012	0.028	15.74
30.9	1.072	-0.069	-0.012	0.029	15.76
50.5	1.070	-0.069	-0.012	0.028	15.78
84.6	1.068	-0.068	-0.012	0.029	15.80
133.5	1.066	-0.067	-0.012	0.029	15.78
198.6	1.065	-0.065	-0.011	0.030	15.68
328.8	1.065	-0.058	-0.010	0.031	15.38
524.1	1.067	-0.048	-0.009	0.033	14.88
784.5	1.070	-0.036	-0.008	0.034	14.31
1077.4	1.071	-0.026	-0.007	0.036	13.80
1728.4	1.068	-0.008	-0.005	0.039	13.08
2379.4	1.061	0.006	-0.004	0.042	12.72
3030.4	1.053	0.018	-0.003	0.044	12.54
3681.4	1.043	0.029	-0.002	0.047	12.44
4332.4	1.032	0.039	-0.001	0.050	12.41
4983.4	1.022	0.049	0.000	0.052	12.39
5634.4	1.011	0.058	0.001	0.054	12.38
6285.4	1.000	0.068	0.002	0.056	12.33
6936.4	0.989	0.078	0.002	0.058	12.29
7587.4	0.979	0.087	0.003	0.060	12.26
8238.4	0.969	0.096	0.004	0.062	12.20

\* MTC: Moderator Temperature Coefficient

\* FTC: Fuel temperature Coefficient

\* CTC: Coolant Temperature Coefficient

\* VC: Void Coefficient

서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/TR-2438/2003					
<b>제목/부제</b>		WIMS-D5를 이용한 중수로 노심 안전 해석 Numerical Benchmark of WIMS-D5 Against WIMS-AECL and POWDERPUFS-V -			
<b>주저자</b>		김원영 (종합안전평가부)			
<b>공동저자</b>		민병주 (종합안전평가부)			
<b>출판지</b>	대전	<b>발행기관</b>	한국원자력연구소	<b>발행년</b>	2003. 3.
<b>페이지</b>	33p.	<b>도표</b>	있음( ○ ), 없음( )	<b>크기</b>	26 cm.
<b>참고사항</b>					
<b>비밀여부</b>	공개( ○ ), 대외비( ), __ 급비밀, 소내만 공개 ( )		<b>보고서종류</b>	기술보고서	
<b>연구위탁기관</b>			<b>계약번호</b>		
<b>초록 (15-20줄내외)</b>		<p>중수로 노심은 양의 기포반응도를 가지고 있으므로 대형 LOCA시 노심 출력이 급격히 증가한다. 현재 원자로 내의 운전 조건과 연소도에 따른 실험자료의 부족으로 기포 반응도에 관한 오차가 잘 정의되지 않아 현재의 이론 모델과 컴퓨터 코드의 검증에 문제가 따르고 있다. 따라서 원자로 설계 및 해석에서 기포반응도 계산의 신뢰도를 확보하기 위해서는 실험자료의 평가와 더불어 코드의 검증이 필요하다. 본 연구에서는 기포반응도 영향을 고려한 안전 해석용 노물리 전산코드의 신뢰성 평가를 위하여 CANDU(CANadian Deuterium Uranium) 원자로의 격자특성에 대한 WIMS-D5 코드와 WIMS-AECL 코드, 그리고 POWDERPUFS-V(PPV) 코드의 격자계산을 비교하였다. 계산 시 사용되는 물리적 변수는 ENDF/B-VI에 근거하여 생성되었고 CANDU-6 원자로는 천연 우라늄을 핵연료로 사용하였다. 그 결과 WIMS-D5, WIMS-AECL, PPV 코드의 격자계산을 비교하면 무한증배계수 계산 결과 PPV를 기준으로 WIMS-D5는 연소 초기에 0.4%, WIMS-AECL은 2.1%의 오차를 보이며, 연소가 진행됨에 따라 WIMS-D5는 2.0%, WIMS-AECL은 2.1%의 오차를 보인다. CANDU-6 원자로의 격자특성을 보기 위해 핵연료 온도변화계수, 냉각재 온도변화계수, 감속재 온도변화계수를 비교한 결과, 기포가 없는 격자인 경우 초기에는 WIMS-D5가 WIMS-AECL 보다 PPV 코드의 결과와 더 잘 일치함을 알 수 있지만 연소가 진행됨에 따라 WIMS-AECL이 WIMS-D5보다 적은 오차를 보임을 알 수 있다</p>			
<b>주제명키워드 (10단어내외)</b>	중수로, 기포 반응도, WIMS-D5, WIMS-AECL, POWDERPUFS-V				

## BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2438/2003			
Title/Subtitle	Numerical Benchmark of WIMS-D5 Against WIMS-AECL and POWDERPUFS-V		
Main Author	Kim, Won Young (Integrated Safety Assessment Division)		
Coauthor	Min, Byung Joo (Integrated Safety Assessment Division)		
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI
Page	33p.	Ill. & Tab.	Yes ( <input type="radio"/> ), No ( <input type="radio"/> )
Note			
Classified	Open( <input type="radio"/> ), Restricted( <input type="checkbox"/> ), __ Class Document, Internal Use Only( <input type="checkbox"/> )	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.			Contract No.
Abstract (15-20 Lines)	<p>The benchmark calculations have been performed for WIMS-D5 against POWDERPUFS-V(PPV) and WIMS-AECL using CANDU6(CANadian Deuterium Uranium) reactors. For the CANDU reactors, the lattice parameters were generated for the natural uranium based on the ENDF/B-VI library of WIMS-D5 and WIMS-AECL codes. When comparing the infinite multiplication constant, the results show that at the beginning the prediction errors of WIMS-D5 and WIMS-AECL against POWDERPUFS-V are 0.4% and 2.1% and at the 4000MWD/T, 2.0%, 2.1%, respectively for CANDU reactors. The results shows that the values obtained from WIMS-D5 calculation are in the agreement with from those of PPV at the beginning whereas WIMS-AECL are in the agreement with the WIMS-AECL results as burnup increase in the comparison of fuel/coolant/moderator temperature coefficients in the cooled lattice.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	CANDU, Void reactivity, WIMS-D5, WIMS-AECL, POWDERPUFS-V		