

## 우라늄이 없는 경수로 핵연료 수치검증문제에 대한 HELIOS-1.4 및 HELIOS-1.5 코드 검증

### Verification of HELIOS-1.4 and HELIOS-1.5 Against LWR Fuel Benchmark with Uranium-Free Fuel

주형국, 노재만

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

플루토늄이 포함된 핵연료에 대한 HELIOS 검증계산의 일환으로 OECD/NEA 주관의 Inert Matrix Fuel (IMF) 1단계 및 2단계 수치검증 문제에 참여하여, 플루토늄을 fissile로 사용하고 우라늄이 없는 핵연료에 대한 HELIOS 검증계산을 수행하였다. 또한 HELIOS의 최신판인 HELIOS-1.5와 HELIOS-1.4의 비교도 35 또는 34그룹으로 축약된 라이브러리에 대해 수행되었다.

HELIOS-1.5와 HELIOS-1.4의 무한중배계수 계산 결과 모두 전 연소도에 걸쳐 IMF 검증계산 참가자들 결과의 평균치와 900 pcm 이내로 잘 일치하였고, doppler 온도계수, void 계수 및 붕산가도 비교적 일치된 결과를 나타내었다. HELIOS-1.5 및 1.4의 비교 결과는 전반적으로 주기말에 1.4판의 무한중배계수가 1.5판 보다 높게 예측하고 있다. 아울러 HELIOS-1.4에서 토륨핵연료에 대한 연소계산의 경우 반응도가 주기초 부근에서 급격히 감소하는 오류가 HELIOS-1.5에서는 개선되었음을 확인하였다.

#### Abstract

As a part of the HELIOS qualification for the fuel containing plutonium, HELIOS code verification has been performed against IMF benchmark problem, which is organized by OECD/NEA. The results of HELIOS-1.4 with 34-group library and HELIOS-1.5 with 35-group library were also compared each other.

The infinite neutron multiplication factors calculated by HELIOS-1.4 and -1.5 show good agreement with all participants' average value within the maximum range of 900 pcm over all burnup range. The doppler temperature coefficient, void coefficient and boron worth are also agreed with other participants' results well. HELIOS-1.4 generally calculates larger infinite neutron multiplication factor at the end of burnup than HELIOS-1.5. It was confirmed that the error of HELIOS-1.4 to predict rapid decrease of reactivity near the beginning of irradiation for thorium fuel is corrected in HELIOS-1.5.

## 1. 개 요

임의 형태의 기하구조의 핵연료도 취급할 수 있다는 장점 및 계산의 정확도도 비교적 신뢰할 만하다는<sup>1,2</sup> 점 때문에 HELIOS는 여러 가지 형태의 핵연료 격자계산 및 집합체계산에 유용하게 쓰이고 있으며 앞으로 개발되는 다양한 핵연료에 대한 핵계산에도 자주 사용되리라 예상된다. 따라서 본 논문에서는 플루토늄이 포함된 핵연료에 대한 HELIOS 검증계산의 일환으로 플루토늄을 fissile로 사용하고 우라늄이 없는 Inert Matrix Fuel(IMF)에 대한 검증계산을 수행하였다. 또한 최근에 release된 HELIOS-1.5<sup>3</sup>와 그 동안 사용하여 왔던 HELIOS-1.4<sup>4</sup>의 비교 목적으로, 35 그룹 또는 34 그룹으로 축약된 라이브러리를 이용한 HELIOS의 계산 결과 비교를 IMF 핵연료 검증문제에 국한하여 수행하였다.

## 2. HELIOS-1.4와 HELIOS-1.5의 차이점

HELIOS는 감마선속 또는 중성자속을 계산하고, 핵연료 연소계산을 수행하는 2차원 수송코드로서, 직선으로 이루어지는 다각형 구조의 2차원적인 기하구조에 대해 중성자 및 감마선 수송방정식을 푼다. 매질을 둘러싸는 매체가 시스템에 미치는 특성은 경계조건으로 대변하고 있다. 계산 대상인 시스템은 여러 개의 space mesh 또는 region으로 나누어지며, 같은 mesh나 region에서의 중성자속은 flat하다고 가정한다. 시스템 내의 어느 mesh나 region이라도 각각 다르게 물질을 정의할 수도 있다. 시스템의 기하학적인 구조는 입력에 의해 정의되며, 어떠한 형태의 핵연료나 핵연료집합체 또는 이 보다 큰 구조라도 계산이 가능하다. 중성자 반응이나 감마선의 반응에 관한 원소들의 특성은 최신의 핵자료 파일인 ENDF/B-VI를 기본으로 만들어진 핵자료 라이브러리에 의해 나타내진다. 총 271개의 원소 또는 mixture의 핵자료 라이브러리가 이용되고 있으며, 계산 가능한 최대 에너지그룹 수는 중성자 및 감마선에 대해 각각 190/48이다.

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 1.4판 외에 새로운 1.5판이 입수되어 현재는 사용 초기 단계에 있다. HELIOS-1.5와 HELIOS-1.4의 차이 중 몇 가지 중요한 점은 아래와 같다<sup>5</sup>.

