

장주기 노심에 대한 이중구조 가연성독봉(Duplex BP)의 핵설계 특성 평가

An Evaluation of Nuclear Design Characteristics of Duplex Burnable Poison Rods for Extended Cycle Core

이대진, 김명현,
경희대학교,

송근우*
한국원자력연구소*

요 약

이중구조 가연성 독봉(Duplex BP)의 성능을 평가하기 위해 Gadolinia, Erbia 및 IFBA등의 가연성 독봉에 대해 핵특성을 비교하였다. 12개월 및 24개월 주기용 한국표준형원자로 노심의 8개 및 16개 Gadolinia 독봉이 장전된 핵연료집합체를 대상으로 핵적 평가를 수행하였다. 그리고 8Gd 와 16Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체에 대한 등가 Duplex BP 집합체를 설계하기 위해 내심에 Natural $UO_2-Gd_2O_3$, 외심에는 $UO_2-Er_2O_3$ 을 장전한 이중구조 가연성 독봉을 이용하여 설계하였다. 또한 같은 방법으로 Erbia 와 IFBA 독봉설계안을 이용하여 등가독봉집합체를 설계하여 핵특성을 평가하였다. 그리고 Duplex BP의 최적 집합체를 결정하기 위해 Duplex BP의 내부 반경 크기변화, 내부 및 외부 독물질의 농축도 그리고 독봉 위치에 대한 민감도분석 결과를 이용하여 설계하였다. 핵특성 평가 결과, 무한증배계수 측면에서 2차 첨두현상을 완화시키는데 Duplex BP 설계안이 유리하고, 주기말 독작용 효과의 최소화를 위해서는 IFBA독봉이 유리한 것으로 나타났다. 그리고 감속재온도계수를 보다 음으로 유지하기 위해서는 Erbia 독봉이 가장 유리하였다. 또한 첨두봉 출력인자 측면에서는 Erbia와 IFBA 설계안이 각 핵연료주기에 대해서 Gadolinia, Duplex BP 보다 유리하였다.

Abstract

Nuclear design characteristics of duplex burnable poison rod were evaluated for three integral type burnable absorbers; Gadolinia, Erbia and IFBA. Inter-comparison was done for both 12 and 24 month cycle for Korean Standard Nuclear Plant. Fuel assemblies with duplex BP was designed to the equivalent assembly with 8 and 16 gadolinia BPs. Duplex BP is composed of inner region of natural $U-Gd_2O_3$, and outer shell of, $UO_2-Er_2O_3$. In order to evaluate the duplex BP, assemblies with erbia and IFBA were compared with alternative options. A sensitivity studies were performed to the size of region, compositions and location of duplex BPs. It was shown that duplex BP gave favorable k -infinite curve to burnup, but IFBA provided the least residual reactivity penalty at EOC. Erbia was good for more negative MTCs. IFBA and erbia had better neutronic performance than gadolinia od duplex BP in the aspect of pin power peaking.

1. 서론

현재 원자로의 이용 효율성을 높이기 위한 방법으로 핵연료주기를 기존의 12개월에서 18개월 및 24개월로 연장하는 방안이 모색되고 있다. 원자로의 주기를 연장하기 위한 한 가지 방법으로 핵연료의 농축도를 높이는 방법이 있는데 이는 주기초 높은 잉여반응도를 동반하게 된다. 이처럼 주기초 높은 잉여반응도를 제어하기 위해서는 많은 양의 보론 수용액 사용이 요구되며 또한 이로 인해 노심내 양(+)의 반응도를 유발하게 된다. 이러한 이유로 장주기 원자로의 효율적인 반응도제어를 위한 가연성 독봉의 연구가 현재 국,내외로 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 문제 해결을 위해 현재 Gd_2O_3 가 널리 사용되어지고 있다. 일체형 가연성 흡수물질로 사용되고 있는 Gd_2O_3 는 강력한 중성자 흡수력으로 적은 양으로도 탁월한 반응도 제어효과를 얻을 수 있고 연소후의 잔존 흡수량이 적은 장점이 있다. 그러나 UO_2 에 혼합 하였을때 열전도도가 나빠지므로 출력제어를 위하여 낮은 $U235$ 농축의 핵연료봉에만 사용이 가능하다는 단점이 있다. 또한 핵연료집합체에 장전할 때 집합체의 대칭성 유지를 위하여 일반적으로 4의 배수형태의 장전만이 가능하므로 핵연료 집합체 반응도 제어효과의 조절이 비교적 자유롭지 못하다. 가연성 중성자 흡수물질의 핵연료집합체 반응도 제어효과를 더욱 다양하게 조절하려면 현재 가연성독봉 개수와 가연성 흡수물질 농도 조절에 한정되어있는 가연성독봉 설계에 더 많은 다양성이 필요하다. 그 방안중 하나가 이중구조로 된 가연성독봉 이다.[1] 이중구조 가연성 독봉은 하나의 소결체를 내부와 외부로 나누어서 내심에는 natural U-12wt% Gd_2O_3 , 외곽에는 UO_2 -2wt% Er_2O_3 를 배치한 장주기용 가연성 독봉이다. 이중가연성 독봉은 Gd_2O_3 가 함유된 내부 영역의 두께를 조절하여 보다 다양한 핵연료 집합체 반응도 제어가 가능하며, 외부 연료봉에 비교적 연소속도가 느린 Er_2O_3 를 장전하여 내부 연료봉의 반경이 감소함으로써 발생하는 Gd_2O_3 의 연소속도 증가를 억제할 수 있다. [2]

본 연구에서는 장주기 원자로의 반응도 제어에 미치는 Duplex BP의 영향도를 평가하기 위해 현재 운전 중인 영광 3/4호기의 8개 Gadolinia BP가 장전된 핵연료집합체와 16개의 Gadolinia BP가 장전된 24개월 주기용 한국표준형원전의 독봉집합체를 비교 대상으로 선정하였다. 또한 Duplex BP의 내부 및 외부에 위치한 독봉질의 양과 농축도 그리고 독봉의 장전위치에 대해 민감도분석을 수행하여 설계변수에 따른 핵특성 경향을 조사했다. 위의 민감도분석 결과를 바탕으로 8개와 16개의 Gadolinia BP가 장전된 독봉집합체와 주기초 동일한 반응도 억제를 갖는 등가 핵연료집합체를 설계하였고 IFBA 와 Erbia 독봉설계안에 대해서도 핵특성을 평가하였다. 전산체계는 HELIOS 코드를 이용하였고, 12개월 주기인 영광3/4호기와 24개월 주기의 한국표준형원전의 독봉 집합체에 대해 핵설계 특성을 비교하였다.

