

## CANFLEX-NU 핵연료에 대한 WIMS-AECL 코드의 타당성 평가

### Validation of WIMS-AECL Code for CANFLEX-NU Fuel

박동환, 류석진, 김윤희, 김용배, 이창섭

대전시 유성구 문지동 130-16  
한국전력연구원

#### 요 약

중수로용 개량핵연료인 CANFLEX-NU 핵연료와 기존 37봉 핵연료에 대하여 노심격자상수 생산용 코드인 POWDERPUFS-V와 WIMS-AECL코드의 비교 계산을 통한 WIMS-AECL 코드의 타당성 평가를 수행하였으며, 각 핵연료에 대한 연소도에 따른 반응도 변화, 핵연료 온도계수, 감속재 온도계수, 기포반응도 변화를 각각 계산 비교하였다. 두 핵연료의 차이에 따른 계산값의 차이는 거의 없었으나, 두 코드간 결과는 연소도가 커짐에 따라 많은 차이를 보였다. 향후 실험자료 및 검증된 기준 자료를 이용하여 보다 상세한 계산을 통해 검증된 자료를 생산할 수 있을 것이다.

#### ABSTRACT

*A validation of the cell-codes WIMS-AECL was performed for the standard CANDU fuel and CANFLEX-NU fuel through comparing their lattice parameters against the results obtained by the cell codes POWDERPUFS-V. For this validation, reactivity, fuel temperature coefficient, moderator temperature coefficient, and void reactivity were calculated. The result of calculations shows that lattice parameters of these two fuel types are consistent for each code. However, there is a tendency that the error between the two codes results increases as the fuel burnup increases. Further, the detailed analysis using the experiment data or reliable reference data need to be performed.*

#### 1. 서 론

국내 최초의 중수로인 월성 1호기는 1983년 준공 이래 18년간 운전 중에 있다. 이에 원자로의 노후화(Aging) - 압력관 부풀림(Creep), 압력관 두께 감소, 증기발생기의 열전달율 감소, 오리피스(Orifice) 직경 변경, 압력관이나 파이프의 표면 거칠기 변화 등 - 영향으로 원자로의 운전여유도가 감소되어 원자로의 운전 및 안전에 지장을 초래할 수가 있다. 이와 같은 문제들에 대한 대처방안으로 원자로 측면의 대책이 강구되어야 하지만, 경제적이면서도 효율적인 방법으로, 원자로의 운전여유도를 향상시켜 원자로의 노후화에 따른 운전여유도 감소를 보상할 수 있는 개량핵연료의 개

발이 요구되어 1991년부터 8년여의 기간동안 CANFLEX-NU(CANDU FLEXible-NU)[1] 핵연료를 설계 및 개발하였으며, 이를 실제 월성 1호기에 상용 시범장전을 수행할 계획에 있다.[2]

CANFLEX-NU 핵연료 개발을 위한 핵연료다발 격자상수 계산은 점근사 모델이며 37봉 천연우라늄 핵연료에 대하여 결과가 잘 일치하도록 실험식에 근거하여 만든 POWDERPUFS-V(이하 PPV)[3] 코드를 이용하여 수행하였다. 그러나 저농축 및 순환우라늄 핵연료를 사용할 경우 중성자 스펙트럼의 차이가 발생하여 PPV 코드를 사용할 수가 없으므로 신형 중수로용 신형 핵연료 개발을 위해서는 89그룹 ENDF-VI라이브러리를 사용하고, 수송방정식을 이용하는 WIMS-AECL[4]코드로써 대체 사용하려는 추세에 있다. 이에 본 연구에서는 37봉 중수로용 핵연료와 43봉 CANFLEX-NU 핵연료에 대하여 연소도에 따른 반응도 변화, 연소도별 핵연료 온도계수, 감속재 온도계수 및 기포반응도 변화를 계산, 비교하여 WIMS-AECL 코드의 타당성을 평가하고자 하였다.

