'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Saxton 혼합핵연료 임계실험에 대한 HELIOS 코드 검증

HELIOS Verifications for Saxton critical Experiments Loaded with Mixed-Oxide Fuel

김 종 채, 주 형 국

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

Saxton 플루토늄 프로그램중 혼합핵연료가 단일지역 또는 다지역으로 장전된 임계노심에 대해 HELIOS 코드의 검증작업을 수행하였다. HELIOS의 2차원 계산을 통한 임계노심의 유효증배계수는 단일지역 및 다지역 노심에 대해 실험치와 각각 112pcm 및 210pcm의 표준평균 오차로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 핵연료봉별 출력분포 또한 표준평균 오차가 1.34%로 측정치와 잘 일치하였다.

ABSTRACT

HELIOS code was verified against Saxton critical experiments with MOX single-region cores and with MOX/UO_2 multiregion cores. The calculated effective mutiplication factors were in good agreement with experiments with the standard deviations of 112 pcm for single-region cores and 210 pcm for multiregion cores. The RMS error of 1.34% in rod power distribution also shows good agreement between the calculated and the measured.

1. 개 요

본 연구에서는 HELIOS 코드가 혼합핵연료용 집합체 계산코드로 사용될 수 있는지에 대한 평가의 일환으로 Saxton 임계실험의 단일지역 및 다지역에 대한 2-D 검증계산을 수행하였다.

혼합핵연료에 대한 HELIOS[1] 코드의 검증 목적으로 VENUS 및 PNL30-35 혼합핵연료 임계실험에 대한 검증계산을 수행하여 계산된 임계도 및 반경방향 출력분포가 측정치와 잘 일치하는 것을 확인한 바 있다[2,3]. PNL 임계실험에서 사용된 혼합핵연료에는 Pu-239 원소가 90%이상 함유된 핵무기급의 조성비를 갖고 있으며, 총 플루토늄의 함량은 2wt.%에 불과하다. VENUS 실험은 사용된 혼합핵연료가 현 가압경수로 핵연료집합체와 유사한 플루토늄 조성비와 배열을 갖고 있어, 가압경수로용 혼합핵연료에 대한 격자계산 코드의 검증을 위해서는 의미있는 실험이라 할 수 있다. 그러나 이 실험은 불과 두가지 노심에 대해서만 출력분포 측정실험이 이루어졌기 때문에 많은 양의 자료를 필요로 하는 검증계산에 미흡함이 있다.

Saxton 임계실험의 혼합핵연료는 PNL 실험과 마찬가지로 핵무기급 조성비를 갖는 플루토늄이 이용되었다. 혼합핵연료내의 플루토늄의 총함량은 6.6wt.%로 높으며, 혼합핵연료만의 단일지역 노심뿐 아니라 우라늄핵연료와 함께 다지역 노심도 구성되었다. 노심내에는 제어봉, 알루미늄 판 또는 water slot이 존재하는 다양한 노심을 구성함으로써 나름대로의 혼합핵연료 검증 자료에 대한 가치가 있다고 판단된다.

2. Saxton 임계실험

1960년대에 미국에서는 혼합핵연료를 가압경수로에 상용으로 사용하기 위한 작업의 시작으로 Saxton 프로그램이 착수되었는데, 이 중 임계실험은 1965년 3월부터 7월에 걸쳐 미국과 Euratom의 공동 후원 하에 Westinghouse Reactor Evaluation Center (WREC)의 Critical Reactor Experiment(CRX) Facility에서 수행되었다. 이 실험의 주 목적은 Saxton 노심에 혼합핵연료를 부분적으로 장전하기에 앞서 Saxton 노심을 설계할 코드의 신뢰성을 입증하는 것이었다[4,5].