- 1) HELIOS 계산에 필요한 기억소자의 용량을 1.5판에서는 RUN operator에서 계산시마다 지정해줄 수 있다. 이전의 1.4판에서는 HELIOS계산에 필요한 기억소자의 용량을 compile 할 경우에만 지정할 수 있도록 함으로써, 이 보다 큰 기억용량이 필요할 때에는 다시 compile 해야하는 불편이 있었다.
- 2) RUN operator의 RES option의 default 값이 2에서 4로 바뀌었다. 따라서 RES option의 default 값을 사용한 입력을 HELIOS-1.5에 그대로 사용하게 되면 원하지 않는 계산 결과의 차이를 나타낸다.
- 3) Kr-82, Kr-84, Kr-86, 및 Ce-140 핵종을 핵분열생성물 연소사슬에 추가하였다.
- 4) 이전 판에서는 핵분열 생성물로만 취급되던 Eu를 가연성 흡수체로도 취급될 수 있도록

하였다.

- 5) (n,2n) 및 (n,3n) 반응 핵종에 대한 잘못 지정된 자료를 수정하였다. 이는 특히 토륨핵연료의 연소계산에서 이전의 1.4판에서 나타났던 반응도가 급격히 떨어지는 문제가 해결되었다.
- 6) 이들 외에도 정사각형 구조내의 CCS의 중심이 약간 다른 경우 계산이 중지되는 문제, IAEA 토륨핵연료 벤치마크에서 나타났던 감속제 온도계수 결과의 진동 문제 등이 해결되었다.
- 7) 또한 HELIOS에 사용되는 190-중성자-그룹에 대한 라이브러리는 1.4의 경우와 바뀌지 않았으나, 1.4판에서의 89- 및 34-그룹으로 축약된 라이브러리는 각각 90- 및 35-그룹으로 조정되었다. 그 배경은 각기 축약된 라이브러리가 190-그룹 라이브러리와 유사한 결과를 줄 수 있도록, 6.7eV 부근의 U-238의 공명 및 1eV 부근의 Pu-240의 공명 영역에 해당하는 에너지 구간의 구분을 조정하였다.

### 3. IMF 벤치마크 문제 시방 사항

잉여 플루토늄의 효과적인 소모방책으로 사용될 수 있는 우라늄이 없는 핵연료(Inert Matrix Fuel ; IMF)에 대한 노몰리 연구는<sup>47</sup> OECD/NEA 주관으로 스위스의 Paul Scherrer Institute(PSI), 네덜란드의 Netherlands Energy Research Foundation(ECN), 프랑스의 Commissariat a Energie Atomique(CEA), 일본의 Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI), 이탈리아의 Polytechnic of Milan(POLIMI), 그리고 한국원자력 연구소 등이 참여하고 있다. 이에 대한 첫 작업으로서 각 기관이 보유하고 있는 격자코드를 이용하여 두 단계로 구성이 되어 있는 IMF 벤치마크 문제에 대한 결과를 구하고 상호 비교하여 각자가 보유하고 있는 코드의 문제점을 파악하는 것이다. 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 fissile 물질은 원자로에서 생성된 플루토늄 및 핵무기에서 해체된 플루토늄을 사용하고 있는데, 플루토늄의 동위원소별 조성비는 <sup>238</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>242</sup>Pu 각각에 대해 원자로 등급(RG)은 58, 24, 13, 5 w/o, 핵무기 등급(WG)의 고순도는 93, 6, 0.8, 0.2 w/o 이다.

#### 3.1 IMF 1단계 검증 문제

1단계 검증계산에서<sup>6</sup> 핵연료 격자의 기하학적인 구조는 단위 핵연료 격자로서 핵연료, 피복관 및 감속제로 3개의 영역으로 나누어져 있고, 격자전체의 모양은 정방형 형태이다. 감속제의 핵연료에 대한 체적비는 일반적인 가압경수로의 전형적인 값인 1.9이다. 구체적인 핵연료 제원은 핵연료소자 외경이 0.82 cm, 피복관 외경이 0.95 cm, 격자간격은 1.3085 cm이다. 핵연료물질은 플루토늄 외의 Matrix 물질로는 PuO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-MgO (0.5 gPu/cm<sup>3</sup>, Fuel 1), PuO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ThO<sub>2</sub>-MgO (0.6 gPu/cm<sup>3</sup>, Fuel 2), PuO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.7 gPu/cm<sup>3</sup>, Fuel 3), PuO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-<sup>10</sup>B (0.7 gPu/cm<sup>3</sup>, Fuel 4)의 네 가지로 달리 구성되어 있다. 그리고 피복관 물질은 천연의 Zirconium이다.

### 3.2 IMF 2단계 검증 문제

Inert Matrix Fuel에 대한 2단계 검증은<sup>7</sup> 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<sub>2</sub> 또는 MOX 핵연료로 구성되어 있다. 핵연료의 제원은 1단계 문제에서의 핵연료와 같으며, 격자간격은 1단계 보다 약간 좁은 1.262 cm 이다. IMF 핵연료에서 플루토늄 이외의 Matrix 물질도 모두 다섯 가지인데 처음 네 가지는 1단계 검증문제와 같으며, PuO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>(Fuel 5)가 추가되었다. IMF 핵연료의 driver 핵연료로서 UO<sub>2</sub> 핵연료는 3.8 w/o로 농축되었으며, MOX 핵연료에 사용된 플루토늄은 원자로 등급의 조성을 갖고, 함량은 6.5 w/o이다. 그러나 2단계 문제는 현재 진행중으로 최종 결과는 공식적으로 확인되지 않은 상태로 MOX 핵연료가 driver 핵연료인 경우 여러기관의 결과가 상당한 차이를 보이고 있기 때문에, 본 논문에서는 driver 핵연료가 UO<sub>2</sub>인 경우만 수록하였다.

