

## 지발 중성자 군 구조 특성이 중수형 원자로의 안전성에 미치는 영향

소순규, 유극중, 신동훈, 이영준, 김진성, 오세기

### Assessment of Delayed Neutron Group Structure effects on CANDU Safety

Soonkyu So, Gukjong You, Donghun Shin, Youngjoon Lee, Jinsung Kim, Sekee Oh

#### 1. 서론

1983년 우리나라의 최초 중수로인 월성 1호기가 준공된 이후 20년간 운전 중에 있으며, 또한 현재 월성 2,3,4호기가 운전 중에 있어 우리나라에선 총 4기의 중수로가 가동 중에 있다. 하지만 4기의 중수로 보유국임에도 불구하고 상용발전예 이용되고 있는 중수로 기술은 캐나다의 CANDU형이 유일하고, 이 밖에 원형로 규모의 일본 Fugen 원자로가 가동되는 정도이므로 많은 노심 특성실험 자료가 취약한 실정이다. 이러한 이유로 월성 1호기가 설계수명에 가까워지면서 기기노화로 인해 설계 시에 예측했던 안전 여유도를 만족 시키는데 어려움이 생기게 되었다. 1990년대에 들어오면서 지금까지 사용해온 유효 지발중성자 분율이 각종의 적분 실험결과들과 비교할 때, 경우에 따라 10%에 달하는 오차를 나타내고 있다.

본 연구에서는 지발 중성자의 군 구조 특성이 CANDU 원자로의 안전성에 미치는 영향을 분석하는데 목적을 두고 있다. 이를 위해 천연우라늄 핵연료 37개봉이 장전된 CANDU-6 (Canadian Deuterium Natural Uranium) 원자로 노심에 대하여 WIMS-D5코드로 격자 계산을 하였고 코드로 계산된 원자로 내 핵 특성 값으로 동특성 시뮬레이션 해석 도구인 MATLAB/Simulink를 구성하여 원자로의 일점 동특성 모델을 구성하였다. WIMS-D5코드 계산 시 사용되는 물리적 변수는 69군 ENDF/B-VI 라이브러리에 근거하여 생성하였다. 이런 결과 값을 기반으로 당초 설계해석에 고려한 지발 중성자 군 구조의 보수성을 정량적으로 재평가하여 안전 여유도 확보에 기여하는데 그 목적을 두고 있다.

#### 2. CANDU-6 초기 노심 구성

##### 2-1 코드체계

천연우라늄( $UO_2$ ) 37개봉 핵연료 다발이 380개의 연료채널 내에 4560개가 장전된 CANDU-6(Canadian Deuterium Natural Uranium) 노심의 격자계산을 하기 위해 WIMS-D5 코드를 사용하였다. WIMS-D5코드 계산 시 사용되는 물리적 변수는 69군 ENDF/B-VI 라이브러리에 근거하여 생성하였고, 여기서 다루는 CANDU-6의 모델은 천연우라늄, Zircaloy-IV clad, 냉각재, 압력관,  $CO_2$  Gap, 칼란드리아관, 감속재로 구성하였으며

격자 단면도는 그림1과 같다. 또한 연소 진행에 따른 변화를 보기위해 초기, 평균연소도, 연소 말기로 구분하여 0MWd/t, 4000MWd/t, 8000MWd/t으로 단계를 나누어 각각의 연소도에 따른 격자 계산을 수행하였다. 이러한 결과로 CANDU-6내의 주요 핵분열 물질인  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ 의 격자 내 반응분율을 연소 진행에 따라 계산하였다.