WREC 실험(CRX Core)은 우라늄핵연료나 혼합핵연료만 구성된 단일지역(Single-Region) 실험 및 농축우라늄과 혼합핵연료를 함께 장전한 다지역(Mutiregion) 실험으로 구분되어 있는데, 이 실험을 통해 측정된 인자들은 반응도, 우라늄 및 혼합핵연료별 출력 분담률, 출력분포, 제어봉가 및 붕산가 등이다. 이 실험에 이용된 우라늄 핵연료는 U-235 농축도가 5.74wt.%이며, 혼합핵연료는 6.6 wt.%의 PuO_2과 나머지는 천연우라늄으로 이루어진 UO_2로 구성되어 있다. 혼합핵연료내의 플루토늄 원소의 조성비는 Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242 원소 각각에 대해 90.47, 8.57, 0.89, 0.04%로서 현재 경수로에 사용되는 조성비와는 많은 차

이가 나고 있다. 표 1은 본 연구에서 사용한 핵연료 제원을 나타낸 것이다.

단일지역 실험노심의 핵연료는 정방형 격자로 배열되어 있으며, 핵연료 격자의 간격은 0.52, 0.56, 0.735, 0.792, 그리고 1.04 인치의 다섯종류로 구성되어 있다. 반면에 다지역 실험노심은 정방향 격자 간격이 0.56인치 하나로만 구성되어 있다. 또한 단일지역의 노심중앙부분 및 다지역의 혼합핵연료와 우라늄핵연료 인접부분의 핵연료봉 5개 자리에 위치한 water hole, alminum plate 또는 제어봉으로 교란된 노심의 반응도 및 출력분포도 함께 측정되었다.

핵연료의 그리드는 격자간격이 0.52 인치와 0.56인치의 두 가지가 사용되었는데, PNL 임계실험과 마찬가지로 0.52인치 격자 간격의 그리드는 0.52인치의 핵연료 격자 구조뿐 아니라 0.735인치 및 1.04인치의 핵연료 격자 배열 노심에서도 사용되었다. 즉 0.735인치 격자노심은 0.52인치 그리드에 대각 방향으로 핵연료가 배열된 상태이며, 1.04인치의 경우는 연료봉 위치를 하나씩 건너 뛴 형태로 배열되었다. 이와 마찬가지로 0.792인치 핵연료 격자구조에는 0.56인치 그리드가 사용되었다.

Saxton 플루토늄 프로그램은 40여가지의 다양한 실험이 수행되었는데 표 2와 3은 본 연구에서 검증계산을 수행한 단일지역 및 다지역 임계실험을 각각 요약한 것이다. 그리고 그림 1은 다지역 실험중 22-27번 까지의 핵연료 배열을 나타낸 것이다.

3. 검증계산 결과 및 논의

Saxton 임계실험의 단일지역 및 다지역 임계실험에 대해 HELIOS 검증계산을 수행하였다. HELIOS는 35군 라이브러리를 사용하였으며, HELIOS의 단위격자 구조는 PNL30-35 임계실험 검증계산[3]시 사용한 기하구조를 그대로 이용하였다. 즉, "sun-mesh" 기하구조에 reflective 경계조건을 사용하였으며, current coupling order는 4를 사용하였다. 또한 공명영역 적분법(RES)에 대한 option은 9를 선택하였다

단일지역 및 다지역 임계실험에 대한 HELIOS 검증계산 결과인 유효증배계수 및 출력분포에 대한 평균표준 오차를 표 2와 3에 각각 나타냈다. 임계치 계산 결과에서는 표준편차가 각각 112 및 210 pcm 으로 전체적으로 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 출력분포의 실측치와 계산값의 비교는 그림 2에서 그림 15까지 나타냈다. 계산된 핵연료봉 출력분포는 다지역 임계실험 노심 14(그림 10)와 20(그림 15)을 제외하고 모든 노심에 대해 실험치와의 평균오차가 2%를 넘지 않는 결과를 보여주고 있다. 다지역 임계실험 노심 14와 20의 출력분포의 평균오차는 각각 2.51%, 2.63%로 이는 일부 핵연료에서의 출력이 실험치 8% 정도의 차이를 보이기 때문이다. 그러나 참고문헌 6에서 이 핵연료 위치에서의 MCNP의 계산결과도 마찬가지로 큰 오차를 보이고 있는 것으로 보아 측정된 출력의 오차가 크거나 이 핵연료 위치 옆의 Mn wire(다지역 노심 20)를 계산상에서 고려하지 않았기 때문인 것으로 생각된다. MOX와 UO_2 핵연료로 구성된 다지역노심의 출력분포는 전체적으로 MOX