### 3.3 검증 계산

IMF 1단계 문제는 무한 격자로서 본 계산에서는 완전 반사조건을 경계조건으로 사용하여 단위 격자계산을 수행하였다. 원자로 등급의 플루토늄은 네가지 핵연료 모두에 대하여 고려하였고, 핵무기 등급의 플루토늄은 Fuel 1 및 2에 대해서만 고려하였다. 연소계산에 필요한 출력밀도는 Fuel 1 및 2의 경우는 15 kW/m로, Fuel 3 및 4는 19 kW/m로 하였다. 핵연료, 피복재 및 감속재 영역의 온도는 전출력 조건과 유사하게 각각 600, 350, 300°C로 가정하였다. 1단계 문제에서 연소도별 핵연료의 반응도뿐만 아니라 doppler 온도계수, void 계수, 및 붕산가를 연소도별로 계산하였다.

IMF 2단계 문제에서는 핵연료집합체의 무한중배계수 외에 IMF 핵연료 및 driver 핵연료에 대해서는 중성자생성률/흡수율로 정의하는 무한중배계수도 계산하였다. 이외에도 delayed neutron fraction, neutron lifetime과 같은 동특성인자, IMF 핵연료의 상대출력, 각 핵종의 수밀도 등도 계산하였으나 본 논문에서는 무한중배계수에 대해서만 그 결과를 수록하였다.

## 4. 검증계산 결과

IMF 1, 2단계 문제에 대한 HELIOS-1.4 및 -1.5 계산 결과를 다른 참가기관의 결과와 비교하였다. HELIOS계산에 사용된 라이브러리의 에너지 그룹수는 1.4의 경우는 34그룹, 1.5의 경우는 35그룹을 사용하였다. 다른 참가기관이 사용한 코드 및 기본적인 핵자료는 표1과 같다.

IMF 1단계 계산 결과에서 HELIOS의 무한중배계수는 표2에서 보듯이 1.4판 및 1.5판 모두 참가기관의 평균치와 모든 핵연료에 대해 전 연소도 구간에 걸쳐 최대 900 pcm 이내로 잘 일치하고 있다. HELIOS-1.4 와 -1.5의 비교는 모든 핵연료에 대해 주기초에는 원자로 등급의 플루토늄을 사용하는 핵연료의 경우 fuel-3을 제외하고는 HELIOS-1.4가 HELIOS-1.5보다 400 pcm 정도 낮은 값을 보이고 있으나, 고순도의 플루토늄을 사용한 핵연료는 HELIOS-1.4가 HELIOS-1.5보다 6~700 pcm 높은 값을 보이고 있으나 결과를 보이고 있다. 서로 유사한 값을 보이거나, 주기말에서는 원자로 등급의 플루토늄을 사용하는 핵연료의 경우 HELIOS-1.4가 HELIOS-1.5보다 250~700 pcm 정도 높은 값을 보이고 있다. 비록 주기말이라 하더라도 핵무기 등급의 플루토늄을 사용한 핵연료는 비슷한 결과를 보이고 있다. 이는 HELIOS-1.4와 -1.5의 가장 큰 차이가 축약된 라이브러리를 사용하는 경

우 U-238과 Pu-240의 중명영역의 에너지 구간을 구분하는데 나타나는데, IMF핵연료에는 우라늄이 존재하지 않고, 핵무기 등급의 플루토늄을 사용하면 Pu-240의 양이 적기 때문이다. 특기할만한 사항은 HELIOS-1.4의 문제점으로 앞서도 언급한바와 같이 1단계 문제에서 토륨 핵종이 들어있는 Fuel 2의 경우 HELIOS-1.4 및 1.5의 결과의 차이가 두드러지지 않는다는 점이다. 핵연료의 반응도 외에 HELIOS의 연소도별 doppler 온도계수, void 계수, 및 붕산가는 표3 부터 표6까지에서 보는바와 같이 RG-3핵연료에 대한 주기초에서의 doppler 온도계수 및 붕산가를 제외하고는 전반적으로 다른 기관의 결과와 유사한 값을 보이고 있으며, 1.4 및 1.5의 차이는 크게 나타나지 않고 있다. 그러나 89그룹 라이브러리를 사용한 HELIOS-1.4의 RG-3핵연료에 대한 주기초에서의 doppler 온도계수 및 붕산가는 다른 참가자들의 결과와 유사한 값을 보이고 있다.

