2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

플루토늄 핵연료를 함유한 검증문제에 대한 HELIOS-1.6 검증 및 HELIOS-1.5와의 비교

Verification of HELIOS-1.6 Against Benchmark Problems with Plutonium Fuel and Comparison with HELIOS-1.5

김 종 채, 주 형 국

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

새롭게 도입된 HELIOS 1.6판과 기존에 사용되고 있는 HELIOS 1.5판과의 비교 계산을 플루토늄이 함유된 B&W 혼합핵연료 임계실험, NEA WPPR Phase 1 & 2, ESADA, TCA, PNL30-35, Saxton 등의 단위격자에 대해서 수행되었으며, 2-D 계산으로 토륨핵연료에 대한 IAEA CRP 검증문제 및 우라늄이 없는 OECD/NEA 수치검증문제인 IMF 검증문제에 대해서 수행하였다. 무한증배계수는 HELIOS 1.6판이 연소가 진행되면서 HELIOS 1.5판에 비해 300pcm 이내에서 높게 평가하는 것으로 나타났다. 그러나 Pu-239가 90% 이상 함유된 ESADA, PNL, TCA, Saxton 임계실험에 대한 단위격자 계산에서는 HELIOS 1.5판에 비해 400pcm 정도까지 낮게 평가하는 것으로 나타났다.

Abstract

HELIOS-1.6 with 45-group library was quaalified against the benchma가 problem with the fuel containing plutonium such as B&W NEA WPPR Phase 1 & 2, ESADA, TCA, PNL30-35, Saxton, IAEA CRP and IMF benchmark problem, and was compared with the calculational result of HELIOS 1.5 with 35-group library. The infinite multiplication factors for WPPR and IAEA CRP calculated with HELIOS-1.6 are larger 300pcm than those calculated with HELIOS-1.5 at high burnups. However, HELIOS-1.6 underestimates multiplication factor within the range of 400 pcm for the critical experiments such as ESADA, PNL, TCA, Saxton containg weapon-grade plutonium.

1. 개 요

혼합핵연료에 대한 HELIOS 1.5[1] 코드의 검증 목적으로 VENUS, PNL30-35 혼합핵연료 임계실험에 대한 검증계산 및 Saxton 임계실험의 단일지역 및 다지역에 대한 2-D 검증계산을 수행하여 임계도의 경우 0.2%keff, 반경방향 출력분포의 경우 RMS오차 1.67% 이내에서 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. 그리고 Saxton 임계실험의 혼합핵연료는 PNL 실험과 마찬가지로 핵무기급 조성비를 갖는 플루토늄이 이용되었으나 혼합핵연료내의 플루토늄의 총함량은 6.6wt.%로 높으며, 혼합핵연료만의 단일지역 노심뿐 아니라 우라늄핵연료와 함께 다지역 노심도 구성되었다. 그리고 노심내에는 제어봉, 알루미늄 판 또는 water slot이 존재하는 다양한 노심으로 구성된 임계실험이다.

본 연구에서는 HELIOS 코드의 미래형핵연료 즉, 혼합핵연료에 대한 검증계산의 연장선으로 새롭게 도입된 HELIOS 1.6[4]판과 기존의 HELIOS 1.5판과의 비교계산을 통하여 HELIOS 1.6판의 특성을 파악하고자 한다. HELIOS 1.5판과 1.6판의 비교계산은 B&W 혼합핵연료 임계실험, NEA WRRP Phase 1 & 2, ESADA, TCA, PNL30-35, Saxton 등의 단위격자에 대해서 수행되었으며, 2-D 계산으로 토륨핵연료에 대한 IAEA CRP 검증문제에 대해서도 수행되었다. 그리고 OECE/NEA 주관의 수치검증 문제인 Inert Martix Fuel(IMF) 1단계 및 2단계 검증문제에 대해서도 수행되었다.

HELIOS 1.5판의 경우 35군을 사용하였으며 1.6판의 경우 45군을 사용하였다. 그리고 경계조건으로는 reflective 경계조건을 사용하였으며, 공명영역 적분법(RES)에 대한 option은 9를 선택하였다. 또한 토륨핵연료에 대한 IAEA CRP 검증문제 수행시 HELIOS의 단위격자 구조는 PNL30-35이나 Saxton 임계실험 검증계산시 사용한 기하구조인 "sun-mesh" 이용하였으며, current coupling order는 4를 사용하였다.