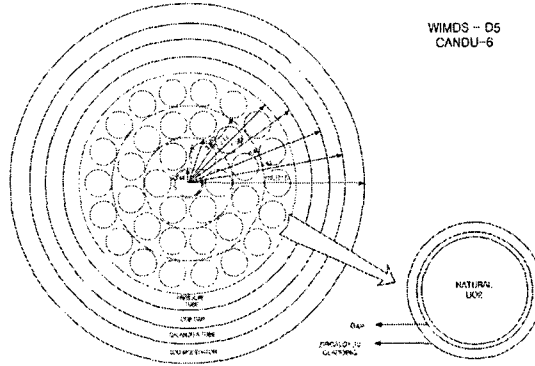


그림 1. WIMS 격자 계산을 위한 CANDU 격자 단면

## 2-2 지발 중성자 군

원자로 내에서 핵분열성 물질은 중성자와 반응하여 여기상태가 되고 2개 이상의 중성자를 방출한다. 핵분열시 발생하는 중성자는 핵분열과 동시에 나오는 즉발중성자(Prompt Neutron)와 핵분열 파편(Fission Product)들이  $\beta$ 붕괴에 의해 약 0.1초에서 1분 사이에 방출되는 지발중성자(Delayed Neutron)로 나눌 수 있다.

지발중성자의 생성률은 즉발중성자에 비해 매우 적지만 원자로 운전적 측면에서 지발중성자가 원자로를 제어하는데 더 유리하기 때문에 지발 중성자의 생성율은 운전여유도 평가에 중요한 기준이 된다. 지발 중성자는 지발중성자 모핵종(Delayed Neutron Precursor)의 반감기에 따라 핵분열 이후에 지발중성자가 나오는 시점이 다르기 때문에 본 연구에선 이러한 지발중성자를 지발중성자 모핵종의 반감기에 따라 6군과 8군으로 나누었다. 보통 중수형 원자로의 동특성은 일반적으로 통용되어온 Keepin의 6군 지발중성자 군을 사용했으나, 본 연구에서는 좀더 세분화된 Los Alamos에서 개발한 8군 지발중성자 군도 같이 평가하였다.

표1은 월성 2,3,4호기 FSR에 수록된 6군 지발중성자 구조와 광중성자 군을 포함시킨 유효 6군 지발중성자 구조를 비교한 것이다. AECL은 1976년 CRNL에서 수행한 ZED-2 Split Core 실험을 대상으로 유효 6군 데이터를 이용한 3차원 IQS(Improved Quasi Static) 코드로 모사 해석하였는데, 초기의 상하대칭 출력분포 상태에서 하반부에 흡수봉을 낙하 삽입함으로써 출력천이를 시작하였을 때, 상하간의 출력경사 시간변화는 초기 10초까지 측정값에 대해 약2%의 오차범위 안에서 과대 측정하는 경향을 보이고 있다. 당시 이 오차의 주원인이 광중성자군의 영향을 적절하게 고려치 못한데 기인한 것으로 평가하였다.<sup>11,2)</sup> 이러한 이유로 6군, 8군 특성치보다 더 정밀한 값을 계산하기 위해 감속재의 감마선과의 반응에 의해 생성되는 광 지발중성자를 반감기에 따라 11개 그룹으로 나누어 6군, 8군 지발중성자 군에 함께 포함시켜 고려하였다. 이렇게 세분화된 지발중성자 군 특성 값을 우리나라 상용 원자

로인 월성 CANDU 원자로의 FSAR(Final Safety Analysis Report) 자료 내의 지발 광중성자를 포함한 6그룹 지발중성자 자료값과 비교하여 중수로의 안전성을 평가 하였다.

표1. 지발중성자군 특성

군	FSR 제시				광중성자 포함	
	새 핵연료		연소도 평균 핵연료 성분		새 핵연료	
	지발중성자 분율( $10^{-4}$ )	붕괴상수 (1/초)	지발중성자 분율( $10^{-4}$ )	붕괴상수 (1/초)	지발중성자 분율( $10^{-4}$ )	붕괴상수 (1/초)
1	3.845	0.000733	2.96893	0.000614	3.808	0.0007363
2	15.269	0.031733	11.7116	0.031558	15.24	0.03174
3	13.867	0.117211	10.4054	0.121752	13.92	0.1177
4	32.612	0.312924	23.6814	0.317495	32.78	0.3139
5	10.515	1.40199	7.8663	1.389215	10.77	1.402
6	2.414	3.91243	1.9891	3.78540	2.52	3.919
계	78.521	-	58.6226	-	79.038	-

각 중성자 그룹 자료는 ENDF/B-VI 라이브러리에 근거하여 계산하였고, 본 연구에서 수행한 지발중성자 군에 따라 분류한 비교 대상들을 표2에 나타내었다.