IMF 2단계 문제에 대해서는 현재 각 기관마다 최종결과를 검토하는 중에 있으므로 무한중배계수만을 비교하였는데, 표7에서 보듯이 핵연료집합체에 대한 무한중배계수는 1.4판 및 1.5판 모두 참가기관의 평균치와 모든 핵연료에 대해 주기초에서는 최대 500 pcm 이내로 잘 일치하고 있다. 주기말에서는 1.5판의 경우 최대 900 pcm 범위 내에서 과소평가하고 있는데, 1.4판의 결과는 1.5판보다 참가자들의 평균치와 더 근접한 결과를 나타내고 있다. 표 7 및 그림 2, 3, 4에서 보는바와 같이 HELIOS-1.4와 1.5의 차이가 주기말에서 모든 경우에 800 pcm 정도 차이가 나고 있다. Studvik Scandpower의 보고서[6]에 의하면 우라늄핵연료의 경우 190 그룹의 master 라이브러리와 1.4판용 34 그룹 라이브러리의 의한 무한중배계수의 차이는 34 그룹 라이브러리가 주기초에는 약 30 pcm 높게, 주기말에는 400 내지 500 pcm 높게 계산하는 것으로, 1.5판용 35 그룹 라이브러리는 주기초에는 약 30 pcm 낮게, 주기말에는 150 pcm 정도 낮게 계산하는 것으로 보고되어 있다. 본 논문에서 분석하고 있는 IMF 2단계 검증문제에서 핵연료집합체 중심의 1개의 IMF 핵연료와 네 구석의 water hole을 제외한 나머지 20개는 우라늄핵연료로 되어 있으므로 Studvik Scandpower의 보고서에서<sup>6</sup> 나타난 경향이 그대로 드러나고 있다. 그림3 과 4는 토륨이 들어가 있는 fuel-2 및 fuel-5에 대한 무한중배계수를 보여주고 있는데, HELIOS-1.4의 토륨핵연료에 대한 연소계산시 주기초 바로 직후 반응도가 급격히 떨어지는 문제가 나타나고 있다. 이 그림에서 보듯이 HELIOS-1.5에서는 이러한 문제가 개선되었다. 그림5는 IMF핵연료만의 무한중배계수를 보여주고 있는데 토륨핵연료 연소계산에 대한 HELIOS-1.4의 문제점과 HELIOS-1.5의 개선 사항이 마찬가지로 나타나고 있다. IMF 핵연료 내의 플루토늄의 조성비를 고순도로한 경우가 그림4에 있는데, 이들을 그림2와 3과 비교하여 보면 원자로 등급의 플루토늄에 대한 경향과 크게 다르지 않다.

## 5. 결론 및 논의

임의 형태의 기하구조의 핵연료도 취급할 수 있다는 장점 및 계산의 정확도도 비교적 신뢰할 만하다는 점 때문에 HELIOS는 여러 가지 형태의 핵연료 격자계산 및 집합계산에 유용하게 쓰이고 있으며 앞으로 개발되는 다양한 핵연료에 대한 핵계산에도 자주 사용되리라 예상된다. 따라서 본 논문에서는 플루토늄이 포함된 핵연료에 대한 HELIOS 검증계산의 일환으로 플루토늄을 fissile로 사용하고 우라늄이 없는 Inert Matrix Fuel(IMF)에 대한 검증계산을 수행하였다. 또한 최근에 release된 HELIOS-1.5와 그 동안 사용하여 왔던 HELIOS-1.4의 비교 목적으로, 35 그룹 또는 34 그룹으로 축약된 라이브러리를 이용한 HELIOS의 계산 결과 비교를 IMF 핵연료 검증문제에 국한

하여 수행하였다.

HELIOS-1.5와 HELIOS-1.4의 무한중배계수 계산 결과 모두 전 연소도에 걸쳐 IMF 검증계산 참가자들 결과의 평균치와 900 pcm 이내로 잘 일치하였고, doppler 온도계수, void 계수 및 붕산가도 비교적 일치된 결과를 나타내었다. HELIOS-1.5 및 1.4의 비교 결과는 전반적으로 주기말에 1.4관의 무한중배계수가 1.5관 보다 높게 예측하고 있다. 아울러 HELIOS-1.4에서 트롬핵연료에 대한 연소계산의 경우 주기초 부근에서 반응도가 급격히 감소하는 오류가 HELIOS-1.5에서는 개선되었음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고 문헌

1. 주형국 외 4인, 혼합핵연료, 트롬핵연료 및 *Inert Matrix* 핵연료에 대한 HELIOS 1.4 검증, KAERI/TR-1259/99, 한국원자력연구소, 1999.
2. 김종채 외 4인, "HELIOS/MASTER 핵설계체계의 반응도 및 첨두출력인자 불확실도 평가," '99년 계학술발표회, 한국원자력학회, 5월, 1999년. (발표예정)
3. HELIOS Documentations, Studvik Scandpower 1998.
4. HELIOS Documentations, Studvik Scandpower 1995.
5. F.D.Giust, *Technical Note : Release Notes for HELIOS System 1.5*, Studvik Scandpower, October 1998.
6. J.M.Parrate, *Benchmark Proposal on Non-Fertile Fuel*, OECD/NEA,1996.
7. J.M.Parrate, *Benchmark on Non-Fertile Fuel : Phase 2 Heterogeneous Configuration*, OECD/NEA, 1998.
8. S. Boerresen, *Comparoson of HELIOS-1.5 and HELIOS-1.4 in Fuel Assembly and Pin-Cell Burnup Calculation*, Studvik Scandpower, October 1998.