## 2. 계산 모델 및 코드체계

중수로용 37봉 천연우라늄 핵연료와 43봉 CANFLEX-NU 핵연료는 각각 그림 1과 2와 같이 크게 핵연료봉, 냉각재, 압력관 감속재로 구성되어있다. 두 핵연료의 차이는 핵연료봉의 크기와 갯수가 다를 뿐 그 이외의 운전조건은 동일하다. 검증계산을 위한 기본 입력자료는 표 1과 같다. 이를 바탕으로 2차원 모델을 이용하여 핵연료 온도계수, 기포반응도, 감속재 온도계수를 비교하고, 37봉 천연우라늄 핵연료와 43봉 CANFLEX-NU 핵연료 결과를 비교하였다.

### 2.1 POEDERPUFS-V

PPV 코드는 거의 모든 중수로의 노심격자 상수를 계산하기위하여 사용되는 코드이며, ZEEP와 ZED-2 연구로에서 천연우라늄을 대상으로 실험자료를 보정하는 방법에 근거한 실험식코드이다. 중수로의 핵연료 채널 모사시 핵연료, 냉각재, 감속재를 원형 면적으로 계산하여 점모델로서 계산한다.

### 2.2 WIMS-AECL

WIMS-AECL 코드는 영국에서 개발한 WIMS 코드를 개량한 것으로서 69그룹 WINFRITH 라이브러리와 89그룹 ENDF/B-V, VI 라이브러리를 사용할 수 있다. 또한 일반 격자상수 뿐 만 아니라 단일 격자구조의 반응율, 임계도, 중성자속 분포를 계산할 수 있다. 또한 핵연료 다발내의 중성자속 분포와 핵연료 봉이 배열된 각 원형 배열에 대한 출력밀도를 계산할 수 있다.

## 3. 계산결과 및 논의

### 3.1 연소도에 따른 반응도 비교

37봉 핵연료와 43봉 CANFLEX-NU 핵연료 채널에 대한 연소도별 무한 증배계수를 비교하여 그림 3에 나타내었다. 37봉 핵연료와 CANFLEX-NU 핵연료 모두 PPV의 계산결과가 약 3mk 높게 나왔다. 37봉 핵연료에 대하여 PPV가 상업로에서 검증된 코드인 점을 감안하면, WIMS-AECL 코드가 PPV에 비하여 3mk 정도 과소평가함을 알수 있다.

### 3.2 핵연료 온도계수

핵연료 온도계수는 경수로 및 중수로 원자로에 대한 반응도 주입과도해석에 있어 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 핵연료 온도계수는 정상운전조건에서 반드시 부반응도 값을 가져야한다. 핵연료가 연소함에 따라 플루토늄이 축적되고 핵연료 조사로  $^{238}\text{U}$ 이 변환하기 때문에, 핵연료 온도계수는 전형적으로 초기 연소도에서는 가장 낮은 값을 갖고 방출연소도로 갈수록 증가한다. 핵연료 온도계수는 다음과 같이 핵연료 온도 변화에 대한 반응도 변화로 나타낸다.

$$\alpha_T(10^{-6} \Delta k/K) = \frac{(k_1 - k_2)}{(T_1 - T_2)} \times 10^6$$

여기에서,  $k_1$ 과  $k_2$ 는 각각 핵연료 온도가  $T_1$ 과  $T_2$ 일 때 무한증배계수이다.

세가지 연소상태에 대하여 핵연료 온도를 1473.16K부터 293.16K까지 200K씩 줄이며 계산한 핵연료 온도계수를 표 2에 나타내고 그림4와 5에 도시하였다. 주기 초에서는 거의 유사한 값을 가지나 연소가 진행될수록 그 차이가 상당히 크게 나타났다. 이는 PPV와 WIMS-AECL의 연소에 따른 Pu-239의 생성량차이 때문으로 간주된다.

### 3.3 감속재 온도반응도 계수

감속재 온도 반응도 계수는 핵연료 온도계수와 마찬가지로 다음과 같이 온도변화에 대한 반응도 변화로 나타낸다. 단, 핵연료 온도계수는 온도 변화만 있고 밀도의 변화가 없으나, 감속재 온도계수의 경우 밀도변화의 효과를 동시에 고려하여 계산하였다.

$$\alpha_M(10^{-6} \Delta k/K) = \frac{(k_1 - k_2)}{(T_1 - T_2)} \times 10^6$$

여기에서,  $k_1$ 과  $k_2$ 는 각각 감속재 온도가  $T_1$ 과  $T_2$ 일 때 무한증배계수이다.