표 2. 지발 중성자 군

Case	군 구조
Case1	6Group (ENDF/B-VI 자료값)
Case2	8Group (ENDF/B-VI 자료값)
Case3	6Group + 11Group Delayed Photo-neutron Data for CANDU (ENDF/B-VI 자료값)
Case4	8Group + 11Group Delayed Photo-neutron Data for CANDU (ENDF/B-VI 자료값)
Case5	6Group Delayed Photo-neutron 포함 Data (월성CANDU Reactor)

### 2-3 MATLAB SIMULINK 구성

본 연구에서는 동특성 시뮬레이션 해석 도구인 MATLAB/Simulink를 사용하여 CANDU-6 노심의 일점 동특성 모델을 구성 하였다. MATLAB/Simulink를 이용한 모델을 구성하기 위해 사용된 일점동특성 방정식은 원자로의 중성자 밀도변화를 예측 하는데 사용되는 수학적 모델로서 원자로의 어느 위치에서나 중성자밀도의 시간변화가 동일하다고 가정하는 모델이다. 여기서 지발중성자 군구조 효과만을 분명하게 분석하기 위해 핵연료, 냉각재 및 감속재 온도변화에 의한 반응도 제환을 고려치 않았다.

#### - 6그룹 일점 동특성 방정식

$$\frac{dN_f(t)}{dt} = \frac{k_{inf}(\rho - \beta)}{l_p} N_f(t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{k_{inf} \beta_i N_f(t)}{l_p} - \lambda_i C_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6$$

$$\rho = \frac{k_{inf} - 1}{k_{inf}}$$

$N(t)$  : t 시간에서의 중성자 수

$C_i(t)$  : t 시간에서의 지발중성자 모핵종의 수 밀도

$\rho(t)$  : t 시간에서의 총반응도  $[\Delta k/k]$

$\beta$  : 지발중성자 생성비율의 총합,  $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$

$l_p$  : 즉발중성자 생성 시간 [sec]

$\lambda_i$  : i 군 지발중성자 모핵종 유효붕괴 상수  $[\text{sec}^{-1}]$

$k_{inf}$  : 증배계수

지발 중성자 생성 비율은 핵종에 따라 다르며 또한 같은 핵종에 대하여도 핵분열을 일으킨 중성자의 에너지에 따라 다르다. 이렇게 각 핵종에 따른 지발 중성자 비율( $\beta$ )과 붕괴 상수( $\lambda$ )는 ENDF/B-IV 라이브러리에 근거하여 생성하였다. 각 핵종의 지발 중성자 생성 비율( $\beta$ )과 붕괴상수( $\lambda$ )는 WIMS/D5 코드로 CANDU-6 노심의 핵 특성을 연소도에 따라 계산된 주요 핵분열 물질인  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ 의 핵분열 반응 비율의 합으로부터 유효값을 계산하였다. ENDF/B-IV 라이브러리에 근거한 지발중성자 군 구조에 따른 각 핵종의 Yield( $\nu$ ) 값과 지발중성자 생성율( $\beta$ , Delayed Neutron Fraction)은 다음 표3과 같고, 이 데이터 자료값을 출력에 따라 평균  $\beta$ 값과 평균  $\lambda$ 값을 구하였다. 이 때 출력에 따른 평균  $\beta$ 와  $\lambda$ 값을 구하기 위해 아래 식을 사용하였다.

- 평균  $\beta$

$$\frac{\sum_j \beta_j \iint \sigma_j^i N^i \varnothing dEdV}{\sum_j \iint \sigma_j^i N^i \varnothing dEdV}$$

j : 핵분열성 핵종

$\sigma_j^i(E)$  : 핵종의 핵분열 반응 단면적 ( $\text{Cm}^2$ )

$N^j(r)$  : j 핵종의 수밀도 (#/cc)

$\varnothing(r, E)$  : 중성자 속 분포.