2. HELIOS 1.6판의 특징

임의 형태의 기하구조의 핵연료도 취급할 수 있다는 장점 및 계산의 정확도도 비교적 신뢰할 만하다는 점 때문에 HELIOS는 여러 가지 형태의 핵연료 격자계산 및 집합체계산에 유용하게 쓰이고 있다. 따라서 본 논문에서는 다량의 플루토늄을 포함하고 있는 핵연료에 대해 HELIOS 코드의 계산 능력을 평가하는데 그 목적을 두고 있다. HELIOS는 현재 사용중인 1.4판과 1.5판 외에 새로운 1.6판이 입수되어 현재는 사용 초기 단계에 있다. 본 연구에서는 HELIOS 1.5판과 1.6판의 비교계산을 수행하였는데 HELIOS-1.6의 특징이라 할 수 있는 HELIOS-1.5와의 차이 중 몇 가지 중요한 점은 아래와 같다.

1) (n,2n) 및 (n,3n) 반응을 갖는 핵종이 추가되었으며, 연소계산에 있어서 (n,2n), (n,3n) 반응에 의해 핵종이 붕괴, 생성율을 제대로 계산할 수 있도록 개선되었다. HELIOS 1.5판에서는 (n,2n) 반응의 경우 Th-232, U-233, U-238, Cm-244와 (n,3n) 반응의 경우엔 Th-232, U-233, U-234, Pu-238 등의 일부 중핵종 원소만이 고려되었다. 그러나 HELIOS 1.6판의 경우 핵분열 생성물과 가연성독물질 등을 포함하여 100 가지 핵종의 (n,2n) 및 68 가지 핵종의 (n,3n) 반응을 고려하고 있다.
2) 또한 HELIOS의 design library의 중성자 그룹수는 1.5판에서의 35그룹이 1.6판에서는 45그룹으로 조정되었다. 그 배경은 HELIOS-1.5 35군 및 90군의 경우 WPPR Phase 1 검증계산에서 100pcm 이내에서 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그러나 우라늄핵연료에 대해서는 연소가 진행되면서 190 그룹 중성자 라이브러리와 수백 pcm의 차이를 보임[1]에 따라 이를 개선할 목적으로 즉, 축약된 라이브러리가 우라늄핵연료에 대한 190 그룹 라이브러리와 유사한 결과를 줄 수 있도록 HELIOS 1.5판의 35군 중성자 에너지 영역에서 U-238의 6.7eV 부근의 공명을 세분화하여 7개의 에너지 영역을, 또한 속중성자 영역에 3개의 에너지 구간을 추가함으로써 에너지 구간의 구분을 조정하였다. 따라서 우라늄핵연료에 대한 계산 결과가 연소가 진행되면서 HELIOS-1.5 결과와 큰 차이를 보일 것으로 예상된다.
3) 그리고 Pu-240의 1.06eV 부근의 공명영역 차폐를 고려하기 위하여 Pu-240의 중성자 흡수단면적을 조정하였다. 그 결과 Pu-239 원소가 90%이상 함유된 핵무기급의 조성비를 갖는 혼합핵연료나 Pu-240의 초기 농축도가 큰 핵연료에 대해서는 연소가 진행되면서 HELIOS-1.5와 -1.6의 무한증배계수 결과가 다소 차이를 보일 것으로 예상된다.
4) 이들 외에도 Pu-238과 Am-241이 공명영역을 갖는 핵종으로 고려되었으며, 지발중

성자 분율이 HELIOS 1.5판과 비교하여 20% 정도까지 달라진 것이 HELIOS 1.6판이 1.5판과 달리진 특성이다.