2. Duplex BP 설계변수에 따른 민감도분석

2.1 Reference case

핵연료 주기별 Duplex BP의 핵설계 특성을 평가하기 위해 8개와 16개의 Gadolinia BP를 장전된 12개월 및 24개월 주기용 한국표준형원전(KSNP)의 독봉집합체를 비교 대상으로 선정하였다. 그림 2는 8개 Gadolinia BP를 장전한 영광 3/4호기의 D1 핵연료집합체 구조이고, 그림 3은 16개 Gadolinia BP를 장전한 24개월 주기계획용 핵연료집합체 구조를 나타낸 것이다. 24개월 주기계획용 한국표준형원전은 4.95wt%와 4.45wt%의 농축 핵연료를 사용하며, 천연우라늄에 8wt% Gd_2O_3 를 혼합한 형태의 가연성 독봉을 사용한다. 노심내 반응도를 제어하기 위해 12개와 16개의 Gadolinia BP를 사용하는데 이중 12개의 가연성독봉이 장전된 핵연료집합체는 노심의 외곽에 위치하여 연소 중 출력상승이 상대적으로 적고 가연성흡수물질에 의한 반응도 제어량도 비교적 적으므로 노심설계에 큰 지장을 초래하지 않는다. 하지만, 노심의 중간부에 위치하는 16개의 가연성 독봉이 장전된 핵연료 집합체는 노심의 연소가 진행됨에 따라 출력이 증가하여 노심의 침두출력

을 증가시키는 원인이 되고 있다.[1] 따라서 본 연구에서는 노심의 침투출력을 발생시키는 16개의 가연성독봉이 장전된 핵연료 집합체를 비교 대상 모델로 선정하였다.

2.2 등가 Duplex BP 개수 결정

8개와 16개의 Gadolinia BP가 장전된 독봉집합체와 주기초 동일한 반응도 억제가를 갖는 Duplex BP 핵연료집합체 설계를 위하여 독봉의 개수를 변화시켜 독물질 양에 따른 주기초 반응도 억제가를 조사하였다. 그림 4는 24개월 주기용 Duplex BP 설계제원을 이용하여 개수에 따른 주기초 반응도 억제가를 나타낸 것이다. 위 그림 4와 같이 독봉개수에 따른 주기초 반응도 억제가가 거의 선형적으로 나타남을 볼 수 있다. 이로부터 Duplex BP 핵연료집합체의 주기초 반응도 억제가를 아래와 같이 독봉수의 선형함수로 근사한 상관식을 이용하여 24개월 주기 한국표준형 원전에 장전되는 Gadolinia 독봉집합체와 주기초 동일한 반응도 억제가를 갖는 Duplex BP의 개수를 선정하였다. 표 1은 24개월 주기 한국표준형원전 초기노심에 대한 Gadolinia 독봉집합체의 주기초 반응도 억제가를 나타낸 것이다. 예를 들어 16개의 Gadolinia 독봉이 장전되는 독봉집합체의 주기초 반응도 억제가인 13.25(% Δ ■)와 대응하는 Duplex BP의 개수를 위 상관식을 이용하여 구해보면 23.5 즉, 24개이다, 동일한 방법으로 8개의 Gadolinia 독봉을 장전한 독봉집합체에 대해서는 11.2개로 약 12개로 계산되어진다. 가연성 독봉 배열은 핵연료집합체내에서 대칭적으로 구성되어야하기 때문에 8개와 16개의 Gadolinia 독봉이 장전된 독봉집합체는 12개와 24개의 Duplex BP를 갖는 등가 Duplex BP 집합체로 설계할 수 있다.

2.3 Duplex BP 민감도 분석 방법

이중구조 가연성 독봉은 하나의 소결체를 내부와 외부로 나누어서 내심에는 Natural UO_2 - Gd_2O_3 , 외곽에는 UO_2 - Er_2O_3 를 배치한 구조를 이루고 있으며 Gd_2O_3 가 함유된 내부 영역의 두께를 조절하여 보다 다양한 핵연료집합체 반응도 제어가 가능하다. 또한 외부 연료봉에 비교적 연소속도가 느린 Er_2O_3 를 장전하여 내부 연료봉의 반경이 감소함으로써 발생하는 Gd_2O_3 의 연소속도 증가를 억제할 수 있다는 특징을 가지고 있다.[3] 본 연구에서는 이러한 다양한 핵연료집합체 반응도 제어를 위해 내부와 외부에 위치한 독물질의 농축도 및 양에 따른 핵적 민감도분석을 수행하였다. 영광 3/4호기의 8개 Gadolinia BP가 장전된 핵연료집합체에 대해서는 내부 독물질 조성을 Natural UO_2 +12wt% Gd_2O_3 을 기준으로 핵연료의 조성은 고정시키고, Gd_2O_3 의 농축도를 4wt%에서 12wt%까지 2wt%씩 증가시켜 가면서 적용하였다. 외부 독물질인 Er_2O_3 는 3.37wt% UO_2 +2wt% Er_2O_3 의 조성을 기준으로 핵연료의 농축도는 고정하고, Er_2O_3 의 농축도를 1wt%의 가감을 두어 1,2,3wt%의 농축도에 대해서 민감도분석을 수행하였다. 24개월 주기 독봉집합체에 대해서는 내부 독물질에 혼합하는 핵연료의 농축도를 동일하게 Natural UO_2 를 적용하였고, Gd_2O_3 의 농축도를 6,9,12wt%에 대해서 수행하였다. 그리고 외부 독물질과 혼합하는 핵연료의 농축도를 4.95wt%로 고정시키고, Er_2O_3 의 농축도는 12개월 주기 핵연료집합체에 대한 민감도 분석 방법과 동일하게 수행하였다. 또한 각주기에 해당하는 Duplex BP 내부 반경에 따른 독물질 양에 대한 민감도분석은 외부 반경을 현 영광 3/4호기의 Fuel Pellet 크기로 고정 시키고 내부 반경이 0.27240cm 일 때를 기준으로 하여 $\pm 20\%$ 의 변화를 두어 수행하였다.