- 평균  $\lambda$

$$\frac{\lambda_i \sum_j \beta_j \iint \sigma_j^i N^i \varnothing dEdV}{\beta_j \iint \sigma_j^i N^i \varnothing dEdV}$$

$\lambda_j$  : 핵종의 붕괴상수

이렇게 구해진 출력 변화에 따른 평균 지발 중성자 생성비율을 표3에 같이 나타내었고, 출력 변화에 따른 각 지발중성자 군 구조의  $\beta$ 값과 각 그룹의  $\lambda$ 값을 일점 동특성 방정식에

대입해 주어 MATLAB/Simulink 모델을 구성하였다. 일점 동특성 방정식을 이용한 MATLAB/Simulink 구성 모델은 그림2와 같다.

표3. 지발중성자 군 구조에 따른 Yield 값과  $\beta$  값 및 출력에 따른 지발중성자 분율

6Group 지발중성자 군										8Group 연소핵 따른 지발중성자 분율		
	U-235		U-238		Pu-239		Pu-241			OMWD/teU	4000MWD/teU	8000MWD/teU
	u	$\beta$	u	$\beta$	u	$\beta$	u	$\beta$				
Group1	5.5450E-04	2.2756E-04	4.4869E-04	1.7756E-04	1.5685E-04	5.5108E-05	2.0107E-04	6.8268E-05	1.2474E-02	1.2479E-02	1.2471E-02	
Group2	3.0742E-03	1.2616E-03	4.9539E-03	1.9596E-03	1.7023E-03	5.9132E-04	3.8619E-03	1.3180E-03	3.0243E-02	2.9869E-02	2.9574E-02	
Group3	2.1803E-03	8.9478E-04	4.3119E-03	1.7059E-03	8.7555E-04	3.0413E-04	2.0374E-03	6.9174E-04	9.5905E-02	9.5239E-02	9.4754E-02	
Group4	6.8635E-03	2.8187E-03	1.8060E-02	7.1449E-03	2.3031E-03	7.3998E-04	8.1260E-03	2.0799E-03	2.8515E-01	2.8101E-01	2.7801E-01	
Group5	2.7434E-03	1.1258E-03	1.0944E-02	4.3239E-03	8.7663E-04	3.3993E-04	2.8480E-03	9.8626E-04	8.5929E-01	8.9514E-01	8.4555E-01	
Group6	1.2841E-03	5.2698E-04	5.8814E-03	2.2477E-03	4.3177E-04	1.4968E-04	1.1077E-03	3.7608E-04	3.4069E+00	3.2050E+00	3.0492E+00	

8Group 지발중성자 군										8Group 연소핵 따른 지발중성자 분율		
	U-235		U-238		Pu-239		Pu-241			OMWD/teU	4000MWD/teU	8000MWD/teU
	u	$\beta$	u	$\beta$	u	$\beta$	u	$\beta$				
Group1	5.5036E-04	2.2586E-04	4.4097E-04	1.7446E-04	1.5871E-04	5.5127E-05	2.0053E-04	6.8084E-05	2.2342E-04	1.4984E-04	1.1398E-04	
Group2	2.1913E-03	8.9929E-04	3.9320E-03	1.5558E-03	1.4822E-03	5.1486E-04	3.4499E-03	1.1713E-03	8.9052E-04	7.7996E-04	7.3177E-04	
Group3	1.3646E-03	5.6004E-04	1.6643E-03	6.5843E-04	4.1743E-04	1.4500E-04	4.4181E-04	2.8575E-04	5.6472E-04	3.8806E-04	3.0803E-04	
Group4	2.5688E-03	1.0534E-03	5.2218E-03	2.0658E-03	1.1763E-03	4.0658E-04	2.5672E-03	8.7182E-04	1.1016E-03	8.9811E-04	7.2781E-04	
Group5	5.4349E-03	2.2304E-03	1.4529E-02	5.7478E-03	1.9990E-03	6.9437E-04	4.9311E-03	1.6742E-03	2.9878E-03	1.7533E-03	1.5126E-03	
Group6	2.9327E-03	9.5382E-04	8.8685E-03	3.8242E-03	7.1858E-04	2.4680E-04	2.6811E-03	9.1031E-04	1.0920E-03	8.1637E-04	7.1216E-04	
Group7	1.1911E-03	4.8881E-04	5.0421E-03	1.9847E-03	3.5710E-04	1.2404E-04	8.3758E-04	3.1833E-04	5.6048E-04	4.1630E-04	3.5587E-04	
Group8	1.0772E-03	4.4209E-04	3.5035E-03	1.3881E-03	1.4081E-04	4.8843E-05	5.9098E-04	2.0085E-04	4.8702E-04	3.2831E-04	2.5479E-04	