3. 비교계산 결과

HELIOS 1.5판과 1.6판의 비교계산은 B&W 혼합핵연료 임계실험, NEA WPPR Phase 1 & 2, ESADA, TCA, PNL30-35, Saxton 등의 단위격자에 대해서 수행되었으며, 2-D 계산으로 토륨핵연료에 대한 IAEA CRP 검증문제에 대해서도 수행되었다. 단위격자 비교계산에 사용된 임계실험인 B&W, ESADA, PNL30-35, TCA, Saxton 임계실험등은 핵무기급(WG) 조성비를 갖는 플루토늄이 이용되었다. 그리고 NEA WPPR 수치검증 문제는 핵연료에 대한 감속재의 체적비가 일반적인 가압경수로의 전형적인 값을 갖는 STD-PWR과 체적비가 큰 HM-PWR 문제로 되어 있는데 플루토늄 조성비는 동일하게 원자로 등급(RG) 플루토늄 조성비를 가지고 있다. 또한 IAEA CRP 검증문제는 토륨과 플루토늄으로만 구성된 핵연료로 장전되어 있으며, 플루토늄 조성비 또한 현 가압경수로 핵연료집합체에서 생성된 원자로 등급으로 이루어져 있다. 그리고 OECD/NEA 주관의 수치검증문제인 IMF 검증문제는 두단계로 구성되어 있는데 첫 단계 검증문제는 무한의 격자로 구성된 단위격자, 두 번째 단계는 5×5 핵연료 배열로 구성된 소형화된 핵연료집합체 계산 문제이다. 1, 2 단계 검증계산에서 IMF 핵연료내의 핵분열성 물질은 원자로에서 생성된 플루토늄 및 핵무기에서 해체된 플루토늄을 사용하고 있는데, 플루토늄의 동위원소별 조성비는 ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu 각각에 대해 원자로 등급은 58, 24, 13, 5 w/o, 핵무기 등급의 고순도는 93, 6, 0.8, 0.2 w/o 이다. 1단계 검증계산에서 핵연료 격자의 기하학적인 구조는 단위 핵연료 격자로서 핵연료, 피복관 및 감속재로 3개의 영역으로 나누어져 있고, 격자전체의 모양은 정방형 형태이다. 감속재의 핵연료에 대한 체적비는 일반적인 가압경수로의 전형적인 값인 1.9이다. 핵연료물질은 플루토늄외의 Matrix 물질로는 PuO_2-Al_2O_3-ZrO_2-MgO (0.5 g Pu/cm^3, Fuel 1), PuO_2-Al_2O_3-ThO_2-MgO (0.6 g Pu/cm^3, Fuel 2), PuO_2-ZrO_2-Er_2O_3 (0.7 g Pu/cm^3, Fuel 3), PuO_2-ZrO_2-^{10}B (0.7 g Pu/cm^3, Fuel 4)의 네 가지로 달리 구성되어 있다. 그리고 피복관 물질은 천연의 Zirconium 이다. Inert Matrix Fuel에 대한 2단계 검증은 단위격자계산인 1단계와는 달리 소형 핵연료집합체 형태의 구조에 대한 계산이다. 검증문제는 그림1과 같이 5×5 배열의 구조에서 중심부에는 Inert Matrix 핵연료가 위치하고 네 모퉁이에는 water cell이 그리고 나머지 지역에는 UO_2 또는 MOX 핵연료로 구성되어 있다. 자세한 핵연료 제원은 참고문헌 5와 6에 수록되어 있다.

표1은 혼합핵연료 임계실험에 대한 단위격자 비교계산 결과를 나타낸 것이다. 대상 실험들은 중성자 누출이 존재하는 임계실험이나 HELIOS-1.5와 -1.6의 차이를 파악하고자 무한중배계수도 함께 수록하였다. 주기초에 대해서만 수행된 계산 결과 HELIOS-1.5와 -1.6의 무한증배계수가 100pcm 이내에서 일치하는 결과를 보여주고 있으나 중성자 누출이 고려된 유효증배계수는 HELIOS-1.6이 400pcm 정도까지 낮게 평가하는 것으로 나타났다. 그리고 중성자 누출이 고려되지 않은 WPPR 수치검증문제에 대한 계산결과를 그림 2-4에 수록하였는데 연소가 진행되면서 200pcm 이내에서 HELIOS 1.6판이 HELIOS 1.5보다 높게 평가하는 것으로 나타났다. 토륨핵연료 검증문제인 IAEA CRP 검증문제에 대한 연소도별 무한증배계산 결과를 표 2에 수록하였다. HELIOS의 무한증배계수 계산결과 1.5판과 1.6판 결과가 다른 참가국의 결과와 비슷한 값을 보여주고 있으며, WPPR 수치검증 문제와 마찬가지로 HELIOS 1.6판이 HELIOS 1.5판에 비해 주기초는 차이가 없으나 연소가 진행되면서 300pcm 정도 높은 무한증배계수 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 감속재 온도계수, 핵연료온도계수 및 붕산가에 대한 연소도별 비교계산 결과를 표3에 수록하였는데 다른 참가국들과 비슷한 결과를 보여주고 있으며, HELIOS 1.5판과 1.6판이 매우 유사한 것으로 나타났다. 표4에는 HELIOS-1.5로 계산된 연소도별 핵종의 수밀도를 HELIOS-1.5에 대한 상대적인 HELIOS-1.6 결과와 함께 수록하였는데, 연소계산에서 (n,2n) 반응에 의한 핵종의 붕괴·생성율을 개선함으로써 Pu-239, U-233, U-234의 핵종수밀도가 연소후반에 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 주기초 및 주기말에서 집합체내의 봉별 출력분포를 서로 비교하였는데 다른 참가국의 결과와 비슷한 값을 보여주고 있으며 HELIOS version간 집합체내의 봉별 출력분포는 차이가 없었다. 또한 표5와 6에는 각각 IMF 1단계 및 2단 무한증배계수에 대한 HELIOS 계산결과가 수록되어 있다. 단위격자 계산인 1단계 계산결과에서 주기초와 주기말에서 원자로 등급 및 핵무기급 플루토늄 조성을 갖는 핵연료에 대해서 HELIOS version 간 무한증배계수 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 우라늄핵연료가 IMF 핵연료를 둘러쌓고 있는 2단계 검증문제에 대해서는 1단계 결과와는 달리 연소가 진행되면서 원자로 등급 및 핵무기급 플루토늄 조성을 갖는 핵연료 모두에 대해서 600pcm 정도의 무한증배계수 차이를 보이고 있다.