2.4 독물질의 농축도 및 양에 따른 민감도 분석

그림 5,6과 7,8은 각기 12개월 주기 계획용 Duplex BP의 내부 농축도와 내부 반경에 따른 독봉 집합체의 무한증배계수와 침투봉 출력변화를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보는 것과 같이 내부 독물질인 Gd_2O_3 의 농축도가 높을수록 무한증배계수의 2차 침투현상은 낮아지지만 침투봉출력은 높

아진다. 또한 내부 반경의 증가로 인해 독물질의 양이 증가 할 때도 동일한 현상을 나타냈다. 이는 독물질의 높은 농축도와 많은 양의 독물질이 장전되면 주기초 연소속도가 핵연료에 비해 빠른 Gd_2O_3 의 독작용이 보다 오래 지속되게 하기 때문이다. 이러한 이유로 무한증배계수의 2차 침두현상을 완화되어지고 침두봉출력 측면에서는 가연성 독봉의 출력이 감소하게 되어 주위 핵연료봉의 출력이 상대적으로 증가하게 됨으로서 침두봉출력이 보다 높게 나타나는 것이다.

그림 9와 10은 Er_2O_3 의 농축도에 따른 독봉집합체의 무한증배계수와 침두봉 출력인자를 나타낸 것이다. 무한증배계수의 2차 침두현상이나 침두봉 출력인자 특성면에서 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 Gadolinia에 비해 중성자 흡수능력이 낮기 때문으로 판단된다. 24개월 주기계 획용 독봉집합체에서도 이와 동일한 현상을 보였다. 표 2는 민감도 분석을 통한 Duplex BP의 핵 특성을 각각의 설계변수에 대해 나타낸 것이다. Duplex BP 핵연료집합체내 침두봉출력을 낮추기 위해서는 독물질의 농축도 및 양을 감소시켜야하는데 독물질의 농축도보다는 Duplex BP의 내부 반경을 줄이면서 독물질의 양을 감소시키는 방안이 보다 유리하게 나타났으며, Er_2O_3 가 미치는 영향은 거의 무관하게 나타났다.

3. 독봉설계안별 등가 독봉집합체 설계

3.1 Erbia 독봉집합체 설계

12개월 주기 8개 Gadolinia가 장전된 독봉집합체에 대한 Erbia 등가 독봉집합체를 설계하기 위해 1wt%의 Erbia 독봉을 72개 장전한 독봉집합체를 선정하였다. 이 장전모형은 Erbia를 1wt%로 고정시키고 Erbia 독봉의 개수만을 변화시켜 물질양에 따른 주기 초 반응도억제가의 변화를 통해 4wt% Gd_2O_3 의 독봉이 8개 장전된 핵연료집합체와 동일한 주기 초 반응도 억제가를 갖도록 설계 되어진 독봉집합체이다.[4] 24개월 주기 등가 독봉집합체의 장전모형은 120개의 Erbia 독봉을 장전한 독봉집합체를 선정하였다[5]. 16개 Gadolinia가 장전된 독봉집합체에 대한 동일한 반응도 억제가를 갖는 집합체를 설계하기위해 Erbia의 농축도를 조절해가면서 동일한 주기초 반응도 억제가를 갖는 독물질 조성을 계산하였다. Er_2O_3 의 농축도가 1.8wt%일때 16Gadolinia 독봉집합체의 주기초 무한증배계수와 근사한 값을 가졌다. 그림 17과 18은 72개, 120개 Erbia를 장전한 독봉집합체 장전모형을 나타낸 것이다.

3.3 IFBA 등가 독봉집합체 설계

12개월 주기 8개 Gadolinia가 장전된 독봉집합체에 대한 IFBA 등가 독봉집합체를 설계하기 위해 0.00127cm의 ZrB_2 도포두께를 가진 IFBA를 60개 장전한 독봉집합체를 선정하였다. 또한 24개월 주기용 16개 Gadolinia가 장전된 독봉집합체에 대한 등가 독봉집합체를 설계하기 위해 136개 IFBA독봉을 장전한 독봉집합체를 선정하였다.[4] 주기 초 동일한 반응도 억제가를 갖게 하기위해 IFBA의 도포 두께를 변화시켜 가면서 ZrB_2 양에 따른 무한증배계수를 계산하였다. 계산결과 주기 초 무한증배계수는 IFBA의 도포두께가 0.00125cm 일 때 16개 Gadolinia가 장전된 독봉집합체의 무한증배계수에 대해 30 pcm 차이를 보였다. 그림 19과 20은 60개, 130개 IFBA를 장전한 독봉집합체 장전모형을 나타낸 것이다.