11Group 지발중성자 군										11Group 연소핵 따른 지발중성자 분율		
	U-235		U-238		Pu-239		Pu-241			OMWD/teU	4000MWD/teU	8000MWD/teU
	u	$\beta$	u	$\beta$	u	$\beta$	u	$\beta$				
Group1	3.4870E-07	1.4327E-07	4.3670E-07	1.5369E-07	2.1890E-07	7.6245E-08	3.0890E-07	1.0421E-07	1.4577E-07	1.1545E-07	1.0257E-07	
Group2	7.2910E-07	2.8957E-07	3.1310E-07	3.2184E-07	4.5770E-07	1.5942E-07	6.4170E-07	2.1789E-07	3.0061E-07	2.4140E-07	2.1447E-07	
Group3	2.3141E-06	9.5082E-07	2.8981E-06	1.0189E-06	1.4527E-06	5.0598E-07	2.0867E-06	6.9158E-07	3.5411E-07	7.6817E-07	6.8071E-07	
Group4	1.6708E-05	6.8641E-06	2.0922E-05	7.3830E-06	1.0487E-05	3.6528E-06	1.4703E-05	4.9926E-06	6.8879E-06	5.5311E-06	4.9142E-06	
Group5	1.4772E-05	6.0888E-06	1.8500E-05	6.5107E-06	8.2734E-06	3.2300E-06	1.3001E-05	4.4147E-06	6.0906E-06	4.8909E-06	4.3454E-06	
Group6	2.3907E-05	9.8598E-06	3.0053E-05	1.0578E-05	1.5064E-05	5.2471E-06	2.1120E-05	7.1716E-06	8.8940E-06	7.9451E-06	7.0599E-06	
Group7	4.8959E-05	2.0527E-05	6.2567E-05	2.2018E-05	3.1382E-05	1.0824E-05	4.3970E-05	1.4931E-05	2.0598E-05	1.6541E-05	1.4696E-05	
Group8	1.4202E-05	5.8362E-06	1.7786E-05	6.2582E-06	8.9152E-06	3.1053E-06	1.2489E-05	4.2442E-06	5.8553E-06	4.7020E-06	4.1775E-06	
Group9	7.0978E-05	2.9169E-05	8.8888E-05	3.1282E-05	4.4556E-05	1.5518E-05	6.2468E-05	2.1212E-05	2.8264E-05	2.3488E-05	2.0878E-05	

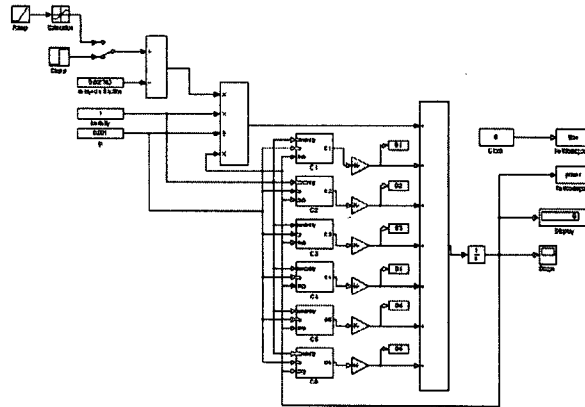


그림2. 6그룹 동특성 방정식의 MATLAB모델 구성

### 3. MATLAB/SIMULINK 결과 및 해석

노심격자 핵 특성 계산 코드인 WIMS-D5코드를 통해 구해진 CANDU-6 노심의 핵 특성 값과 ENDF/B-IV 라이브러리 지발중성자 군 구조 특성값과 MATLAB/Simulink를 이용하여 일점 동특성 해석 모델을 구성하였다. 이 모델을 이용하여 지발중성자 군 구조에 대한 출력 변화가 e배가 되는 e-folding 시간과 이때 지발중성자 분율을 구하였다. 여기에 반응도 삽입에 따른 원자로 내 동특성 변화를 보기 위해 0.001, 0.003, 0.005 $\Delta$ k/k의 양의 반응도를 삽입 시켰고, -0.001, -0.003, -0.005 $\Delta$ k/k의 음의 반응도를 삽입 시켜 지발중성자 생성분율의 변화를 계산하였다. 본 연구의 목적인 지발 중성자의 군 구조 특성이 현재 상