4. 결과 논의

새롭게 도입된 HELIOS 1.6판과 기존에 사용되고 있는 HELIOS 1.5판과의 비교 계산을 플루토늄이 함유된 B&W 혼합핵연료 임계실험, NEA WPPR Phase 1 & 2, ESADA, TCA, PNL30-35, Saxton 등의 단위격자에 대해서 수행되었으며, 2-D 계산으로 토륨핵연료에 대한

IAEA CRP 검증문제 및 OECD/NEA 수치검증문제인 IMF 검증문제에 대해서 수행하였다. Pu-239가 90% 이상 함유된 ESADA, PNL, TCA, Saxton 임계실험에 대한 단위격자 계산에서는 HELIOS 1.5판에 비해 400pcm 정도까지 낮게 평가하는 것으로 나타났으며 핵연료에 대한 감속재비가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 연소계산에 대한 무한증배계수는 전반적으로 HELIOS-1.6이 연소도가 진행되면서 HELIOS-1.5판에 비해 300pcm 정도 높게 평가하는 것으로 나타났으며 이는 연소계산에서 개선된 (n,2n) 반응에 의한 Pu-239, U-233 핵종수밀도 증가에 기인된 것으로 판단된다.

감사의 글

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. 김종채, 주형국, "PNL30-35 혼합핵연료 임계실험에 대한 HELIOS 코드 검증," 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집 (October 1999)
3. 김종채, 주형국, "Saxton 혼합핵연료 임계실험에 대한 HELIOS 코드 검증," 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집 (May 2000)
4. Release Notes for HELIOS Improved (n,xn), Treatment and Library Changes SSP-00/204 Rev.0, Studsvik Scandpower (Feb. 2000)
5. 주형국 외 "혼합핵연료, 토륨핵연료 및 Inert Matrix 핵연료에 대한 HELIOS-1.4 검증," KAERITR-1259/99, 1999.
6. 주형국, 노재만, "우라늄이 없는 경수로 핵연료 수치검증문제에 대한 HELIOS-1.4 및 HELIOS-1.5 코드 검증," 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집 (May 1999)

표 1. 혼합핵연료 임계실험에 대한 HELIOS-1.5에 HELIOS-1.6 계산결과 차이[(a)](pcm)

Expt No.	B&W		ESADA		PNL		TCA		Saxton	
	k_{eff}	k_{∞}	k_{eff}	k_{∞}	k_{eff}	k_{∞}	k_{eff}	k_{∞}	k_{eff}	k_{∞}
1	37	37	32	78	-14	50	-285	14	-50	59
2					-1	60	-216	14	-210	6
3			-102	20	-220	-2	-193	13	-145	8
4			-273	-16	-107	22	-312	-1	-354	-4
5					-277	-16	-315	-7	-443	-24
6			-283	-16	-148	-2	-308	-9	-379	-13
7			-216	-13			-354	-27		
8			27	78			-297	-27		
9			-244	-14			-300	-28		
10			30	81			-287	-27		
11			-208	-12			-296	-28		
12			-249	-25						
13			-256	-24						