3.4 Duplex BP 등가 독봉집합체설계

3.4.1 주기별 Duplex BP 설계안

앞의 민감도분석 결과를 바탕으로 12개월과 24개월의 Duplex BP를 이용하여 주기초 동일한 무한증배계수를 가지면서 침두봉출력이 8Gd, 16Gd 보다 낮은 등가 독봉집합체를 설계하였다. 12개월 주

기용 독봉집합체는 Gd_2O_3 의 농축도가 6wt% 미만일 때 무한증배계수의 2차침투현상이 Reference case에 비해 높게 나타났다. 그리고 침투봉출력 측면에서는 6wt%에서 8wt%사이일 때 가장 낮은 결과를 보였다. 이러한 결과로 Gd_2O_3 의 농축도는 6wt%로 결정하였다. 내부 반경 변화에 따른 효과는 Reference case의 반경크기와 20% 감소시켰을 때 2차 침투현상과 침투봉출력 측면에서 8Gd에 비해 낮게 나타났다. 또한 반경크기 감소로 인한 Gd_2O_3 의 장전량이 줄어들어 생기는 2차 침투현상은 반대로 증가하게된 Er_2O_3 의 양과 농축도를 높이는 방법으로 낮추었다. 24개월 주기용 독봉집합체는 Gd_2O_3 의 농축도가 12wt%일 때 가장 낮은 무한증배계수의 2차 침투현상이 나타났으며, 연소에 따른 침투봉출력은 6wt%에서 12wt%의 농축도에 대해 모든 Reference case에 비해 낮게 나타났다. 반경크기를 감소했을 때 2차 침투현상이 완화되었으며 침투봉출력인자 측면에서도 16Gd 독봉집합체에 비해 낮게 나타났다. 24개월 주기용 Duplex BP 독봉집합체 역시 내부 반경 감소로 인한 발생하는 2차 침투현상을 반대로 늘어난 외부독물질인 Er_2O_3 양과 높은 농축도를 적용시켜 제어하였다. 표 3은 이러한 결과를 종합하여 설계한 주기별 최적 Duplex BP 설계안이다.

3.4.2 최적 독봉집합체 사양

앞에서 제시한 주기별 Duplex BP 설계안을 이용하여 평탄한 출력을 나타내는 독봉집합체를 선정하기위해서 몇 가지 독봉집합체 경우에 대해 평가하였다. 침투봉 출력은 독봉의 개수와 장전위치에 대해서 변화되어질 수 있으므로 이를 반드시 고려해야 한다. 그림 21과 22는 8개 및 16개 Gadolinia BP가 장전된 독봉집합체에 대한 최적 Duplex BP등가 독봉집합체 후보 모형을 나타낸 것이다. Duplex BP는 연소가 됨에 따라 출력이 상승하는 부분인 Guide Tube 주위에 장전하였으며 나머지 Duplex BP는 대칭형태를 이루게 하여 장전하였다. 그림 23과 24는 8개 및 16개 Gadolinia BP가 장전된 독봉집합체에 대한 침투봉출력 변화를 연소에 따라 나타낸 것이다. 그림 23에서 보는 것과 같이 12개월에 대해서는 case02, 24개월에 대해서는 case01의 독봉집합체 사양이 연소에 따른 침투봉출력이 가장 낮게 나타났다. 그림 25와 26은 반경방향출력 분포를 12개 및 24개 Duplex BP 독봉집합체 사양에 대해서 나타낸 것이다.

4. 주기별 독봉집합체 핵특성 비교

4.1 무한증배계수 특성

그림 27과 28는 각 독봉설계안별 연소도에 따른 무한증배계수를 8Gd, 16Gd 독봉집합체와 이의 등가독봉집합체에 대해 비교한 것이다. 12개월과 24개월 모두 Erbia와 IFBA 독봉집합체의 무한증배계수는 연소초기에 증가하는 모습을 보였다. 그러나 24개월에서는 12개월과 달리 주기초 Erbia의 무한증배계수는 IFBA에 비해 완만한 무한증배계수 변화를 보였다. 또한 Gadolinia와 Duplex BP 독봉집합체 두 핵연료 주기에 대해 주기초 무한증배계수가 감소하다가 연소가 진행됨에 따라 2차 침투현상을 보였다. 그러나 Duplex BP는 Gadolinia 독봉집합체에 비해 2차 침투현상이 낮게 나타났다. 이유는 Duplex BP 연소 속도가 느린 Er_2O_3 를 외경에 위치함으로써 연소초기 Gd_2O_3 의 빠른 연소속도를 보상해줌으로서 나타나는 현상이라 할 수 있다. 표 4와 5는 주요 연소시점에서의 무한증배계수를 나타낸 것이다. 각 독봉설계안별로 연소중 무한증배계수의 최대값을 비교해보면 12개월과 24개월 모두 Duplex BP 설계안이 가장 낮았다. 그러므로 무한증배계수의 2차 침투현상을 완화시키기 위해서는 Duplex BP의 사용이 유리하다고 판단하였다.

4.2 반응도 억제계 특성

그림 29와 30은 각 독봉설계안별 연소도에 대한 반응도 억제계를 8Gd, 16Gd 독봉집합체와 이의

등가독봉집합체에 대해 비교한 것이다. 72Erbia와 60IFBA독봉집합체의 반응도역제가는 연소초기에 급격히 감소하지만 연소말로 갈수록 72Erbia가 60IFBA 보다 잔여반응도역제가가 크게 나타났다. 그리고 24개월 집합체에 대해서는 136 IFBA가 주기초부터 주기말까지 잔여 독작용이 가장 작게 나타났다. 또한 16 Gadolinia BP는 타 독봉집합체에 비해 잔여독작용이 크게 나타났고 Duplex BP는 Gadolinia.BP에 비해서는 잔여독작용이 적었다. 핵연료 외부에 도포되는 ZrB₂가 핵연료에 비해 비교적 빨리 연소되면서 핵연료가 연소되기 때문에 주기길이 측면에서 유리하게 작용된다. 그러므로 잔여 독작용 측면과 주기 길이 측면에서 IFBA를 사용하는 것이 유리하며, Gadolinia 독봉설계안이 제일 불리하다고 할 수 있다.