세가지의 연소도에 대하여 감속재온도와 밀도변화에 대한 반응도 변화를 그림3에 나타내었다. 그 결과 감속재의 온도감소에 따라 반응도는 선형적으로 증가한다. 정상상태 온도에서 부터 293.16K까지 감속재의 온도와 밀도를 변화시켜 얻은 반응도를 표3 과 그림 6와 7에 나타내었다. WIMS-AECL의 결과가 PPV에 비하여 연소가 진행될수록 큰 차이를 보인다.

### 3.4 냉각재 기포반응도변화

냉각재 기포 반응도 변화는 기포생성 즉 밀도변화에 대한 반응도 변화로 나타낸다. 단, 감속재 온도계수는 온도와 밀도가 동시에 변하지만 냉각재 기포반응도 변화의 경우 밀도변화만의 효과를 고려하여 계산하였다. 반응도 변화에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\alpha_V(mk) = \left( \frac{1}{k_{hot}} - \frac{1}{k_{others}} \right) \times 10^3$$

여기에서,  $k_{hot}$ 과  $k_{others}$ 는 각각 냉각재 밀도가 정상운전상태와 임의의 밀도일 때 무한증배계수이다. 세가지의 연소도에 대하여 냉각재 밀도 변화에 대한 반응도 변화를 그림3에 나타내었다. 그결과

냉각재 밀도 감소에 따라 반응도는 선형적으로 증가한다. 정상상태 값으로부터 0.0001g/cm<sup>3</sup>까지 냉각재 밀도를 변화시켜 얻은 반응도를 표4 과 그림 8,9에 나타내었다. WIMS-AECL의 결과가 PPV에 비하여 연소가 진행될수록 큰 차이를 보인다.

#### 4. 결론 및 향후계획

중수로 노심해석을 위한 격자상수 생산용 코드인 PPV의 대체코드인 WIMS-AECL 코드의 타당성을 평가를 위해 기존의 37봉 천연우라늄 핵연료와 43봉 CANFLEX-NU 핵연료의 결과를 연소도에 따른 반응도 변화, 핵연료온도계수, 감속재 온도계수, 기포반응도 변화의 측면에서 비교 평가하였다.

그 결과, 37봉 천연우라늄 핵연료와 43봉 CANFLEX-NU 핵연료 모두 핵연료 유형에 따른 차이는 없었으며, 각 연료에 대한 PPV와 WIMS-AECL의 계산결과 간에는 차이를 보이고 있었다.

따라서 향후 PPV와 WIMS-AECL 코드간에 실제 실험자료나 MCNP 코드를 이용하는등 객관적인 기준이 될 수 있는 자료를 확보하여 추가적인 타당성 비교를 검토하여야 할 것이다.

#### 참고 문헌

1. C.J. Jeong, Y.O. Lee "CANFLEX Fueled CANDU 6 Generating Station Physics Design Manual", CANFLEX-093, KAERI, 2001.
2. 석호천 외, "중수로용 개량핵연료 기반연구 및 실용화", KAERI/RR-2011/99, 2000.
3. E.S.Y. Tin and P.C. Loken, "POWDERPUFS-V Physics Manual", TDAI-31 part 1, AECL, 1979.
4. J. Griffiths, " WIMS-AECL Users Manual", RC-1176 COG-94-52, AECL, 1994.

표 1. 격자계산 운전조건 및 자료

	37rods NU Fuel	43rods CANFLEX-NU Fuel
핵연료 봉수	37	43
핵연료 다발 배열	1, 6, 12, 18	1, 7, 14, 21
핵연료 소결체 반경 (cm)	0.61	Large : 0.633 Small : 0.5355
격자크기 (cm)	28.575	28.575
UO <sub>2</sub> Density(g/cm <sup>3</sup> )	10.6	10.6
냉각재 온도 (°C)	288	288
냉각재 순도 (wt%)	99.1	99.1
감속재 온도 (°C)	69	69
감속재 순도 (wt%)	99.85	99.85
총 핵분열 출력 (MW)	2158.5	2158.5