(a) Del k = [1/k(HELIOS-1.5) - 1/k(HELIOS-1.6)] $\times 10^5$

표 2. IAEA CRP 토륨 핵연료집합체 문제 증배계수 계산 결과

Burnup (MWD/kgHM)	Russia	Japan	Israel	Korea	
				HELIOS-1.5	HELIOS-1.6
0	1.1890	1.1987	1.1956	1.1869	1.1874
0.5	1.1569	1.1670	1.1643	1.1554	1.1559
20	1.0298	1.0521	1.0290	1.0257	1.0283
40	0.9147	0.9527	0.9119	0.9118	0.9138
60	0.8315	0.8657	0.8314	0.8274	0.8305

표 3. IAEA CRP 토륨 핵연료집합체 문제 반응도계수 계산 결과($\times 10^{-4}$)

Parameter		MTC[a]		DC[b]		BW[c]	
Burnup		0 (MWD/kg)	60 (MWD/kg)	0 (MWD/kg)	60 (MWD/kg)	0 (MWD/kg)	60 (MWD/kg)
Russia		-3.50	-1.50	-0.280	-0.360	-0.380	-1.100
Japan		-2.70	-0.97	-0.283	-0.378	-0.341	-0.864
Israel		-3.33	-1.14	-0.290	-0.477	-0.400	-1.119
Korea	HELIOS1.5	-3.18	-1.54	-0.310	-0.406	-0.407	-1.124
	HELIOS1.6	-3.18	-1.41	-0.298	-0.395	-0.407	-1.117

(a) Moderator Temperature Coefficient
(b) Doppler Coefficient
(c) Boron Worth

표4. IAEA CRP 토륨 핵연료집합체 문제 핵종 수밀도 계산 결과

Isotope	Burnup (,GWd/T)	Number Density (atoms/barn-cm)				
		Korea		Russia	Japan	Israel
		HELIOS-1.5	HELIOS-1.6[a]			
Th-232	0.0	2.059E-02	0.00	2.059E-02	2.059E-02	2.059E-02
	0.5	2.059E-02	0.00	2.059E-02	2.059E-02	-
	20.0	2.037E-02	-0.01	2.037E-02	2.036E-02	2.037E-02
	40.0	2.010E-02	-0.02	2.011E-02	2.008E-02	2.010E-02
	60.0	1.977E-02	-0.04	1.977E-02	1.975E-02	1.977E-02
Pu-238	0.0	2.290E-05	0.00	2.290E-05	2.290E-05	2.290E-05
	0.5	2.279E-05	0.00	2.279E-05	2.279E-05	-
	20.0	1.927E-05	-0.08	1.940E-05	1.952E-05	1.937E-05
	40.0	1.795E-05	-0.12	1.834E-05	1.879E-05	1.793E-05
	60.0	1.632E-05	-0.14	1.687E-05	1.816E-05	1.611E-05
Pu-239	0.0	7.478E-04	0.00	7.478E-04	7.478E-04	7.478E-04
	0.5	7.349E-04	0.00	7.349E-04	7.351E-04	-
	20.0	3.176E-04	-0.01	3.174E-04	3.270E-04	3.147E-04
	40.0	0.822E-04	0.34	0.810E-04	0.961E-04	0.773E-04
	60.0	0.123E-04	1.58	0.118E-04	0.170E-04	0.105E-04
Pu-240	0.0	2.903E-04	0.00	2.903E-04	2.903E-04	2.903E-04
	0.5	2.911E-04	0.00	2.911E-04	2.909E-04	-
	20.0	2.835E-04	0.12	2.826E-04	2.678E-04	2.853E-04
	40.0	2.008E-04	0.29	1.981E-04	1.845E-04	2.014E-04
	60.0	0.875E-04	1.04	0.809E-04	0.839E-04	0.846E-04
Pu-241	0.0	1.534E-04	0.00	1.534E-04	1.534E-04	1.534E-04
	0.5	1.540E-04	-0.01	1.540E-04	1.543E-04	-
	20.0	1.593E-04	-0.08	1.591E-04	1.703E-04	1.578E-04
	40.0	1.227E-04	0.07	1.233E-04	1.360E-04	1.214E-04
	60.0	0.653E-04	0.60	0.650E-04	0.741E-04	0.639E-04
Pu-242	0.0	0.501E-04	0.00	0.501E-04	0.501E-04	0.501E-04
	0.5	0.505E-04	0.00	0.505E-04	0.504E-04	-
	20.0	0.722E-04	-0.04	0.709E-04	0.681E-04	0.702E-04
	40.0	1.030E-04	-0.14	0.988E-04	0.925E-04	0.983E-04
	60.0	1.276E-04	-0.25	1.189E-04	1.103E-04	1.194E-04
U-233	0.0	-	-	-	-	-
	0.5	0.743E-06	0.71	0.732E-06	0.792E-06	-
	20.0	1.545E-04	0.70	1.515E-04	1.600E-04	1.533E-04
	40.0	2.657E-04	0.60	2.612E-04	2.749E-04	2.675E-04
	60.0	3.183E-04	0.47	3.135E-04	3.311E-04	3.235E-04
U-234	0.0	-	-	-	-	-
	0.5	0.158E-07	0.43	0.236E-07	0.252E-07	-
	20.0	0.817E-05	0.51	0.857E-05	0.971E-05	0.791E-05
	40.0	2.557E-05	1.26	2.668E-05	2.886E-05	2.529E-05
	60.0	4.940E-05	2.37	5.320E-05	5.432E-05	5.045E-05