4.3 첩두봉출력인자 특성

그림 31과 32는 각 독봉설계안별 연소도에 따른 첩두봉 출력인자를 8Gd, 16Gd 독봉집합체와 이의 등가독봉집합체에 대해 비교한 것이다. 12개월 주기에서는 Erbia 가 24개월 주기에서는 IFBA 독봉집합체의 첩두봉 출력인자가 가장 낮게 나타났다. 모든 핵연료 주기에 대해서 그 다음으로 Duplex BP, Gadolinia 독봉집합체 순으로 크게 나타났다. 그 이유는 많은 수의 Erbia 및 IFBA독봉이 노심전체에 고루 분포되어져 첩두봉 출력제어에 보다 효과적으로 작용했기 때문이다. 그러나 Gadolinia 독봉집합체의 경우에는 주기초 연소속도가 빠르고 중성자 흡수단면적이 타 독봉물질에 높기 때문에 기타 독봉설계안에 비해 높은 첩두봉 출력을 보였다고 판단하였다. 따라서 노심 내에서의 첩두봉 출력인자 제어측면에서는 타 독봉집합체에 비해 Gadolinia 독봉집합체가 불리할 것으로 예상할 수 있으며, Gdolinia 독봉집합체에 비해 12개월과 24개월 주기 모두 Duplex BP의 사용이 첩두봉 출력을 완화시키는데 효과적일 것이라 판단된다.

4.4 감속재온도계수 특성

그림 33과 34는 각 독봉설계안별 연소도에 따른 냉각재온도계수를 8Gd, 16Gd 독봉집합체와 이의 등가독봉집합체에 대해 비교한 것이다. 12개월과 24개월 주기 노심에 대해 모든 독봉집합체 설계안이 음의 감속재온도계수를 보였다. 타 독봉설계안에 비해 주기초 IFBA의 MTC가 높게 나타났으며 연소가 진행됨에 따라 Erbia를 제외한 3가지 독봉집합체는 큰 차이의 감속재 온도계수를 보이지는 못하였다. 감속재온도계수는 Erbia 독봉집합체의 냉각재온도계수가 가장 낮으며 Duplex BP, Gadolinia, IFBA의 순으로 크게 나타났다. 장주기 노심에서와 같이 주기초 높은 잉여반응도를 제어하기 위해 다량의 붕산이 요구되어 양의 냉각재온도계수가 우려되는 노심에서는 타 독봉집합체에 비해 IFBA는 적합하지 않고 Erbia를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단하였다.

5. 결론

현재 운전중인 12개월 주기의 영광 3/4호기의 독봉집합체와 24개월 주기계획용 한국표준형원전의 독봉집합체를 대상으로 Duplex BP의 핵특성을 설계변수에 대한 민감도 분석을 바탕으로 수행하였다. 민감도 분석 결과, Duplex BP 집합체내에서 2차 첩두현상을 완화시키기 위해서는 Gd₂O₃의 농축도 및 양을 증가시켜야 하며, 첩두봉출력을 감소시키기 위해서는 Gd₂O₃의 농축도 및 양을 감소시켜야 한다. 그러나 무한증배계수의 2차 첩두현상 완화와 첩두봉출력 감소는 서로 상반되는 설계변수의 적용이 이루어진다. 이 2가지 핵특성을 만족하기 위해서는 내부 반경을 감소시켜 Gd₂O₃의 독물질양을 줄여 첩두봉출력을 낮게 하고 반면 Gd₂O₃ 양의 감소로 인해 발생하는 2차 첩두현상은 늘어난 Er₂O₃의 양과 농축도를 높여준다면 충분히 2차 첩두현상을 보상해줄 것이라 판단되어진다. 또한 연소에 따른 무한증배계수 특성에서는 타 독봉설계안에 비해 Duplex BP의 사용

이 2차 침투현상을 완화시키는데 유리하였다. 침투봉출력제어 측면에서는 핵연료집합체내 다량의 독봉을 장전한 IFBA와 Erbia 독봉집합체가 유리하게 나타났으며 Duplex BP는 Gadolinia BP 사용에 비해 효과적으로 나타났다. 반응도 억제가 측면에서는 IFBA 설계안이 잔존독작용 측면에서 가장 유리하였고, MTC 측면에서는 Erbia 설계안 안전성 측면에서 가장 유리하였다. 또한 12개월과 24개월 주기 노심에 대해 Gadolinia 독봉집합체에 비해 Duplex BP 설계안이 모든 핵특성 측면에서 효과적으로 작용하였다, 또한 Duplex BP의 자체 특성으로는 12개월에 24개월 주기에 사용할 때 타 핵특성보다도 2차 침투현상 완화에 보다 큰 영향을 보였다. 추후 연구계획은 Duplex BP설계안을 이용하여 18개월 및 24개월 주기 노심을 설계하여 기존 독봉 설계안을 이용하여 설계한 노심에 대해서 핵설계 측면에서의 특성을 비교하는 것이다.

참고 문헌

1. 경수로용 신형핵연료 개발 : 소결체재료신기술개발 보고서, KAERI/RR-2023/99, 2000.
2. 이영우 외 : “이중가연성 흡수 소결체의 균열 형성 및 UO_2 Gd_2O_3 치밀화 속도에 미치는 첨가제 및 소결 분위기, 승온 속도의 영향”, 한국원자력학회 추계학술발표회논문집, 용평, 2002.
3. 이대진 외 : “이중구조 가연성독봉의 핵설계 특성평가“, 한국에너지공학회 추계학술발표회논문집, 서울, 2002.
4. 차세대원자로 기술개발(II) : 노심특성 개량 연구 및 노심 핵설계 평가, KEPRI/TR.95ZJ16.J1999.115/vol. 2.2, KEPRI, 1999.
5. 영광 3,4호기 장주기 운전 타당성 연구 : 제3분기 보고서, KAERI/CR-021/96
6. 육방형 핵연료집합체에서의 가연성 독물질 핵특성 연구,KAERI/TR-766/96 c.2, 1996)
7. R.J.J. Stamm'ler, J.J. Casal, E.A. Villarino, HELIOS Method, HELIOS Documentation Rev. No. 2. Scanpower A/S, 1933.