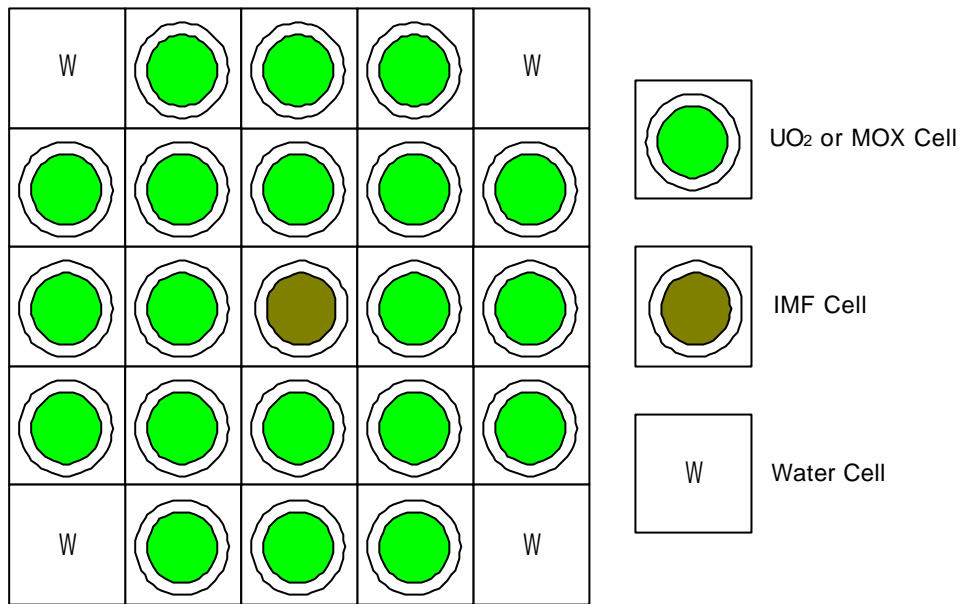


그림1. IMF 2단계 Benchmark 문제 구조

표1. IMF Benchmark 문제 참가기관의 사용 코드 및 핵자료

IMF Benchmark Participants	Code	Basic Cross Section
CEA	APPOLO-2	JEF-2.2
ECN	SCALE(WIMS7B)*	JEF-2.2 (WIMS-97/JEF-2.2)*
JAERI	SRAC-95	JENDL-3.2
POLIMI	WIMS	WIMS-86
PSI	BOXER	JEF-1.1
SKODA	WIMS7B	JEF-2.2
KAERI	HELIOS-1.4 and -1.5	ENDF-B/VI

\* : 2단계

표2. IMF 1단계 문제 무한중배계수 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
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>1.6205</b>	<b>1.4397</b>	<b>1.4143</b>	<b>1.2501</b>	<b>1.0974</b>	<b>1.0992</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>1.6130</b>	<b>1.4434</b>	<b>1.4085</b>	<b>1.2546</b>	<b>1.0977</b>	<b>1.1029</b>
	Average	1.6186	1.4479	1.4153	1.2582	1.1018	1.1073
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
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>1.0224</b>	<b>0.8129</b>	<b>1.0850</b>	<b>0.9931</b>	<b>0.8992</b>	<b>0.9467</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>1.0225</b>	<b>0.8078</b>	<b>1.0844</b>	<b>0.9905</b>	<b>0.8934</b>	<b>0.9396</b>
	Average	1.0235	0.8137	1.0877	0.9923	0.9017	0.9489

표3. IMF-I Benchmark 문제 Doppler Temperature Coefficient 계산 비교 (pcm/°C)

	Participants	WG-1	RG-1	WG-2	RG-2	RG-3	RG-4
At BOL (0 EFPD)	CEA	-1.18	-1.31	-	-	-1.63	-0.79
	ECN	-1.21	-1.32	-3.18	-3.26	-1.45	-0.74
	JAERI	-1.37	-1.58	-3.23	-3.41	-1.73	-0.64
	POLIMI	-1.16	-1.10	-3.10	-2.98	-	-0.49
	PSI	-1.16	-1.39	-3.14	-3.39	-1.83	-0.99
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-0.97</b>	<b>-1.40</b>	<b>-2.98</b>	<b>-3.41</b>	<b>+0.32(-1.81)*</b>	<b>-0.94</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-1.08</b>	<b>-1.37</b>	<b>-3.07</b>	<b>-3.37</b>	<b>-1.77</b>	<b>-0.90</b>
At EOL (1200 EFPD)	CEA	-0.64	-0.69	-	-	-1.29	-1.12
	ECN	-0.74	-0.77	-3.00	-3.24	-1.34	-1.24
	JAERI	-0.36	-0.04	-2.88	-3.06	-1.04	-0.87
	POLIMI	-0.67	-0.49	-2.82	-2.78	-	-0.70
	PSI	-0.90	-0.96	-3.09	-3.33	-1.49	-1.37
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-0.97</b>	<b>-0.67</b>	<b>-3.04</b>	<b>-3.19</b>	<b>-1.25</b>	<b>-1.17</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-0.91</b>	<b>-0.49</b>	<b>-3.00</b>	<b>-3.14</b>	<b>-1.14</b>	<b>-1.05</b>