핵연료가 장전된 부분은 실험치보다 크게 평가하고 있으며, 이에 반해 UO_2가 장전된 부분은 실험치보다 낮게 평가하는 경향을 보이고 있다. 단일지역이나 다지역 노심중 알루미늄판, water slot 또는 제어봉으로 교란된 노심의 출력분포는 이들 물질 주변에서의 출력분포 오차가 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 제어봉이 삽입된 부분에서는 오차가 커지는 경향을 보이고 있다. 그리고 그림 6에서 15까지의 다지역 임계실험 노심에서 혼합핵연료에 대한 우라늄핵연료의 출력분담율(power sharing factor) 계산 결과를 측정치와 함께 표 4에 나타냈다. 출력분담율은 두 핵연료의 표준 핵연료봉이라고 정해진 하나의 핵연료봉에서 발생된 출력의 상대치로서 두 핵연료의 출력분포를 직접비교 가능하게 해 주는 인자이다. 다지역 임계실험 노심 7(그림 8)에서 2.47% 차이를 보이는 것을 제외하곤 출력분담율에 대한 측정치와 계산값이 2%이내에서 일치하는 결과를 보여주고 있다.

지금까지 수행된 PNL, Saxton 임계실험에 대한 검증계산을 통하여 HELIOS 코드가 혼합핵연료 격자계산 코드로써 활용 가능함을 확인하였다. 그러나 노심분석용 코드와 연계를 통한 노심 계산을 수행함으로써 HELIOS 코드에 대한 불확실도 범위가 입증되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Release Notes for HELIOS System 1.5, TN36/41.16.15, Scandpower (October 1998)
2. 김택겸, 주형국, 정형국, 김영진, "HELIOS Verification Against High Plutonium Content Pressurized Water Reactor Critical Experiments," 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집 (May 1997)
3. 김종채, 주형국, "PNL30-35 혼합핵연료 임계실험에 대한 HELIOS 코드 검증," 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집 (October 1999)
4. E. G. Taylor, "Saxton Plutonium Program : Critical Experiments for the Saxton Partial Plutonium Core," WCAP-3385-54 (EURAEC-1491) (December 1965)
5. E. A. Bassler, D. C. Fischer, N. J. Georges, and E. A. McCabe, "Saxton Plutonium Program: Mechanical, Thermal and Hydraulic Design of Saxton Partial Plutonium Core," WCAP-3385-52 (EURAEC-1491) (December 1965)
6. N. M. Abdurrahman and G. Radulescu, "Benchmark Calculations of the Saxton Plutonium Program Critical Experiments," *Nuclear Technology*, 127(Sep. 1999)

표 1. Saxton 임계실험 핵연료 제원

Fuel Type	Isotopes	Atom Density (atoms/barn-cm)	Geometry (cm)	Clad Material
UO_2(5.74w/o)	^{235}U	1.3049×10^{-3}	Pellet Diameter 0.90678	304 SS
	^{238}U	2.1157×10^{-2}	Clad I.D. 0.91694	
	^{16}O	4.4896×10^{-2}	Clad O.D. 0.99314	
PuO_2-UO_2 Mixture	^{239}Pu	1.3526×10^{-3}	Pellet Diameter 0.856996 Clad I.D. 0.87503 Clad O.D. 0.99314	Zircaloy 4
	^{240}Pu	1.2759×10^{-4}		
	^{241}Pu	1.1407×10^{-5}		
	^{242}Pu	6.0318×10^{-7}		
	^{241}Am	1.7783×10^{-6}		
	^{234}U	1.1688×10^{-6}		
	^{235}U	1.5301×10^{-4}		
	^{238}U	2.1097×10^{-2}		
	^{16}O	4.5155×10^{-2}		