(a) HELIOS-1.5에 대한 상대치

표5. IMF 1단계 문제 무한증배계수 비교

	Participants	WG-1	RG-1	WG-2	RG-2	RG-3	RG-4
At BOL (0 EFPD)	CEA	1.6157	1.4511	1.4123	1.2628	1.1001	1.1111
	ECN	1.6178	1.4521	1.4131(?)	1.2628(?)	1.0979	1.1071
	JAERI	1.6232	1.4504	1.4245	1.2665	1.1092	1.1101
	POLIMI	1.6138	1.4373	1.4082	1.2499	-	-
	PSI	1.6263	1.4615	1.4187	1.2682	1.1085	1.1151
	HELIOS-1.5	**1.6130**	**1.4434**	**1.4085**	**1.2546**	**1.0977**	**1.1029**
	HELIOS-1.6	**1.6144**	**1.4443**	**1.4094**	**1.2553**	**1.1000**	**1.1030**
At EOL (1200 EFPD)	CEA	1.0075	0.7937	1.0863	0.9999	0.8922	0.9460
	ECN	1.0282	0.8170	1.1305(?)	1.0427(?)	0.9103	0.9579
	JAERI	1.0337	0.8152	1.0938	0.9954	0.9168	0.9541
	POLIMI	1.0205	0.8391	1.0842	0.9872	-	-
	PSI	1.0296	0.8099	1.0894	0.9936	0.8981	0.9496
	HELIOS-1.5	**1.0225**	**0.8078**	**1.0844**	**0.9905**	**0.8934**	**0.9396**
	HELIOS-1.6	**1.0222**	**0.8068**	**1.0860**	**0.9922**	**0.8927**	**0.9394**

표 6. IMF 2단계 문제 무한증배계수 비교

	Participants	UO_2-RG1	UO_2-WG1	UO_2-RG2	UO_2-RG3	UO_2-RG4	UO_2-RG5	UO_2-WG5
At BOL (0 EFPD)	CEA	1.4159	1.4257	1.4047	1.3878	1.3774	1.3987	1.4065
	ECN	1.4097	1.4197	1.3994	1.3834	1.3709	1.3937	1.4017
	JAERI	1.4189	1.4297	1.4077	1.3905	1.3782	1.4015	1.4103
	PSI	1.4043	1.4140	1.3935	1.3773	1.3673	1.3876	1.3952
	SKODA	1.4071	1.4172	1.3967	-	1.3694	1.3910	1.3995
	HELIOS-1.5	**1.4052**	**1.4152**	**1.3938**	**1.3772**	**1.3675**	**1.3877**	**1.3958**
	HELIOS-1.6	**1.4045**	**1.4146**	**1.3932**	**1.3769**	**1.3668**	**1.3870**	**1.3952**
At EOL (1200 EFPD)	CEA	0.9046	0.9072	0.9042	0.9094	0.9111	0.9012	0.8971
	ECN	0.9178	0.9207	0.9160	0.9223	0.9241	0.9123	0.9083
	JAERI	0.9205	0.9235	0.9195	0.9258	0.9273	0.9162	0.9120
	PSI	0.9145	0.9173	0.9137	0.9189	0.9209	0.9105	0.90656
	SKODA	0.9090	0.9121	0.9075	-	0.9162	0.9039	0.9004
	HELIOS-1.5	**0.9025**	**0.9053**	**0.9017**	**0.9073**	**0.9090**	**0.8985**	**0.8944**
	HELIOS-1.6	**0.9071**	**0.9099**	**0.9063**	**0.9117**	**0.9134**	**0.9031**	**0.8991**