\* : 84-group 라이브러리 사용



표4. IMF-1단계 Benchmark 문제 Boron Coefficient 계산 비교 (pcm/ppm)

	Participants	WG-1	RG-1	WG-2	RG-2	RG-3	RG-4
At BOL (0 EFPD)	CEA	-4.11	-4.40	-	-	-3.00	-2.61
	ECN	-3.77	-4.04	-3.21	-3.35	-2.73	-2.38
	JAERI	-3.80	-4.07	-3.25	-3.40	-2.80	-2.43
	POLIMI	-3.73	-3.96	-3.18	-3.29	-	-2.33
	PSI	-3.82	-4.09	-3.25	-3.40	-2.78	-2.42
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-3.71</b>	<b>-3.97</b>	<b>-3.16</b>	<b>-3.30</b>	<b>-1.45(-2.73)+</b>	<b>-2.36</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-3.70</b>	<b>-3.98</b>	<b>-3.15</b>	<b>-3.30</b>	<b>-2.71</b>	<b>-2.36</b>
At EOL (1200 EFPD)	CEA	-13.15	-20.89	-	-	-9.98	-10.70
	ECN	-11.80	-18.60	-4.57	-5.37	-8.87	- 9.41
	JAERI	-11.36	-18.41	-4.66	-5.52	-9.16	- 9.46
	POLIMI	-11.45	-17.49	-4.61	-5.68	-	- 9.43
	PSI	-11.61	-18.59	-4.68	-5.53	-9.17	- 9.62
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-11.09</b>	<b>-17.71</b>	<b>-4.50</b>	<b>-5.31</b>	<b>-8.81</b>	<b>- 9.10</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-11.06</b>	<b>-17.88</b>	<b>-4.50</b>	<b>-5.33</b>	<b>-8.92</b>	<b>- 9.23</b>

\* : 84-group 라이브러리 사용

표5. IMF 1단계 Benchmark 문제 Void Coefficient (between 0 and 10% Void) 계산 비교 (pcm/%void)

	Participants	WG-1	RG-1	WG-2	RG-2	RG-3	RG-4
At BOL (0 EFPD)	CEA	-50.9	-86.5	-	-	-134	-54.5
	ECN	-50.9	-87.1	-133	-163	-137	-58.3
	JAERI	-49.1	-85.9	-128	-158	-129	-55.7
	POLIMI	-58.0	-91.0	-139	-163	-	-65.3
	PSI	-51.5	-86.0	-133	-161	-136	-58.3
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-52.2</b>	<b>-92.9</b>	<b>-133</b>	<b>-166</b>	<b>-132</b>	<b>-62.8</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-53.1</b>	<b>-89.3</b>	<b>-134</b>	<b>-166</b>	<b>-133</b>	<b>-61.5</b>
At EOL (1200 EFPD)	CEA	-114	-89	-	-	-206	-170
	ECN	-110	-89	-164	-175	-198	-171
	JAERI	-113	-90	-171	-182	-194	-171
	POLIMI	-107	-85	-169	-170	-	-156
	PSI	-112	-89	-176	-186	-199	-172
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-133</b>	<b>-109</b>	<b>-181</b>	<b>-191</b>	<b>-222</b>	<b>-193</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-132</b>	<b>-103</b>	<b>-180</b>	<b>-189</b>	<b>-218</b>	<b>-188</b>

표6. IMF 1단계 Benchmark 문제 Void Coefficient (between 0 and 95% Void) 계산 비교 (pcm/%void)

	Participants	WG-1	RG-1	WG-2	RG-2	RG-3	RG-4
At BOL (0 EFPD)	CEA	-33.0	12.2	-	-	81.4	126.6
	ECN	-35.3	8.3	-296	-267	69.2	105.0
	JAERI	-43.3	1.0	-298	-269	97.2	116.4
	POLIMI	-	-	-	-	-	-
	PSI	-55.3	-13.4	-306	-280	46.6	84.1
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-63.8</b>	<b>- 4.2</b>	<b>-299</b>	<b>-259</b>	<b>60.8</b>	<b>76.9</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-58.1</b>	<b>- 3.6</b>	<b>-295</b>	<b>-260</b>	<b>59.2</b>	<b>73.3</b>
At EOL (1200 EFPD)	CEA	-417	-506	-	-	-444	-406
	ECN	-403	-493	-362	-363	-420	-404
	JAERI	-391	-491	-383	-387	-418	-392
	POLIMI	-	-	-	-	-	-
	PSI	-408	-499	-390	-393	-442	-424
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>-414</b>	<b>-511</b>	<b>-373</b>	<b>-373</b>	<b>-468</b>	<b>-434</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>-421</b>	<b>-514</b>	<b>-376</b>	<b>-378</b>	<b>-477</b>	<b>-443</b>