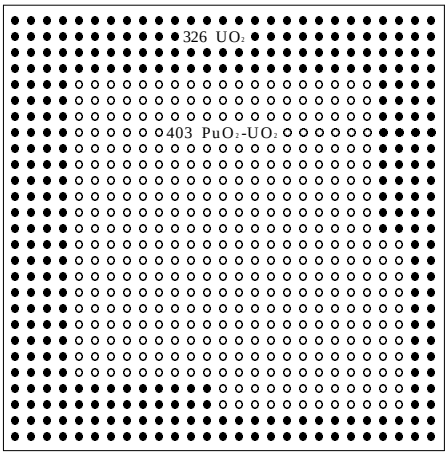
표 2. Saxton Single-Region 임계실험 요약 및 검증계산 결과

Expt. No.	Core Configuration	Pitch (in.)	Soluble Boron (ppm)	Water Temp (°C)	CWH[a)] (cm)	Axial Buckling $\times10^{-3}$ (cm^{-2})	Calculation	
							K_eff	Power Distribution RMS오차(%)
1	22×23	0.52	0	25.8	82.90	1.07	1.00374	·
2	19×19	0.56	0	17.0	80.80	1.14	1.00163	0.84
3	19×19 Water slot at center	0.56	0	15.4	74.90	1.71	0.99987	0.81
4	19×19 Al plate at center	0.56	0	16.0	81.94	1.47	0.99970	0.86
5	19×19	0.56	0	15.75	81.79	1.11	1.00261	·
6	19×19	0.56	25	16.9	87.77	1.28	1.00173	·
7	19×19	0.56	50	16.9	97.83	1.03	0.99964	·
8	21×21 Control rods at center	0.56	0	15.4	77.34	1.65	1.00068	1.73
9	21×21	0.56	309	18.0	83.00	1.43	0.99954	·
10	21×21	0.56	337	18.0	88.06	0.96	1.00015	·
11	13×13	0.735	0	24.1	68.41	1.61	1.00243	·
12	12×12	0.792	0	16.1	76.76	1.34	1.00341	·
13	11×11	1.04	0	19.9	79.50	1.25	1.00153	·