표 2 . 연소도에 따른 온도별 핵연료 온도계수

<b>PPV</b>	Temp(K)							
	Burnup (MWD/MTU)	1473.16	1273.16	1073.16	873.16	673.16	473.16	298.16
37 NU	0.00	-14.28	-14.67	-15.12	-15.65	-16.27	-17.08	-18.04
	3756.12	-2.86	-3.52	-4.27	-5.15	-6.27	-7.46	-8.96
	7516.05	2.40	1.70	0.91	-0.06	-1.36	-2.50	-4.00
CANFLEX	0.00	-14.17	-14.56	-15.00	-15.54	-16.17	-16.97	-17.92
	3741.98	-2.89	-3.54	-4.28	-5.15	-6.25	-7.43	-8.91
	7481.54	2.33	1.64	0.86	-0.11	-1.38	-2.51	-3.99
<b>WIMS-AECL</b>	Temp(K)							
	Burnup (MWD/MTU)	1473.16	1273.16	1073.16	873.16	673.16	473.16	293.16
37 NU	0.0	-12.22	-12.62	-13.10	-13.68	-14.67	-16.45	-17.95
	3161.4	0.92	0.48	-0.09	-0.46	-1.22	-2.77	-4.54
	7721.10	7.09	6.71	6.26	6.06	5.76	4.56	3.01
CANFLEX	0.00	-12.20	-12.59	-13.01	-13.68	-14.63	-16.43	-17.92
	3194.70	0.80	0.35	-0.18	-0.57	-1.32	-2.87	-4.60
	7801.60	6.92	6.54	6.07	5.89	5.58	4.40	2.89

표 3 . 연소도에 따른 온도별 감속재 온도계수

<b>PPV</b>	Temp(K)				
	Burnup (MWD/MTU)	353.16	333.16	313.16	293.16
37 NU	0.00	-47.33	-42.71	-38.19	-32.52
	3773.23	122.28	123.94	125.54	127.05
	7579.31	204.49	205.36	206.09	206.40
CANFLEX	0.00	-45.38	-40.89	-36.32	-30.76
	3741.98	122.90	124.41	126.03	127.48
	7481.54	204.68	205.44	206.13	206.39
<b>WIMS-AECL</b>	Temp(K)				
	Burnup (MWD/MTU)	353.16	333.16	313.16	293.16
37 NU	0.00	-58.18	-52.22	-46.90	-40.41
	3161.40	17.27	38.89	42.41	47.35
	7721.10	100.18	100.67	105.69	111.61
CANFLEX	0.00	-57.27	-52.22	-45.86	-39.39
	3193.00	38.18	38.89	43.45	48.57
	7799.50	101.18	101.33	106.62	112.59

표 4. 연소도에 따른 밀도별 기포반응도 변화

PPV	Density(g/cm <sup>3</sup> )	0.0001	0.125	0.25	0.5	0.75
	Burnup (MWD/MTU)					
37 NU	0.00	17.00667	13.88896	10.98603	5.71630	1.01905
	3773.23	11.15075	9.06547	7.15506	3.72063	0.66540
	7579.31	9.00641	7.32415	5.79190	3.03449	0.54853
CANFLEX	0.00000	15.72008	12.85438	10.17890	7.67105	5.30747
	3756.11960	10.15583	8.26767	6.53327	4.91938	3.40498
	7516.05320	8.13446	6.62514	5.24520	3.96315	2.75440
WIMS-AECL	Density(g/cm <sup>3</sup> )	0.0001	0.1	0.3	0.5	0.7
	Burnup (MWD/MTU)					
37 NU	0.00	16.54210	14.37820	10.13465	6.06154	2.09299
	3159.90	14.21403	12.38174	8.73903	5.24358	1.86361
	7718.50	14.14648	12.33628	8.73163	5.24890	1.86216
CANFLEX	0.00	17.87958	15.52287	10.96493	6.55511	2.29859
	3192.50	16.70367	14.68911	10.75544	6.91114	3.20307
	7798.10	15.53757	13.52990	9.60194	5.77503	2.05800

