

## CANDU용 핵연료 다발의 End Region이 노물리 특성에 미치는 영향 분석

민병주, 심기섭, 석호천  
한국원자력연구소  
김봉기  
한국전력기술주식회사

### 요 약

CANDU 원자로용 핵연료 다발의 양 끝에 있는 endcap과 endplate가 원자로의 노물리 특성에 미치는 영향이 MCNP와 WIMS-AECL 계산코드로 계산되었다. 이 계산에 의하면 end region을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 차이가 0.15 % 이내로 거의 무시할 수 있다. 그러므로 end region을 고려할 수 없는 격자코드로 계산을 수행해도 노물리 특성에 미치는 영향이 거의 무시될 수 있으므로 CANDU 원자로의 격자 특성 계산에 사용될 수 있음이 증명되었다.

### 1. 서 론

CANDU용 핵연료 다발은 길이가 50 cm 정도이며 양 끝에 end region이 있다. 기존의 CANDU용 격자코드는 CANADA에서 개발되어 end region을 고려한 계산이 수행되고 있다. 그러나 CANDU 원자로에 저농축 우라늄(SEU)나 승환 우라늄(RU)와 같은 개량 핵연료 주기의 도입을 위하여 다른 격자코드가 모색되고 있다. 이에 따른 노심해석 기술개발을 위하여 격자코드의 선정 및 검증작업을 수행중에 있다. 통상적으로 이들 격자코드는 0 또는 1 차원 코드들으로써 end region을 묘사할 수 없다. 최근 도입된 HELIOS 코드[1]도 2차원 코드이나 역시 end region을 묘사할 수 없다. 그러므로 이를 묘사하기 위하여는 3 차원 코드가 필요하나 현재 사용가능한 적당한 코드가 없으므로 기존의 1 차원 또는 2 차원 코드를 사용할 수 밖에 없다. 이에 따라 본 논문에서는 격자코드로 묘사할 수 없는 end region이 노물리 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이 방법으로 최근 3 차원 검증용 코드로 이용되고 있는 MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport Code System) 코드[2]와 캐나다의 AECL에서 개량한 WIMS-AECL 격자코드[3]로 end region이 노물리 특성에 미치는 영향을 계산하여 비교 검토하였다.

### 2. 방 법

CANDU 원자로의 핵연료 다발은 37개의 핵연료봉으로 구성되어 있다. 이 핵연료봉에는 얇은 Zircaloy-4 sheath로 싸인 고밀도 천연우라늄 펠렛이 들어있다. 37개의 핵연료봉 양끝은 endcap으로 봉합되어 있으며, 핵연료 다발은 endplate로 용접되어 있다. CANDU 원자로의 핵연료 다발 양끝의 endcap, endplate가 원자로의 노물리 특성에 얼마나 영향을 끼치는가에 대하여 검증코드인 MCNP와 격자코드인 WIMS-AECL로 계산하였다. 계산의 편이성을 위하여 계산조건은 시운전시의 cold-zero power 상태를 기준으로 하였다.

#### 2.1 MCNP 모델

이 계산에 사용한 모델은 다발 하나를 격자별로 한  $28.575 \text{ cm} \times 28.575 \text{ cm} \times 49.53 \text{ cm}$ 의 배열과 반사 경계조건을 갖는다. 또 이 모델은 핵연료, clad, 냉각재, 압력관, 칼란드리아관과

감속재로 되어 있다(그림1). 여기서 핵연료 다발의 길이가 49.53 cm이고 핵연료 stack length가 48.02 cm로 end region은 양측을 합해서 1.51 cm이다(그림2). 이 모델에서 end region은 endcap과 endplate의 Zircaloy-4와 Coolant로 구성되어 있다. end region이 없는 경우는 핵연료 stack length를 49.53 cm으로 하여 밀도를 계산하였다. 모델은 end region이 있는 경우(ENDC), end region이 없는 경우(ENDN)와 end region이 없지만 end region이 있을 때의 핵연료 밀도를 사용하였을 경우(ENDH)로 구분하여 계산 비교하였다(표1).

## 2.2 WIMS-AECL 모델

WIMS-AECL은 지난 20여년 동안 AECL 소속 Chalk River 연구소에서 집중적으로 개발되어, 그 모델이나 근사가 CANDU용 핵연료 구조와 구성재질에 알맞도록 개발되어 왔다. WIMS-AECL에서는 ENDF/B-V 89 중성자군 핵자료를 사용하였다. 모델은 핵연료, clad, 냉각재, 압력관과 칼란드리아관과 감속재의 구성되어 있다(그림3). 이 격자코드는 1차원으로 원래는 end region을 나타낼 수 없으나, end region을 묘사할 수 있도록 AECL에 의해 개량되었으므로 MCNP계산과 마찬가지로 세가지 경우(ENDC, ENDN 과 ENDH)에 대하여 계산하였다.