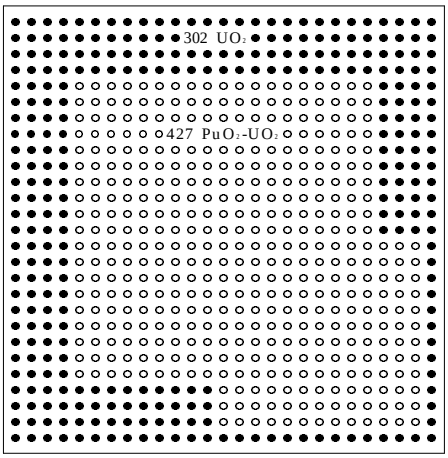
a) : Critical Water Height

표 3. Saxton Multiregion(pitch 0.56 in) **임계실험 요약 및 검증계산 결과**

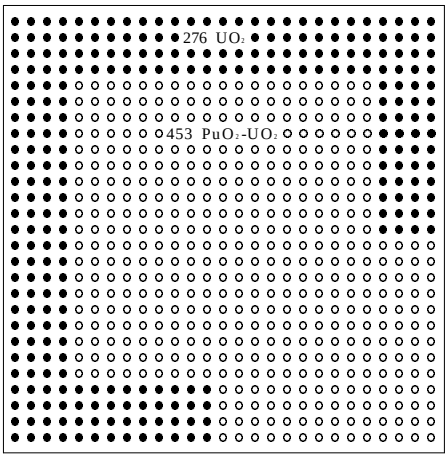
Expt. No.	Core Configuration	Soluble Boron(ppm)	Water Temp.(℃)	CWH (cm)	Axial Buckling $\times 10^{-3}(cm^{-2})$	Calculation	
						K_eff	Power Distribution RMS오차(%)
1	19×19 core, 17×17 MOX inner region, UO_2 outer region	0	15.0	91.31	1.18	1.00175	·
2	19×19 core, 15×15 MOX inner region, UO_2 outer region	0	15.0	92.76	1.15	1.00243	·
3	19×19 core, 13×13 MOX inner region, UO_2 outer region	0	14.8	90.87	1.19	1.00187	·
4	19×19 core, 11×11 MOX inner region, UO_2 outer region	0	16.2	89.43	1.23	1.00199	1.03
5	19×19 core, 11×11 MOX inner region, UO_2 outer region, Al plate at interface	0	15.0	90.56	1.20	1.00338	1.19
6	19×19 core, 7×7 MOX inner region, UO_2 outer region	0	18.0	84.22	1.39	1.00178	·
7	19×19 core, 3×3 MOX inner region, UO_2 outer region	0	21.2	82.17	1.46	1.00078	0.85
8	19×19 core, 17×17 UO_2 inner region, MOX outer region	0	16.0	71.90	1.91	0.99816	·
9	19×19 core, 15×15 UO_2 inner region, MOX outer region	0	16.0	71.67	1.92	0.99809	·
10	19×19 core, 13×13 UO_2 inner region, MOX outer region	0	15.0	72.95	1.86	0.99888	·
11	19×19 core, 11×11 UO_2 inner region, MOX outer region	0	15.6	74.43	1.78	0.99846	1.25
12	19×19 core, 7×7 UO_2 inner region, MOX outer region	0	15.5	77.55	1.64	1.00081	·
13	19×19 core, 3×3 UO_2 inner region, MOX outer region	0	14.7	81.56	1.48	1.00102	·
14	21×21 core, 11×11 MOX inner region, UO_2 outer region, Control rods at interface	0	15.5	71.86	1.91	0.99363	2.51
15	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region	1453	18.2	91.72	1.17	1.00139	1.31
16	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, Water slot at interface	1453	18.0	98.19	1.02	1.00044	1.63
17	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, Al plate at interface	1453	17.8	104.76	0.90	1.00374	1.03
18	27×27 core, 19×19 UO_2 inner region, MOX outer region	1252	20.0	85.05	1.36	1.00011	·
19	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, 3×3 UO_2 insert in MOX	1425	18.5	87.50	1.29	1.00108	1.08
20	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, L-shaped UO_2 insert in MOX region	1425	18.5	90.56	1.20	0.99855	2.63
21	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region	1425	18.0	87.97	1.27	1.00006	·
22	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, **그림 1의** (a)	1425	18.0	85.46	1.35	0.99917	·
23	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, **그림 1의** (b)	1425	18.0	84.78	1.37	0.99856	·
24	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, **그림 1의** (c)	1425	18.0	83.04	1.43	0.99782	·
25	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, **그림 1의** (d)	1425	18.0	84.94	1.37	0.99896	·
26	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, **그림 1의** (e)	1425	18.0	90.18	1.21	1.00059	·
27	27×27 core, 19×19 MOX inner region, UO_2 outer region, **그림 1의** (f)	1425	18.0	98.67	1.01	1.00240	·