용 원자로인 월성 CANDU-6의 안전성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 월성 CANDU 원자로의 FSAR(Final Safety Analysis Report) 자료에 근거한 지발 광중성자를 포함한 6 그룹 지발중성자 자료값도 같은 방법으로 수행하여 계산하였다. 이렇게 계산된 자료값은 표4에 나타내었다.

표4. 지발중성자 군에 따른 지발중성자 생성비율과 e-folding Time

Reactivity	Fresh		0.001		0.003		0.005	
	Delayed Neutron	e-folding Time	Delayed Neutron	e-folding Time	Delayed Neutron	e-folding Time	Delayed Neutron	e-folding Time
0 MWD/teU	6Group	7.3633E-03	6.3816E-03	3.5009E+01	4.5292E-03	2.8247E+00	3.2940E-03	5.1826E-01
	8Group	7.3558E-03	6.3803E-03	3.6020E+01	4.5213E-03	2.8243E+00	3.2863E-03	5.1744E-01
	17Group	7.4344E-03	6.5113E-03	3.8728E+01	4.6493E-03	3.0298E+00	3.6825E-03	4.4010E-01
	19Group	7.4865E-03	6.5037E-03	3.8609E+01	4.6389E-03	3.0275E+00	3.6731E-03	4.3854E-01
	CANDU	7.8522E-03	6.8690E-03	5.1418E+01	4.3669E-03	4.0527E+00	3.5093E-03	6.2126E-01
4000 MWD/teU	6Group	5.4988E-03	4.5308E-03	2.1690E+01	2.8456E-03	1.2513E+00	2.3211E-03	3.5579E-01
	8Group	5.4912E-03	4.5215E-03	2.1692E+01	2.8388E-03	1.2489E+00	2.3234E-03	3.5303E-01
	17Group	5.6047E-03	4.6320E-03	2.3230E+01	2.9265E-03	1.3267E+00	2.3740E-03	3.6046E-01
	19Group	5.5962E-03	4.6243E-03	2.3282E+01	2.9166E-03	1.3231E+00	2.3658E-03	3.5995E-01
	CANDU	5.8623E-03	4.8834E-03	2.9394E+01	3.1101E-03	1.6182E+00	2.4478E-03	3.8101E-01
8000 MWD/teU	6Group	4.7262E-03	3.7638E-03	1.6426E+01	2.2722E-03	5.0083E-01	1.9317E-03	3.2430E-01
	8Group	4.7169E-03	3.7572E-03	1.6445E+01	2.2665E-03	5.0022E-01	1.9247E-03	3.2400E-01
	17Group	4.8195E-03	3.8544E-03	1.7633E+01	2.3312E-03	5.4059E-01	1.9725E-03	3.2809E-01
	19Group	4.8101E-03	3.8449E-03	1.7662E+01	2.3227E-03	5.3887E-01	1.9655E-03	3.1648E-01