## 3. 결과 및 논의

MCNP 및 WIMS-AECL의 계산결과를 표2에 정리하였다. 이 표에서, MCNP의 결과를 보면 end region을 고려한 경우(ENDC)의 multiplication factor는 1.13210, end region 없이 핵연료 밀도를 고려한 경우(ENDN)는 1.13303 이고 end region이 없으며 핵연료 밀도를 end region이 있을 때의 것을 사용한 경우(ENDH)는 1.13208 이다. ENDC와 ENDN는 0.08 % 이내로 일치하고 ENDC와 ENDH의 차이는 0.002 % 이다. 또 WIMS-AECL의 결과는 33그룹 K-infinity의 경우 ENDC와 ENDN는 0.11 % 이내로 일치하고 ENDC와 ENDH는 0.06 % 이내로 일치한다. WIMS-AECL의 계산결과로 부터 핵연료의 밀도만 차이가 있는 ENDN과 ENDH 경우에 핵연료 밀도가 적은 ENDN의 경우 k 값이 다소 크게 나타나 있음을 알 수 있다. 이는 핵연료 밀도가 감소하면 핵연료 봉 내에서 self-shielding factor가 감소하여 k 값이 다소 증가하는 현상에 의한 것이다. 이 계산결과로 부터 end region에 의한 영향이 핵연료 밀도의 감소에 의한 영향과 그 크기 면에서 거의 유사함을 알 수 있다.

이 계산결과를 보면 end region을 고려한 것과 고려하지 않은 것의 차이가 0.11 % 이내이다. 그러므로 end region을 고려할 수 없는 격자코드를 사용할 경우에 end region에 의해 나타나는 오차는 노물리 특성에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 따라서 CANDU 원자로의 격자 특성은 통상적인 1차원 격자코드로 묘사될 수 있으며, end region을 고려하지 않음에 따른 오차는 무시될 수 있을 것이다. 그러나 보다 정확한 계산을 위하여 적절한 보정에 의한 오차의 최소화 가능할 수 있음을 계산결과에서 알 수 있다. 즉 end region에 존재하고 있는 zr물질의 적절한 재배치(k 값의 감소)와 핵연료 밀도의 재계산(k 값의 증가)으로 보정될 수 있을 것이며 이는 계속 연구될 것이다.

## 4. 참고문헌

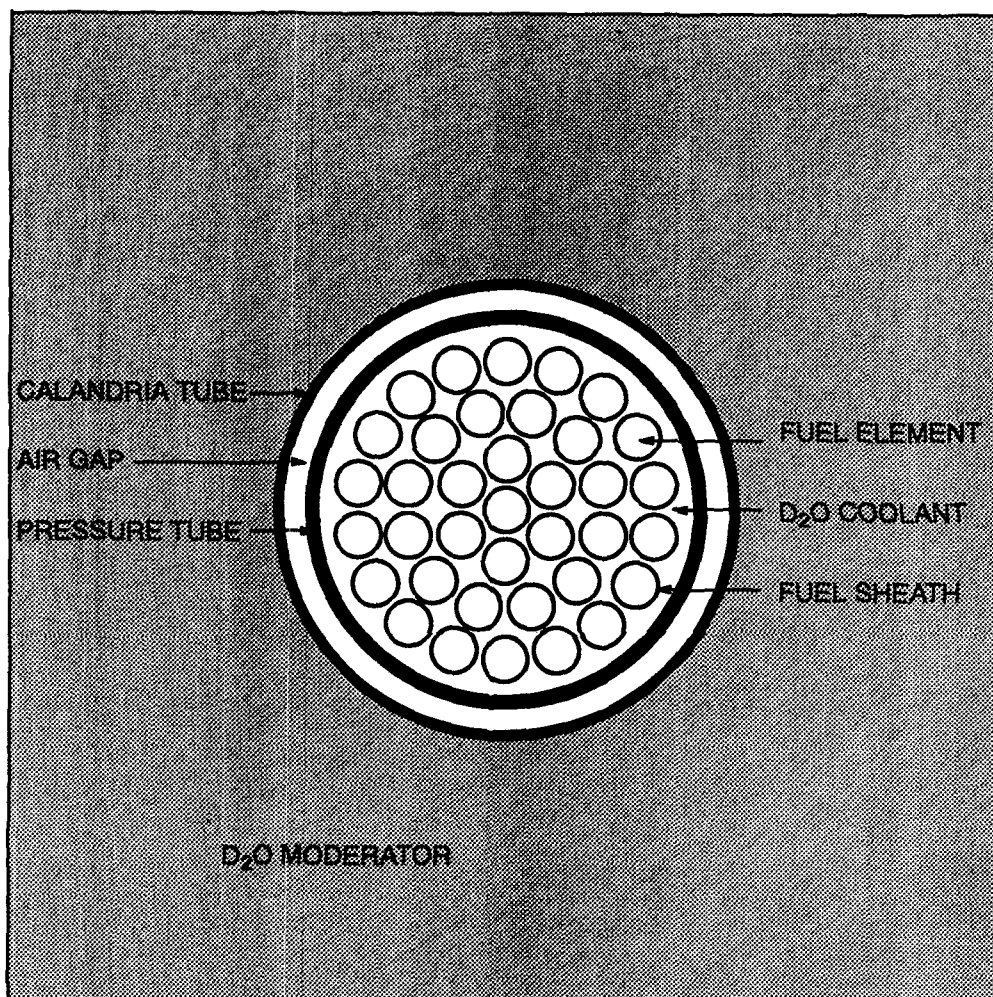
- [1] SCANDPOWER, "HELIOS Program Description", SANDPOWER A/S, 31 Dec. 1994.
- [2] J.V. DONNELLY, "WIMS-CRNL: A User's Manual for the Chalk River Version of WIMS", AECL Report, AECL-8955, 1986.
- [3] J.F. Briesmeister(Editor), "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", Version 4A, LA-12625-M, Nov. 1993.