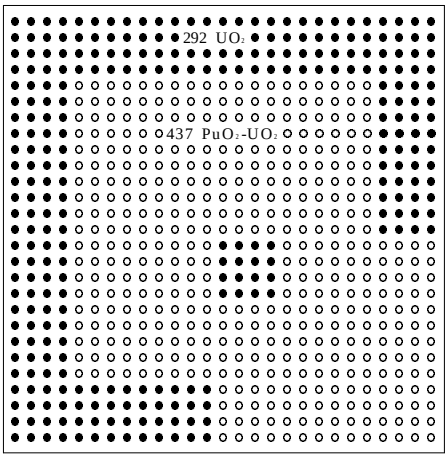
(a) Multiregion 22



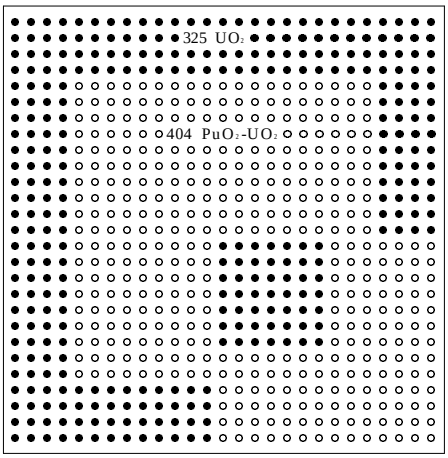
(b) Multiregion 23



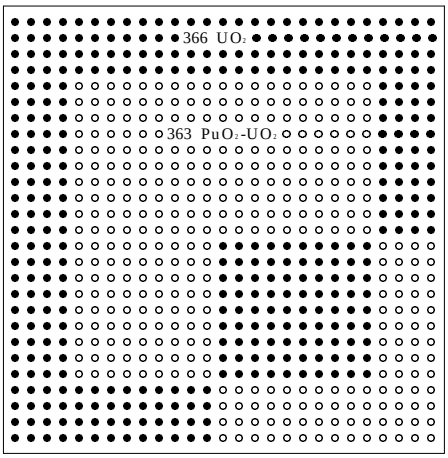
(c) Multiregion 24



(d) Multiregion 25



(e) Multiregion 26



(f) Multiregion 27

그림 1. Saxton Multiregion **임계실험노심**(22-27) **핵연료 배열**

표 4. Saxton **다지역 임계실험에 대한 혼합핵연료와 우라늄핵연료의 출력분담율 계산결과**

Multiregion Case	Measurements	Calculations	Error(%)[(a)]
4	0.8028	0.8064	0.45
5	0.8029	0.8078	0.61
7	0.8539	0.8328	-2.47
11	0.9318	0.9246	-0.77
14	0.8183	0.8188	0.06
15	0.7504	0.7612	1.44
16	0.7597	0.7552	-0.59
17	0.7654	0.7565	-1.18
19	0.8533	0.8377	-1.83
20	0.7698	0.7714	0.21

(a) (calculated - measured)/ measured

Experiment Rod Power
HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 0.84

1.000 0.93									
		1.122 0.03							
		1.210 0.09		1.119 0.30		0.979 0.38		0.955 -1.56	
	1.239 1.29	1.236 -0.24							
			1.201 0.36	1.152 0.03	1.101 -1.52	1.023 -1.34	0.939 0.36		

그림 2. Single-Region Case 2 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 0.81

1.000 -0.72							0.737 1.08		
		1.095 1.24			0.970 -0.11				
		1.362 0.89							
	2.001 -1.33	1.792 -0.85	1.424 0.47						
Water Slot			1.615 -0.03	1.253 1.13	1.155 -0.53	1.066 -0.49	0.984 1.03		

그림 3. Single-Region Case 3 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 0.86

		0.931 -1.02		0.870 -1.68			0.717 -1.27		
1.000 0.64									
			1.028 -0.61		0.926 -0.36				
		1.248 0.89		1.125 0.16					
		1.455 1.12		1.157 0.34					
Al plate			1.397 -0.43	1.173 0.48	1.082 0.43	1.000 0.88	0.940 0.54		

그림 4. Single-Region Case 4 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.73

						0.849 1.46				
				1.045 -0.51						
			1.079 0.46							
		1.077 -1.31								
	0.928 -3.12	0.951 -0.81		1.040 2.63						
Ag-In-Cd Control Rods			1.000 -0.35	1.077 -1.31	1.041 1.36	1.000 1.42		0.886 2.47		

그림 5. Single-Region Case 8 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.03

1.170 -1.01			1.124 -2.38		0.999 -0.80				0.996 -1.41
0.840 -0.92		0.809 0.38		0.751 0.35		0.661 0.72		0.621 0.86	
0.805 -1.08							0.607 0.87		
0.770 1.13		0.759 0.11				0.670 0.15			
0.959 0.72			0.924 -0.90		0.894 -0.35				
0.925 1.39		0.904 1.16		0.859 0.88					
0.966 -0.50	0.957 -0.41		0.913 0.00						
0.974 1.30		0.943 2.10							
0.993 1.02	0.988 0.75			MOX region			UO_2 region		
1.000 1.20									

그림 6. Multiregion Case 4 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.19