표7. IMF 2단계 문제 핵연료집합체의 무한중배계수 비교

	Participants	UO <sub>2</sub> -RG1	UO <sub>2</sub> -WG1	UO <sub>2</sub> -RG2	UO <sub>2</sub> -RG3	UO <sub>2</sub> -RG4	UO <sub>2</sub> -RG5	UO <sub>2</sub> -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
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>1.4047</b>	<b>1.4152</b>	<b>1.3933</b>	<b>1.3768</b>	<b>1.3669</b>	<b>1.3871</b>	<b>1.3958</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>1.4052</b>	<b>1.4152</b>	<b>1.3938</b>	<b>1.3772</b>	<b>1.3675</b>	<b>1.3877</b>	<b>1.3958</b>
	Average	1.4094	1.4195	1.3984	1.3823	1.3711	1.3925	1.4007
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
	<b>HELIOS-1.4</b>	<b>0.9108</b>	<b>0.9136</b>	<b>0.9101</b>	<b>0.9157</b>	<b>0.9174</b>	<b>0.9066</b>	<b>0.9026</b>
	<b>HELIOS-1.5</b>	<b>0.9025</b>	<b>0.9053</b>	<b>0.9017</b>	<b>0.9073</b>	<b>0.9090</b>	<b>0.8985</b>	<b>0.8944</b>
	Average	0.9114	0.9142	0.9104	0.9166	0.9180	0.9070	0.9030

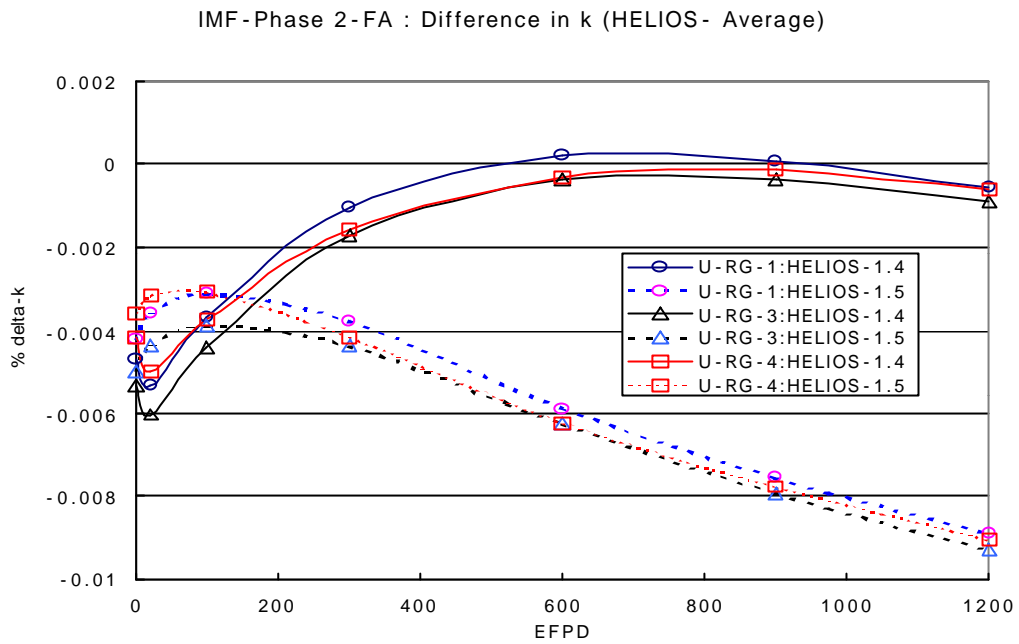


그림2. IMF 2단계 Benchmark 문제에서 핵연료집합체의 무한중배계수 비교 (RG-1, RG-3, RG-4)

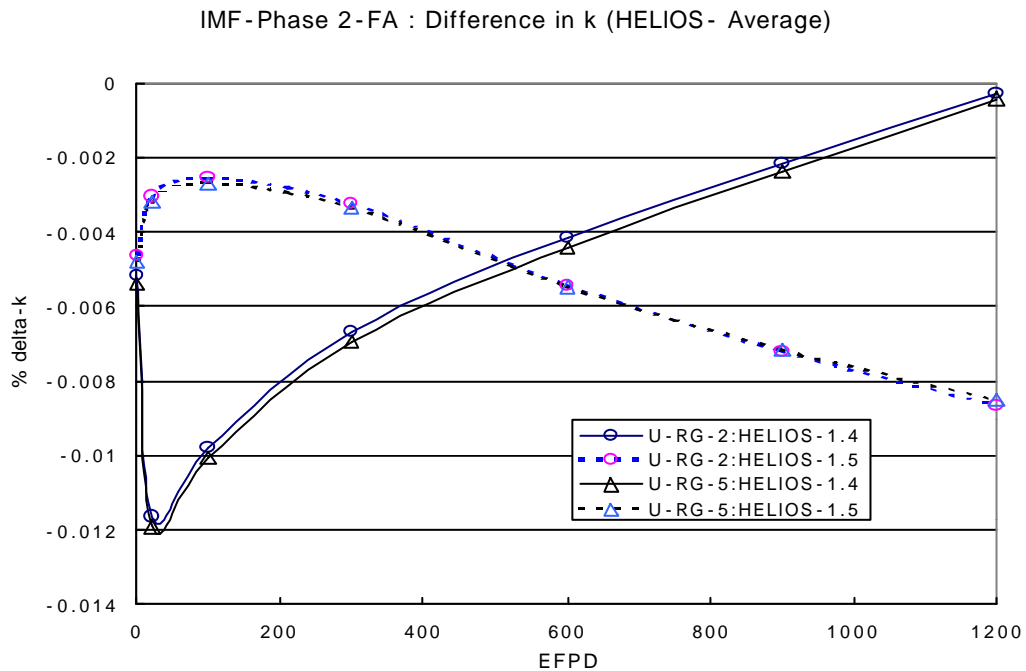


그림3. IMF 2단계 Benchmark 문제에서 핵연료집합체의 무한중배계수 비교 (RG-2, RG-5)