표 1. 24개월 주기계획용 한국표준형원전의 초기노심에 장전되는 Gadolinia
독봉집합체의 반응도 억제

집합체유형	주기초 반응도 억제 [% Δ ■]
8 Gd	6.20
12 Gd	9.18
16 Gd	13.25

표 2. Duplex BP 설계변수에 따른 독봉집합체 핵특성 변화

		무한증배계수 2차 침투현상	연소에 따른 침투봉출력
내부반경	증가	크게 완화시킴	크게 증가시킴
	감소	크게 증가시킴	크게 완화시킴
Gd ₂ O ₃ 농축도	증가	완화시킴	크게 증가시킴
	감소	크게 증가시킴	완화시킴
Er ₂ O ₃ 농축도	증가	무관함	무관함
	감소	무관함	무관함

표 3. 주기별 등가 독봉집합체 설계를 위한 Duplex BP 설계안

	Parameter	
	12개월 주기용	24개월 주기용
Inner Fuel Rod Material	Natural UO ₂ +6wt% Gd ₂ O ₃	Natural UO ₂ +12wt% Gd ₂ O ₃
Outer Fuel Rod Material	3.37wt% UO ₂ +2wt% Er ₂ O ₃	4.95wt% UO ₂ +4wt% Er ₂ O ₃
Inner Fuel Rod Diameter (cm)	0.5173	0.5140
Outer Fuel Rod Diameter (cm)	0.8255	0.8255
Cladding Outer Diameter (cm)	0.9721	0.9721
Outer Annulus thickness	0.1526	0.1558
핵연료집합체당 수	12	24

표 4. 주요 연소시점에 대한 독봉집합체별 무한증배계수 (12개월 주기)

	8Gd	12Duplex BP	60 IFBA	72 Erbia
주기초 (Eq.Xe)	1.1122	1.1123	1.1135	1.1288
연소중 최대값	1.0824	1.0794	1.0907	1.0909
40000 MWD/MTU	0.8455	0.8475	0.8524	0.8487

표 5. 핵연료 주기별 연소초 독봉집합체별 무한증배계수 (24개월 주기)

	12Gd	24Duplex BP	140 IFBA	120 Erbia
주기초 (Eq. Xe)	1.1527	1.1526	1.1524	1.1552
연소중 최대값	1.1205	1.1104	1.1676	1.1328
60000 MWD/MTU	0.8450	0.8491	0.9700	0.8586

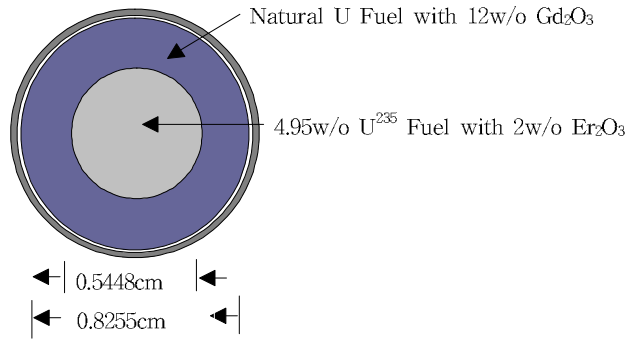


그림 1. Duplex BP 구조

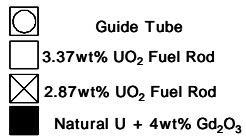
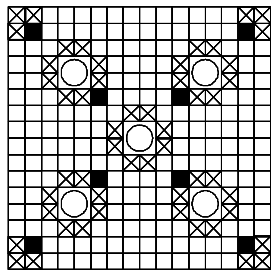


그림 2. 영광 3/4호기의 D1독봉집합체 장전모형 (12개월 주기)

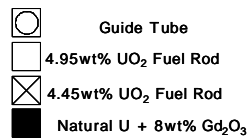
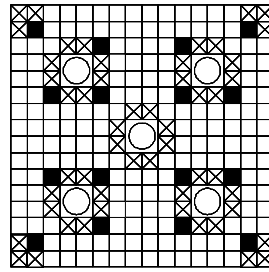


그림 3. 16 Gd를 장전한 한국표준형원전의 독봉집합체 장전모형 (24개월 주기)

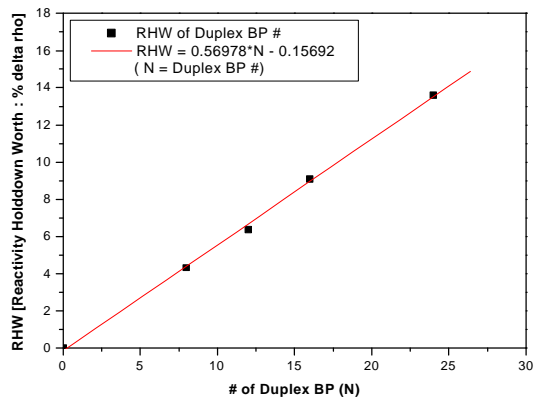


그림 4. 독봉개수에 따른 Duplex BP 집합체의 반응도 억제

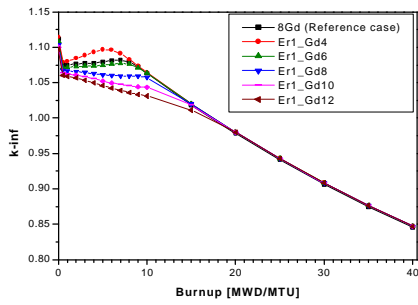


그림 5. Gd_2O_3 농축도변화에 따른 무한증배계수 변화 (12개월 주기)

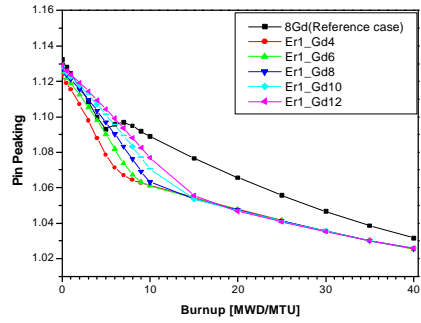


그림 6. Gd_2O_3 농축도변화에 따른 침두봉 출력인자 변화 (12개월 주기)

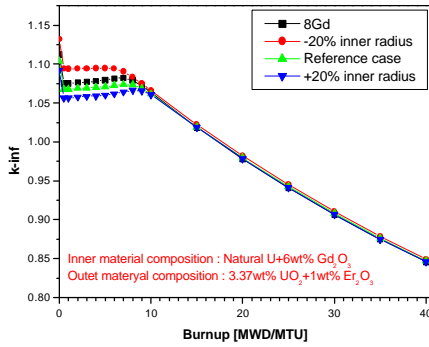


그림 7. 내부 반경에 따른 무한증배계수 변화 (12개월 주기)