			0.863 0.82	1.075 0.17				1.111 1.32	1.097 2.12	1.097 1.31	1.141 -0.72	1.358 -0.84		1.117 0.73	0.957 0.18	0.930 1.39	1.294 -0.22
												1.344 -1.44	Al plate	1.095 0.96			
												1.289 -3.70		1.028 0.58	0.903 1.36		
												1.070 0.35	1.204 -0.33	0.883 1.59		0.879 0.15	
									MOX region			0.976 0.76	1.027 -0.95		0.810 0.28		
				1.000 -0.86									0.997 -0.27			0.780 1.17	
			0.750 -0.27											0.749 -0.44			
									UO_2 region								

그림 7. Multiregion Case 5 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 0.85

1.000 -0.97							0.740 -0.65		
1.144 -0.90					0.961 0.38				
1.229 -0.10			1.188 -0.24						
1.199 -1.57	1.179 1.09	1.223 -0.16							
1.404 0.89	1.477 0.12								
1.318 1.75	MOX region				UO_2 region				

그림 8. Multiregion Case 7 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.25

1.035 3.02			0.985 2.61		0.907 0.65				0.954 0.89
0.669 2.15		0.668 -0.29		0.619 -0.30		0.528 2.26		0.504 0.81	
0.680 0.86			0.644 0.46		0.580 -0.44		0.489 0.62		
0.832 -1.24		0.808 -0.95		0.732 0.17		0.584 0.92			
0.775 -1.93			0.721 -0.98		0.603 -1.00				
0.876 -0.57		0.852 -0.51		0.780 -1.97					
0.943 -1.11	0.931 -0.58		0.887 -1.55						
0.985 -1.65		0.952 -1.04							
0.992 -0.35	0.981 0.00		UO_2 region				MOX region		
1.000 -0.29									

그림 9. Multiregion Case 11 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 2.51

	0.818 0.53	1.000 0.39				0.935 2.04	0.870 6.10	0.852 2.33	0.777 1.35	0.626 1.62	Ag-In-Cd rods	0.531 -3.69	0.611 -0.85	0.620 0.62	0.655 1.29	0.947 0.24
										0.626 2.55		0.557 -5.91				
								0.947 -8.49		0.662 1.73		0.555 -1.64	0.617 0.38		0.654 0.53	
						MOX region				0.732 0.98	0.720 -0.60	0.600 0.16		0.617 0.88		
										0.776 0.13	0.782 0.18		0.641 -0.84		0.624 1.52	
											0.826 0.40			0.595 0.46		
	0.734 -0.53					UO_2 region						0.643 -0.10				
																0.817 1.99

그림 10. Multiregion Case 14 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.31

0.575 0.39													0.297 -1.01
0.526 -1.05												0.276 -4.93	
0.559 -0.85			0.537 -0.73			0.474 -0.46					0.315 -1.32		
0.572 0.40										0.383 -1.62			
0.759 -0.60			0.723 0.27			0.644 -0.37			0.560 -2.24				
0.754 1.32													
0.801 1.32							0.648 0.27						
0.860 0.22													
0.904 0.32					0.805 0.74								
0.947 -0.26													
0.968 0.64			0.942 -0.66										
0.989 0.64						MOX region					UO_2 region		
0.985 2.28													
1.000 1.48													

그림 11. Multiregion Case 15 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.63

0.781 -0.83	0.699 -0.14	0.745 -0.96	0.760 0.06	1.000 0.59				1.240 0.72			1.305 2.23	1.299 0.68	1.226 0.89	1.166 1.91	1.131 1.03	1.112 2.90	1.371 1.45	Wat-er slot	1.117 -3.13	0.823 -1.28	0.706 -0.22	0.762 -0.30
																	1.337 1.99		1.092 -3.11			
																	1.251 0.22		0.988 -2.29			
													MOX region				1.052 1.30	1.141 0.78	0.815 -0.64			
																		0.948 1.02				
											1.019 -1.80											
											0.770 -1.77		UO_2 region						0.507 -2.17			

그림 12. Multiregion Case 16 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power

HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.03

				1.005 0.28				1.245 0.29			1.307 1.92	1.301 0.41	1.233 0.27	1.181 0.53	1.125 0.97	1.105 0.52	1.205 2.36		0.975 -2.74	0.786 0.00	0.704 0.00	0.777 -0.85
																	1.227 -0.77	Al plate	0.937 -0.27			
																	1.155 -0.10		0.894 -1.40			
																	1.020 1.27	1.096 -0.54	0.784 -0.13			
													MOX region					0.956 -0.47				
											1.000 0.23											
											0.765 -0.91		UO₂ region									