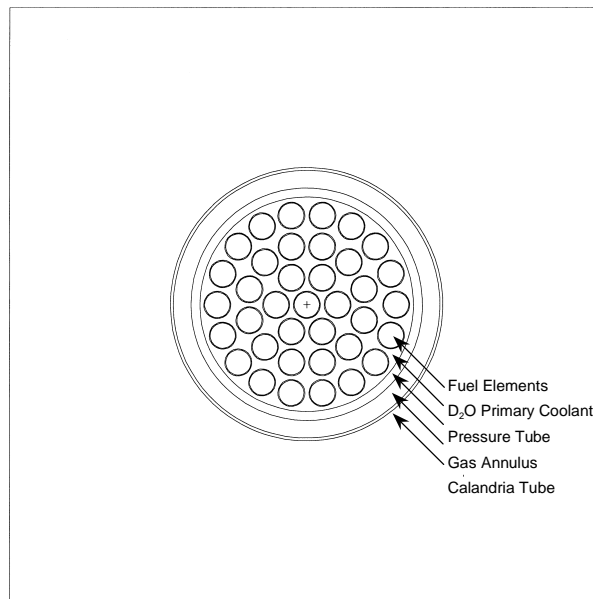


그림 1. 37봉 핵연료 채널 격자 모델

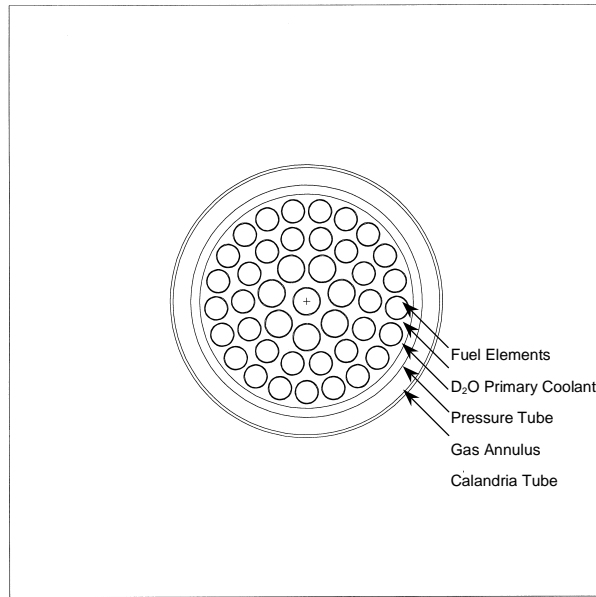


그림 2. 43봉 CANFLEX-NU 핵연료 채널격자 모델

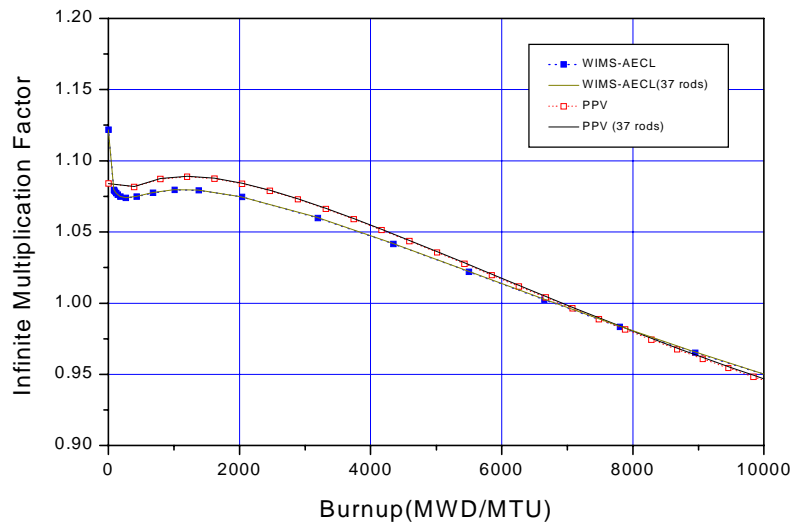


그림 3. 연소도에 따른 무한증배계수 비교