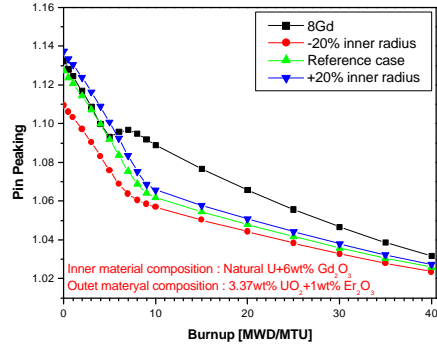


그림 8. 내부 반경에 따른 침두봉 출력변화 (12개월 주기)

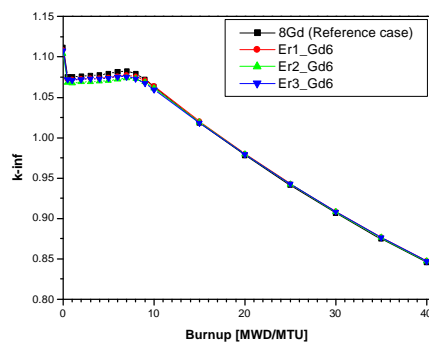


그림 9. Er_2O_3 농축도변화에 따른 무한증배계수 변화 (12개월 주기)

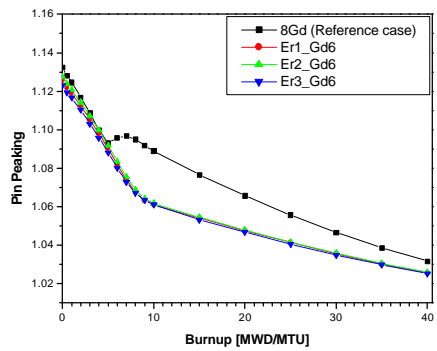


그림 10. Er_2O_3 농축도변화에 따른 침두봉 출력인자 변화 (12개월 주기)

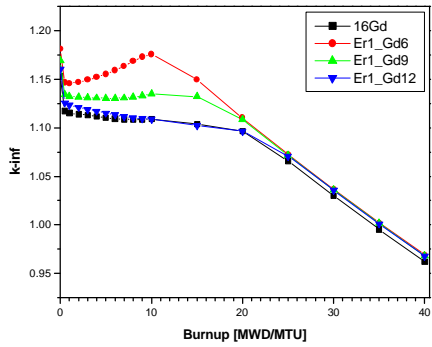


그림 11. Gd_2O_3 농축도변화에 따른 무한증배계수 변화 (24개월 주기)

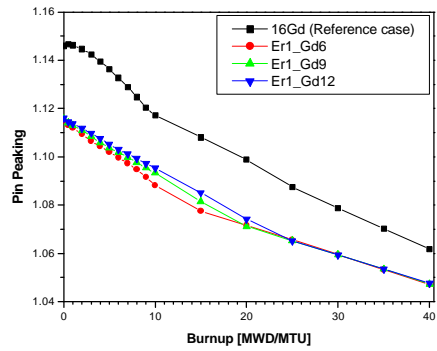


그림 12. Gd_2O_3 농축도변화에 따른 첨두봉 출력인자 변화 (24개월 주기)

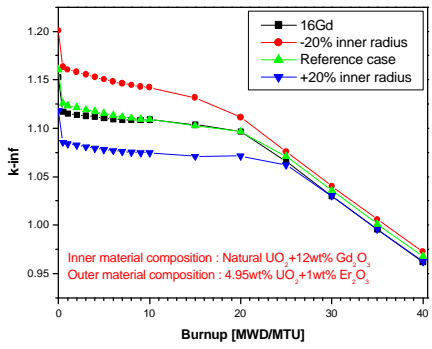


그림 13. 내부 반경에 따른 무한증배계수 변화 (24개월 주기)

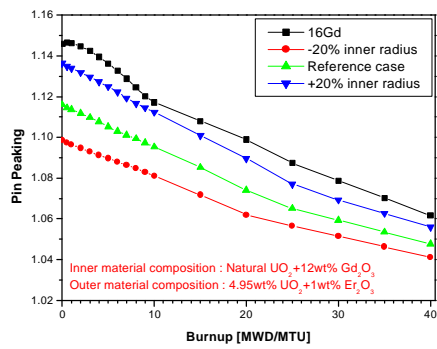


그림 14. 내부 반경에 따른 첨두봉 출력인자 변화 (24개월 주기)

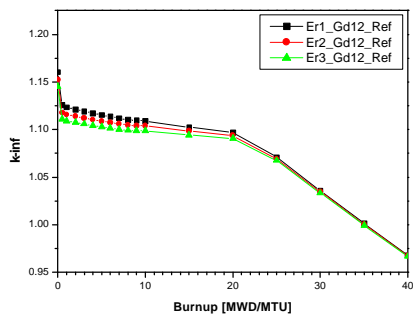


그림 15. Er_2O_3 농축도 변화에 따른 무한증배계수 변화 (24개월 주기)

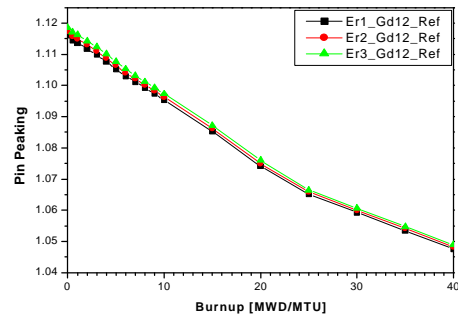
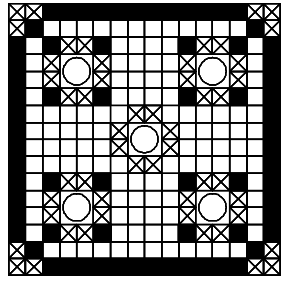
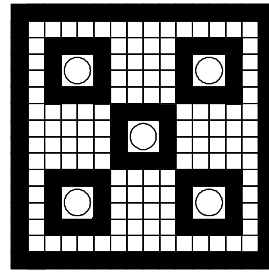