그림 13. Multiregion Case 17 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power
HELIOS Rod Power Error(%)

RMS(%) : 1.08

					MOX region						UO₂ region			
	1.014 -1.90													
UO₂ region	0.815 0.09	0.989 0.57												
0.905 -0.81	0.853 -0.08	1.000 1.72	0.917 0.92	0.883 0.20	0.839 1.01		0.756 0.35		0.706 0.00	0.548 -1.84				

그림 14. Multiregion Case 19 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)

Experiment Rod Power
HELIOS Rod Power Error(%)
RMS(%) : 2.63

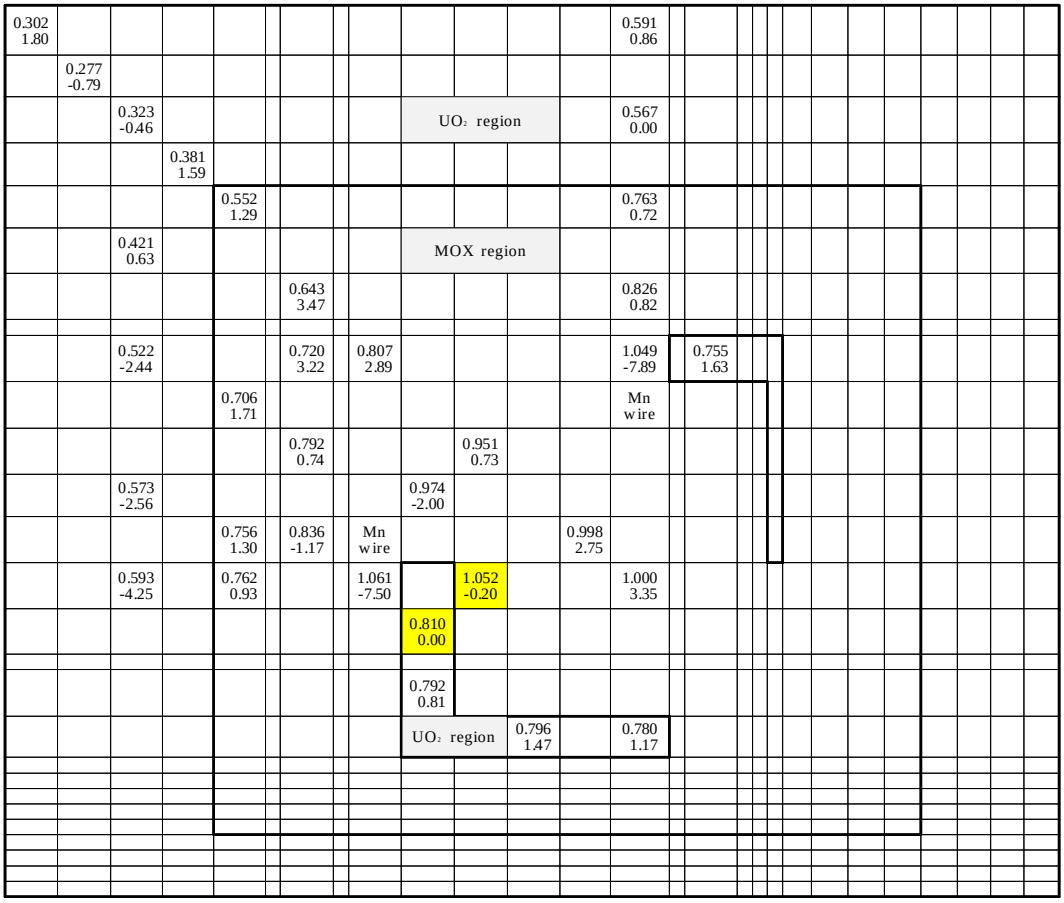


그림 15. Multiregion Case 20 **임계노심 출력분포**((calculated-measured)/ measured)