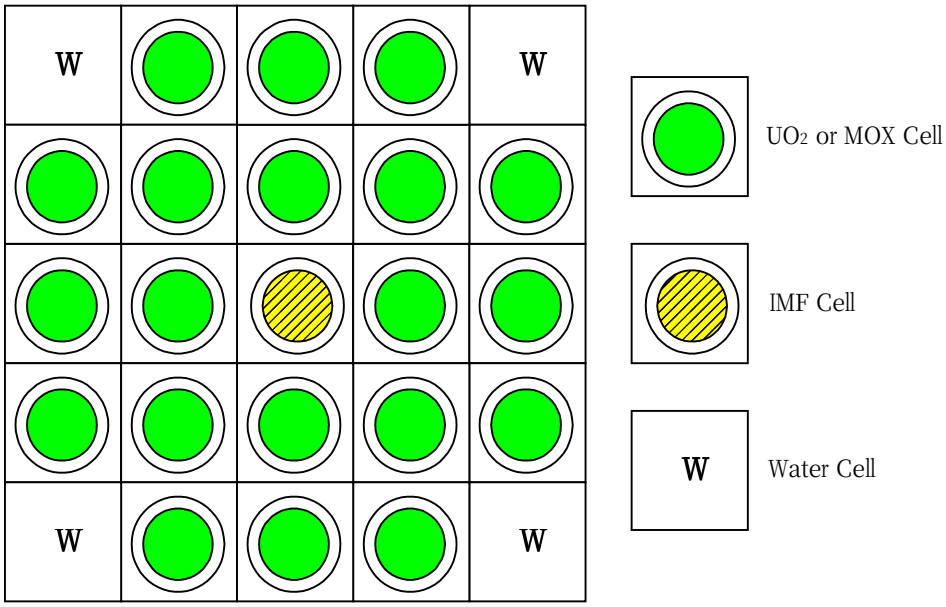

그림 1. IMF 2단계 Benchmark 문제 구조

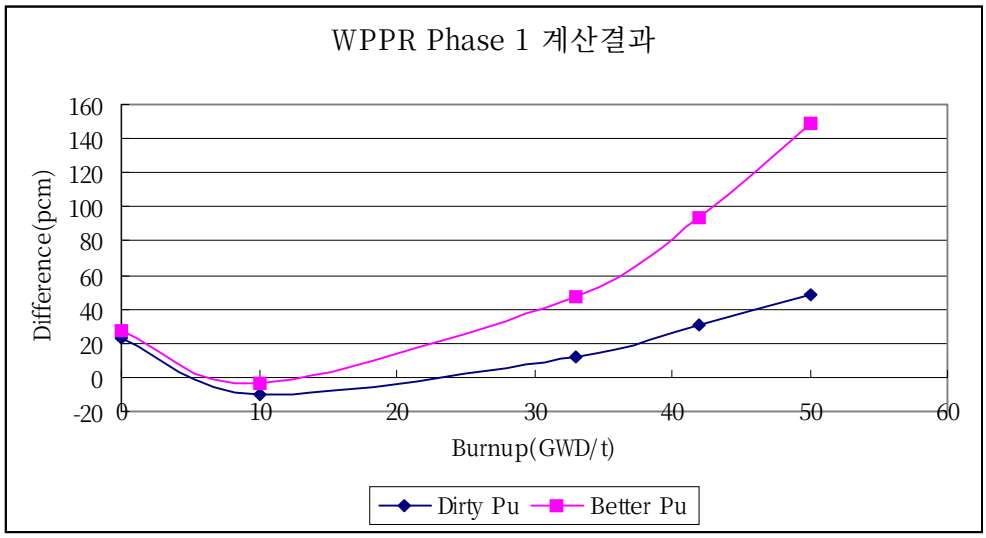

그림 2. WPPR Phase 1에 대한 HELIOS-1.5와 HELIOS-1.6의 무한증배계수 비교

Del kinf = [1/k(HELIOS-1.5) - 1/k(HELIOS-1.6)]$\times 10^5$

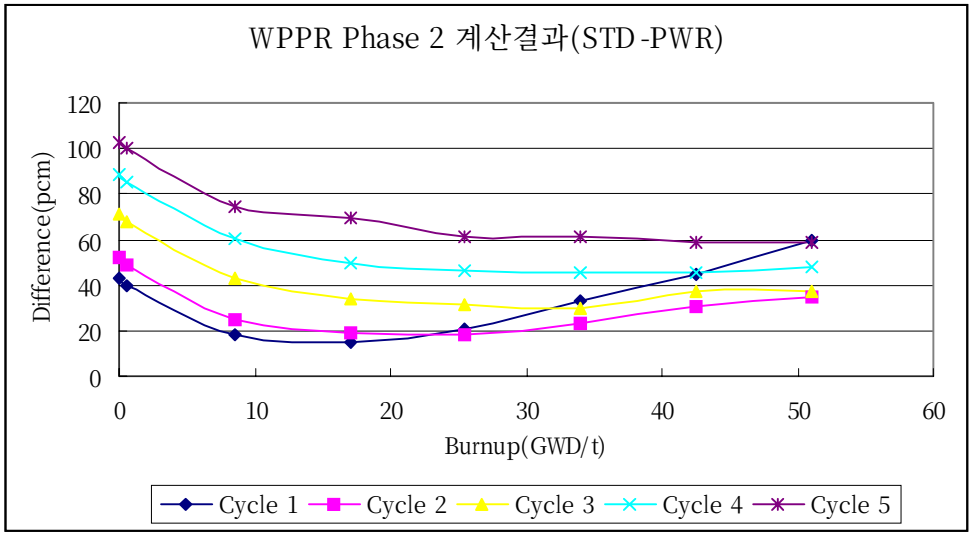