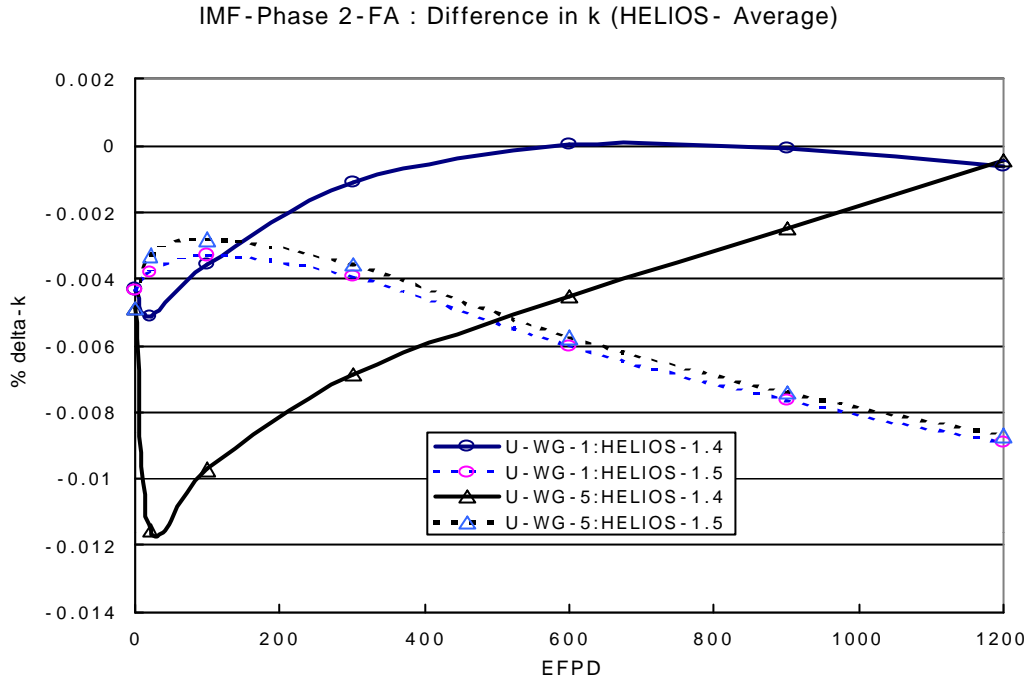


그림4. IMF 2단계 Benchmark 문제에서 핵연료집합체의 무한중배계수 비교 (WG-1, WG-5)

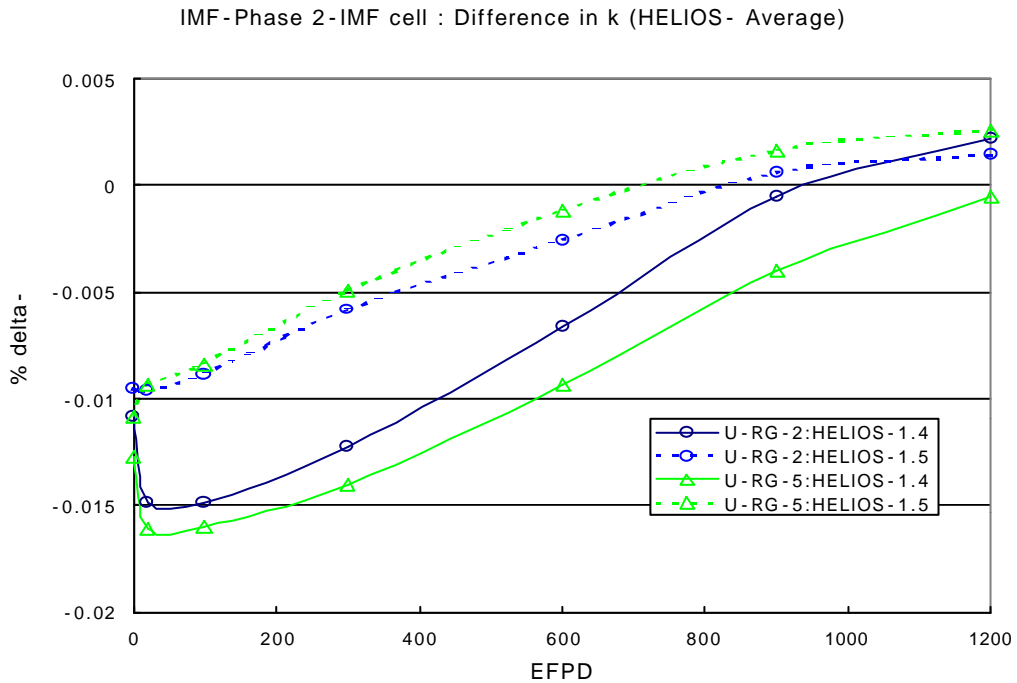


그림5. IMF 2단계 Benchmark 문제에서 IMF 핵연료의 무한중배계수 비교 (RG-2, RG-5)