표 1. 세가지 경우에 대한 핵연료 밀도, 핵연료 다발 및 end region의 길이

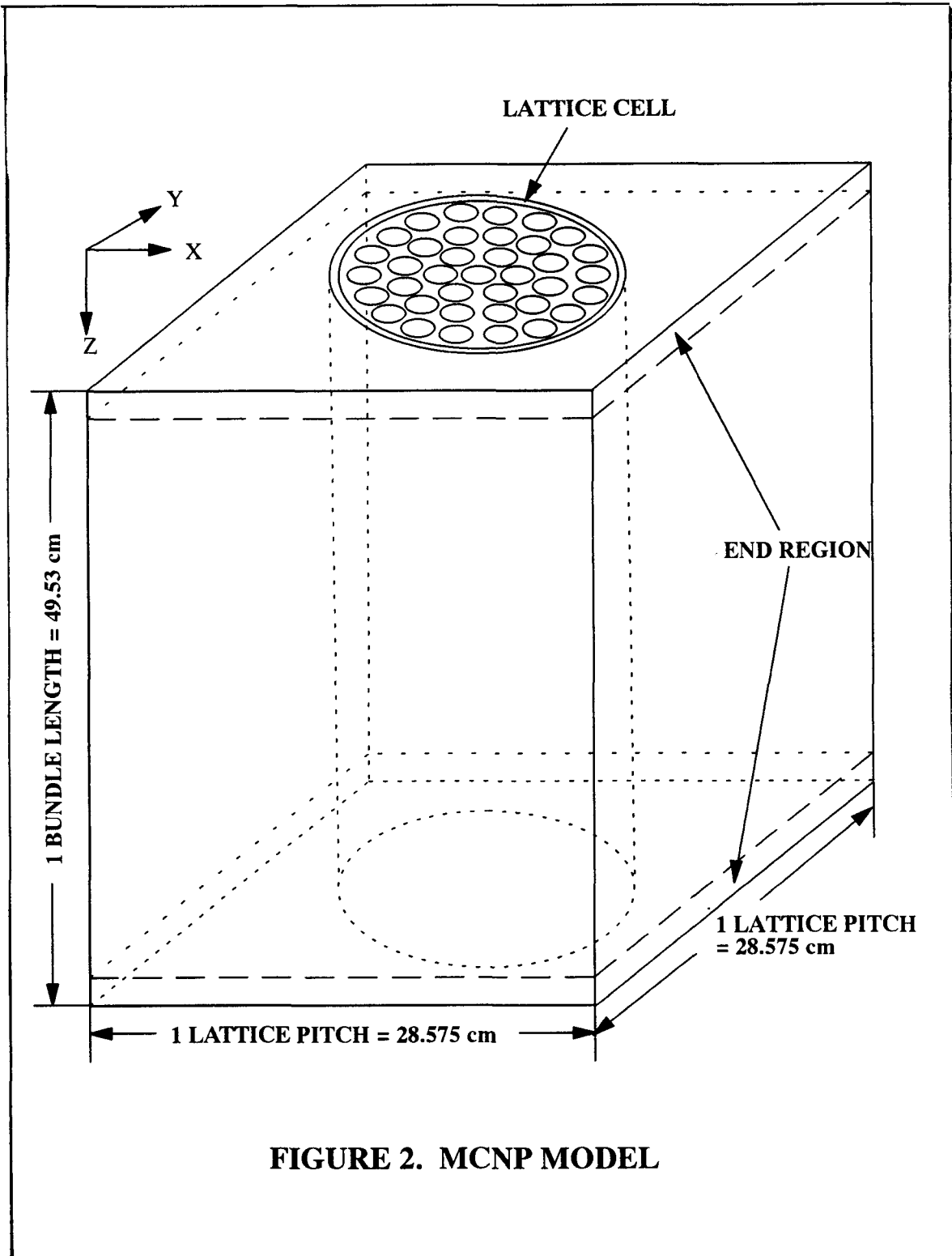
계산상수 CASE	Fuel Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fuel Stack Length(cm)	Bundle Length (cm)	End Region (cm)
ENDC	10.35	48.02	49.53	1.51
ENDN	10.04	49.53	49.53	0.0
ENDH	10.35	49.53	49.53	0.0