Reactivity	-0.001		-0.003		-0.005		
비고	Delayed Neutron	e-folding Time	Delayed Neutron	e-folding Time	Delayed Neutron	e-folding Time	
0 MWD/teU	6Group	8.3673E-03	7.2472E+01	1.0335E-02	1.4414E+01	1.2303E-02	5.5231E+00
	8Group	8.3425E-03	7.2665E+01	1.0326E-02	1.4416E+01	1.2297E-02	5.5014E+00
	17Group	8.4872E-03	7.8792E+01	1.0466E-02	1.5419E+01	1.2439E-02	5.8877E+00
	19Group	8.4763E-03	7.8666E+01	1.0458E-02	1.5420E+01	1.2429E-02	5.8833E+00
	CANDU	8.8614E-03	1.2443E+02	1.0831E-02	2.0251E+01	1.2809E-02	6.5780E+00
4000 MWD/teU	6Group	6.4533E-02	5.1356E+01	8.4566E-03	8.8039E+00	1.0414E-02	2.9492E+00
	8Group	6.4784E-03	5.1830E+01	8.4490E-03	8.8534E+00	1.0390E-02	2.9712E+00
	17Group	6.5908E-03	5.6458E+01	8.5658E-03	9.4957E+00	1.0525E-02	3.1827E+00
	19Group	6.5762E-03	5.6396E+01	8.5586E-03	9.4812E+00	1.0514E-02	3.2011E+00
	CANDU	6.8503E-02	7.9538E+01	8.8320E-03	1.1777E+01	1.0795E-02	4.0450E+00
8000 MWD/teU	6Group	5.7124E-03	4.3170E+01	7.6756E-03	6.7793E+00	9.6250E-03	2.0172E+00
	8Group	5.7020E-03	4.3193E+01	7.6668E-03	6.7905E+00	9.6002E-03	2.0289E+00
	17Group	5.7558E-03	4.6919E+01	7.7533E-03	7.3027E+00	9.7350E-03	2.1899E+00
	19Group	5.7545E-03	4.6997E+01	7.7632E-03	7.3124E+00	9.7080E-03	2.1918E+00

MATLAB/Simulink를 이용한 시뮬레이션 결과 자료값을 보면 새 핵연료를 장전한 원자로 운전주기 초에는 핵연료 내에  $^{235}\text{U}$ 와  $^{238}\text{U}$ 만이 존재하나 운전을 하는 동안 핵분열 물질인  $^{235}\text{U}$ 의 양은 줄어들고 이때 반응해서 나온 중성자 상당량이  $^{238}\text{U}$ 에 흡수하여  $^{239}\text{Pu}$ 가 많이 생성된다.  $^{235}\text{U}$ 에 의해 생성되는 지발 중성자 생성량은  $^{239}\text{Pu}$ 에 의해 생성되는 지발 중성자 생성량보다 약 2.6배정도 더 크다. 이러한 이유로 연소가 진행됨에 따라  $^{238}\text{U}$ 은 줄어들고  $^{239}\text{Pu}$ 양이 더 많아져 지발중성자 비율이 다소 감소하게 된다. 또한 양의 반응도 삼입에 따라 출력은 빠르게 상승되고 출력이 증가하는 e-folding 시간이 짧아짐을 볼 수 있다. 그리고 음의 반응도 삼입에 따라 출력은 빠르게 감소되고 출력이 감소되는 e-folding 시간도 짧아짐을 알 수 있다. 이러한 결과자료 중 연소도가 0Mwd/t일때 출력이 e-folding 되는 시간과 지발중성자 비율을 그림3과 그림4에 나타내었다. 이 그래프를 통해 월성 CANDU-6 원자로에서는 기존의 군 특성치보다 더 정밀한 값으로 계산된 17,19그룹 지발중성자의 e-folding 시간 보다 길게 측정되어 있다는 것을 알 수 있고, 또한 지발중성자 생성율도 보다 크게 계산되어진 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 월성 CANDU-6 원자로 FSAR에 수록된 사고해석이 지발중성자 비율을 실제보다 더 크게 사용하였다고 판단된다. 따라서 사고시 CANDU-6의 출력 증가에 대한 안전성을 보다 낙관적으로 평가한 것이다.