그림 3. WPPR Phase 2(STD-PWR)에 대한 HELIOS-1.5와 HELIOS-1.6의 무한증배계수 비교

Del kinf = [1/k(HELIOS-1.5) - 1/k(HELIOS-1.6)]$\times 10^5$

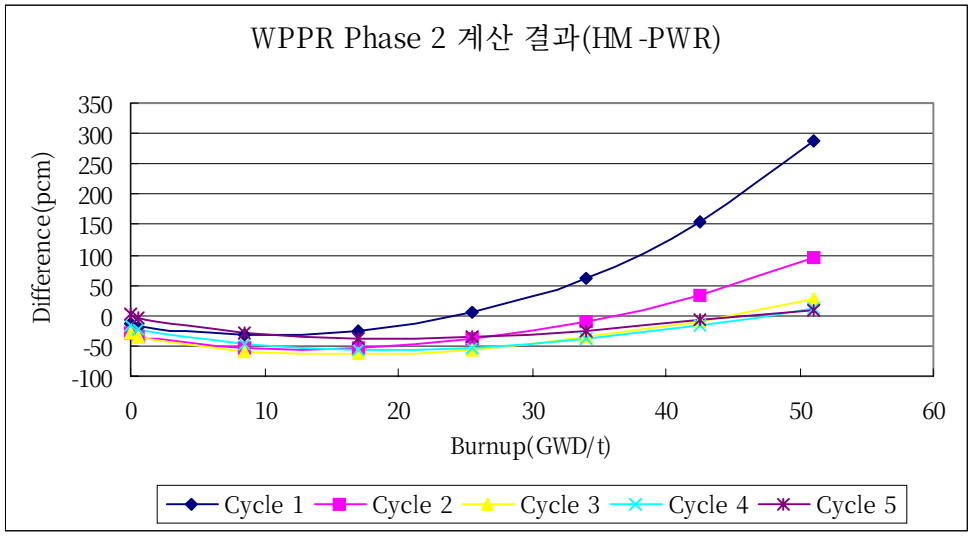

그림 4. WPPR Phase 2(HM-PWR)에 대한 HELIOS-1.5와 HELIOS-1.6의 무한증배계수 비교

Del kinf = [1/k(HELIOS-1.5) - 1/k(HELIOS-1.6)]$\times 10^5$