표 2. 세가지 경우에 대한 MCNP와 WIMS-AECL 계산결과

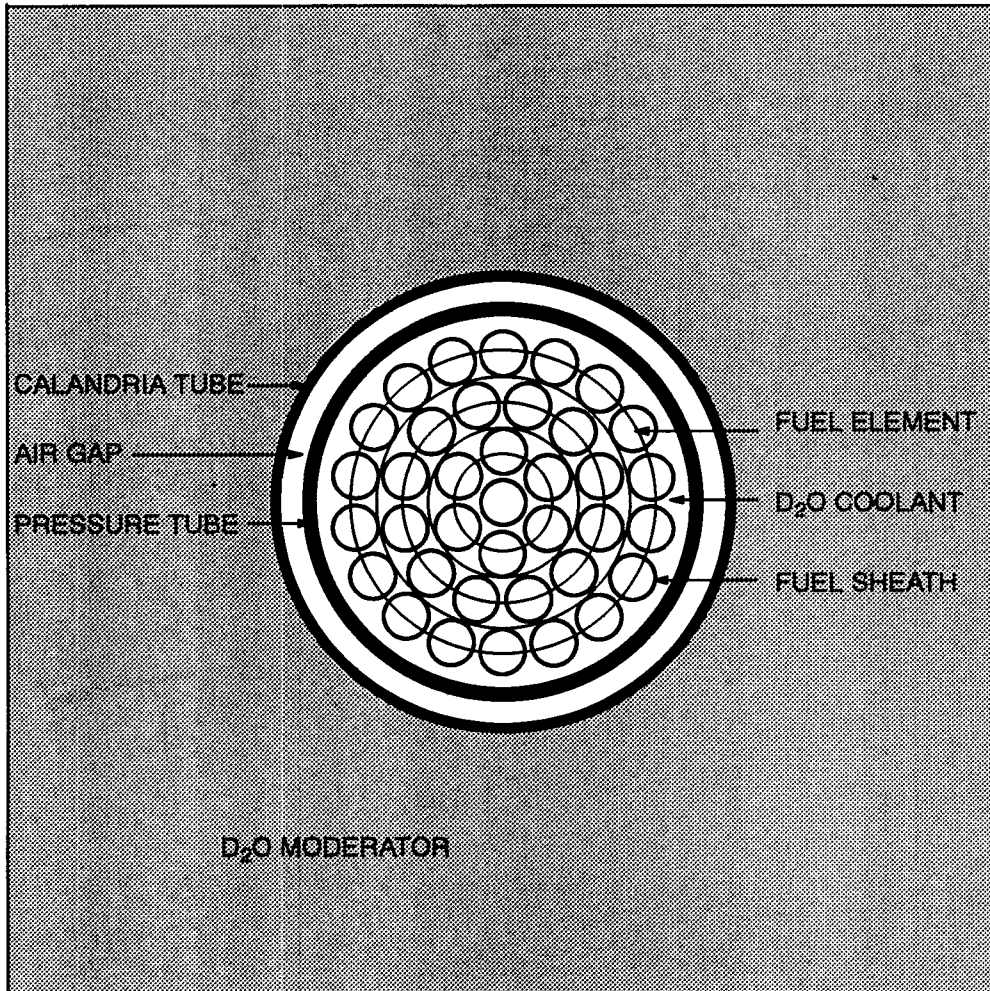
계산코드 CASE	MCNP	WIMS-AECL(K-inf)
ENDC	1.13210	1.12932
ENDN	1.13303	1.13055
ENDH	1.13208	1.12999



**FIGURE 1. Geometry for MCNP Calculation**



**FIGURE 2. MCNP MODEL**



**FIGURE 3. Geometry for WIMS-AECL Calculation**