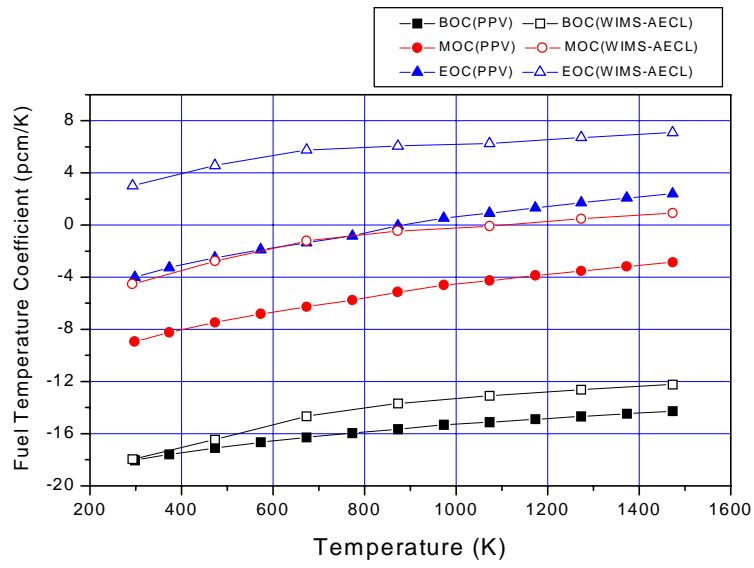


그림 4. 37봉 핵연료 채널에 대한 핵연료 온도계수

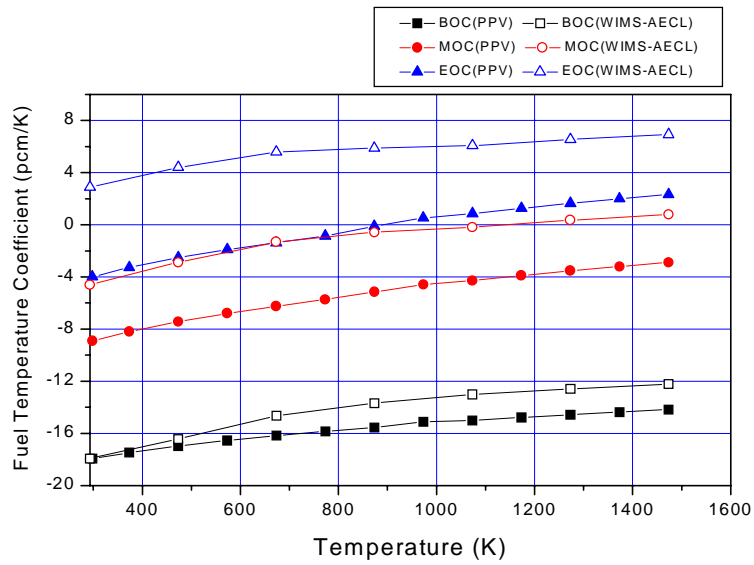


그림 5. 43봉 CANFLEX-NU 핵연료 채널에 대한 핵연료 온도계수



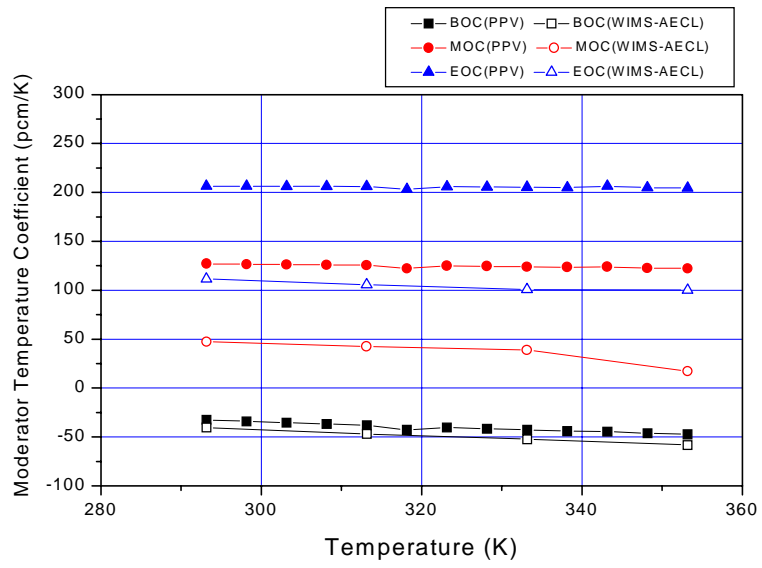


그림 6 37봉 핵연료에 대한 감속재 온도계수변화