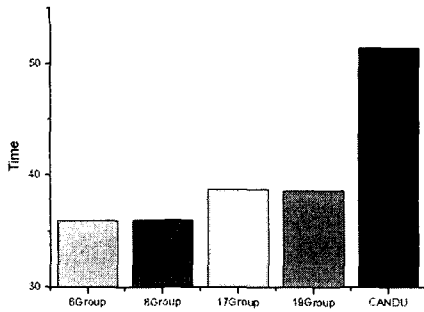


그림3. e-folding Time

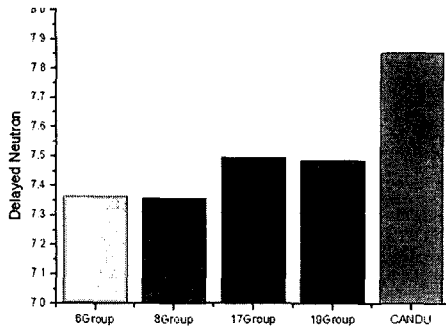


그림4. 지발중성자 생성율

#### 4. 결론

본 연구는 6그룹, 8그룹 이외에도 기존의 군 특성치보다 더 정밀한 값을 얻기 위해 광지발중성자 그룹을 포함한 17그룹, 19그룹의 각 중성자 그룹에 따른 지발중성자 생성율을 계산했고, 연소 진행과 반응도 삽입에 따른 출력변화의 e-folding 시간을 구하였다. 이를 통해 각 군의 구조 특성을 구하여 기존의 월성 CANDU-6 원자로 안전성 해석에 사용해진 유효지발중성자 분율의 신뢰도를 분석하고 중수형 원자로의 안전성에 미치는 영향을 평가하였다. 이러한 결과자료에 의하면 현재 상용중인 월성 CANDU-6 원자로 FSAR에 수록된 사고해석이 지발중성자 분율을 실제보다 더 크게 사용하였다고 판단된다. 따라서 사고시 CANDU-6의 출력 증가에 대한 안전성을 보다 낙관적으로 평가한 것이다.

향후 더 높은 신뢰성을 갖는 유효지발중성자 군을 제안하기 위해 WIMS-D5코드 이외에 POWDERPUFS-V(PPV) 이용하여 더 정밀한 값을 얻고, 안전 검증용 노심 설계코드의 노심 동특성 모사방법론의 타당성을 평가 하는데 목표를 둘 것이다.

#### 5. 참고문헌

- 1) E.R.Cohen, Exponential Experiments on D<sub>2</sub>O-Uranium Lattices, Proc., 1955 Geneva Conference, 5: Paper No. 605, pp. 268
- 2) G. Dessauer, Physics of Natural Uranium Lattices in Heavy Water, Proc., 1958 Geneva Conference, 12: Paper No. 590, pp. 320-340.
- 3) W.B. Wilson and T.R. England, Delayed Neutron Study Using ENDF/B-VI Basic Nuclear Data 2002
- 4) "WIMSD" NEA Databank, A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis, 1997.
- 5) G. Dessauer, Physics of Natural Uranium Lattices in Heavy Water, Proc., 1958 Geneva Conference, 12: Paper No. 590, pp. 320-340.
- 6) R.E.Green, et al., Lattice Studies at Chalk River and Their Interpretation, Proc., 3rd Int. Conf. On Peaceful Uses of Atomic Energy, (1964).  
From KAERI/TR-1999/2001
- 7) K.J.Serdula, Lattice Measurements with 19-Element Natural Uranium Metal

- Assemblies, Part II: Relative Total Neutron Densities and Hyperfine Activation Distributions in a Lattice Cell, AECL-2523, (1965).
- 8) P.W.de Lange. Et al., Experimental Initial Conversion and Fast Fission Ratios for Clusters of Natural U and UO<sub>2</sub> in D<sub>2</sub>O, AECL-2636, (1966).
  - 9) R.E.Kay, Lattice Measurements with 36-Element Natural UO<sub>2</sub> Fuel in the ZED-2 Hot Loop Facilities: Detailed Lattice Cell Parameters, AECL-5969, (1977).
  - 10) M.Ueda, et al., Reactivity Worths of Annular Control Rods in a Pressure-Tube-Type Heavy Water Lattices, Nucl. Sci. & Engin., 62, pp. 559-570, (1977).
  - 11) J. Griffiths, Reactor Physics and Economic Aspects of the CANDU Reactor System, AECL-7615 (1983)
  - 12) 김학로 외, Lattice Calculation of CANDU PHWR in KAERI AS A PART OF THE IN-CORE FUEL MANAGEMENT BENCHMARKS FOR PHWRS 논문집 1990