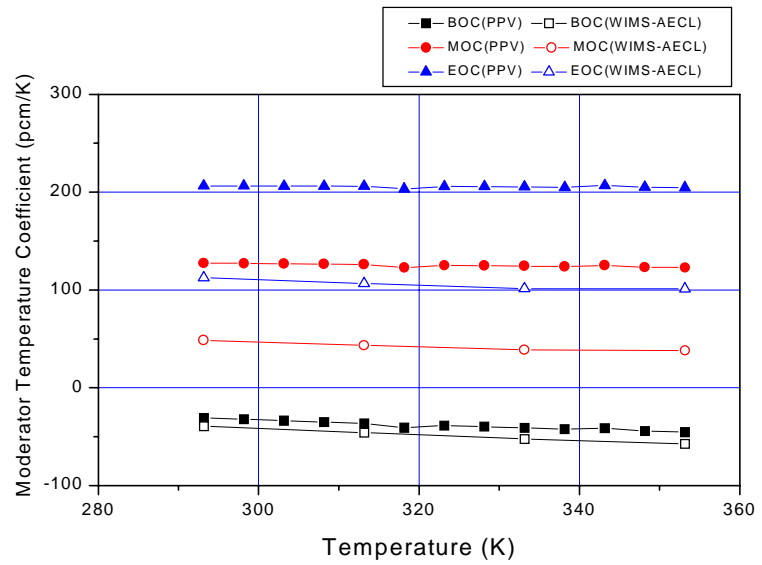


그림 7 43봉 CANFLEX-NU 핵연료에 대한 감속재 온도계수변화

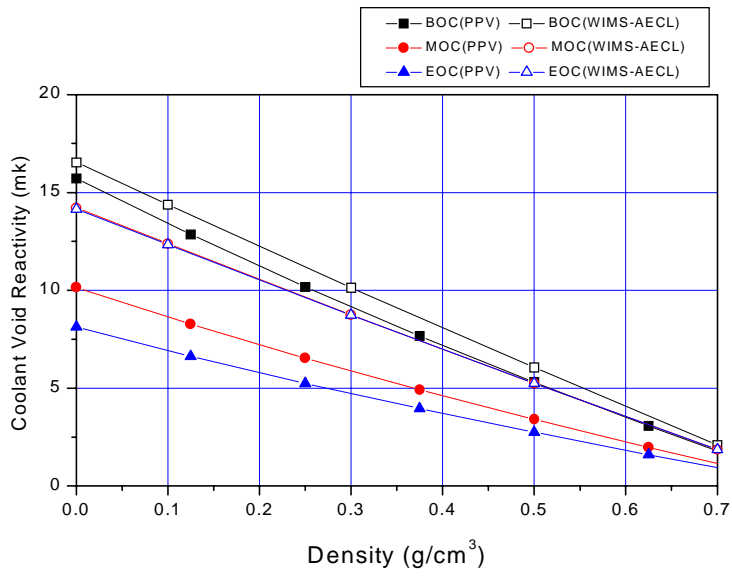


그림 8 37봉 핵연료에 대한 기포반응도 변화

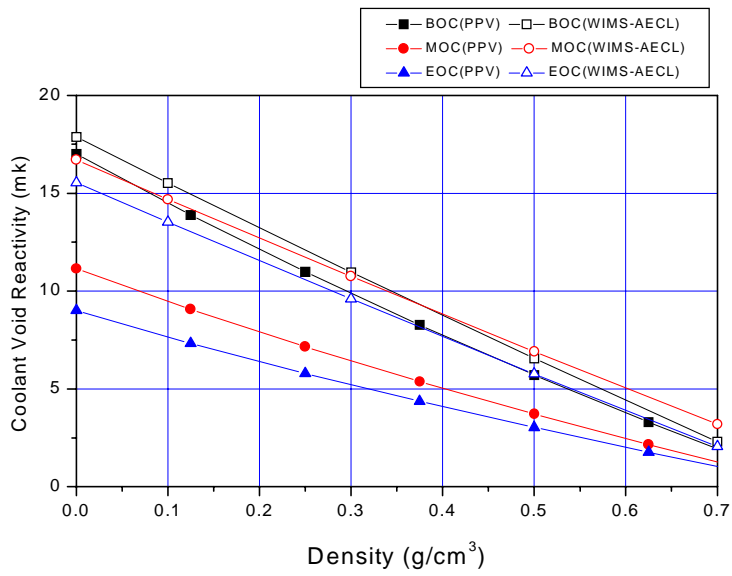


그림 9 43봉 CANFLEX-NU 핵연료에 대한 기포반응도변화