그림 16. Er_2O_3 농축도변화에 따른 첨두봉 출력인자변화 (24개월 주기)



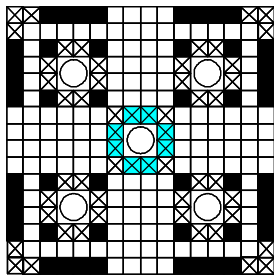
- Guide Tube
- 3.35wt% UO₂ Fuel Rod
- 2.35wt% UO₂ Fuel Rod
- 3.35wt% UO₂ + 1wt% Er₂O₃

그림 17. 72 Erbia 독봉집합체
장전모형 (12개월 주기)



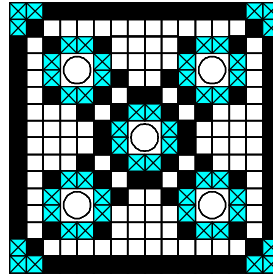
- Guide Tube
- 4.95wt% UO₂ Fuel Rod
- 4.95wt% UO₂ + 1.8wt% Er₂O₃

그림 18. 120 Erbia
독봉집합체 장전모형
(24개월 주기)



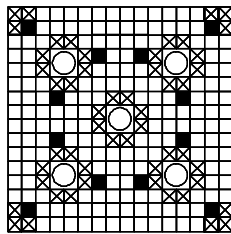
- Guide Tube
- 3.35wt% UO₂ Fuel Rod
- 2.85 wt% UO₂ Fuel Rod
- 3.35wt% UO₂ Fuel Rod + ZrB₂
- 2.85 wt% UO₂ Fuel Rod + ZrB₂

그림 19. 60 IFBA
독봉집합체 장전모형
(12개월 주기)

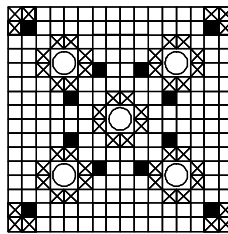


- Guide Tube
- 4.95wt% UO₂ Fuel Rod
- 4.45 wt% UO₂ Fuel Rod
- 4.95wt% UO₂ Fuel Rod + ZrB₂
- 4.45 wt% UO₂ Fuel Rod + ZrB₂

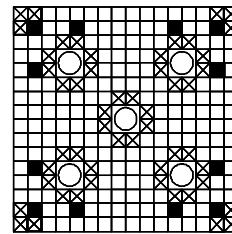
그림 20. 136 IFBA
독봉집합체 장전모형
(24개월 주기)



(a) case01



(b) case02



(b) case03

- Guide Tube
- 3.37wt% UO₂ Fuel Rod
- 2.87wt% UO₂ Fuel Rod
- Duplex BP

그림 21. 12 Duplex BP 독봉집합체 후보 모형

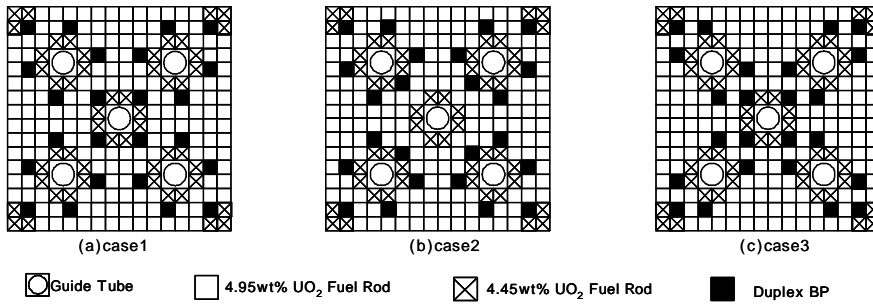


그림 22. 24 Duplex BP 독봉집합체 후보 모형

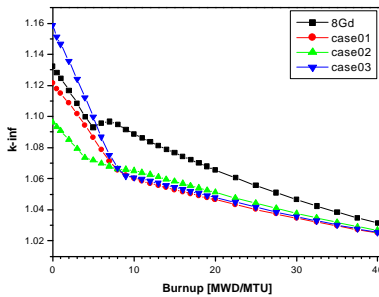


그림 23. 12 Duplex BP 집합체 후보 모형에 대한 첨두봉 출력 변화 (12개월 주기)

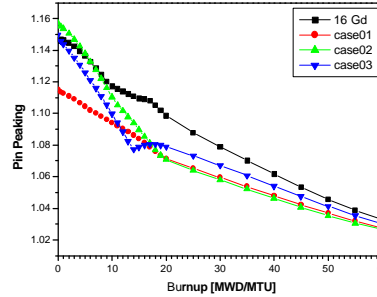


그림 24. 24 Duplex BP 집합체 후보 모형에 대한 첨두봉 출력 변화 (24개월 주기)

0.000						case01	
1.046	1.1121*					case02	
1.011	1.078					case03	
1.078	1.159*						
1.062	1.066	1.096					
1.012	1.003	1.039					
1.109	1.112	1.144					
0.989	1.013	1.000					
0.968	0.564	0.975					
1.063	1.092	1.050	0.000				
0.951	0.564	0.984					
0.972	1.001	0.998					
1.040	1.070	1.029					
0.967	0.986	1.068	1.024	1.027	1.077		
1.004	1.032	1.096*	1.033	1.032	1.082		
1.026	1.039	1.067	0.978	0.976	1.031		
1.005	1.021	1.047	1.070	1.065	1.014	0.566	
1.028	1.042	1.064	1.081	1.071	1.018	0.567	
1.023	1.020	0.994	0.564	0.986	0.971	0.549	
1.046	1.055	1.064	1.068	1.059	1.034	0.904	0.939
1.062	1.069	1.077	1.078	1.066	1.038	0.907	0.942
1.044	1.034	1.005	0.980	0.986	0.989	0.877	0.915

그림 25. 12개월 주기에 대한 16개 Duplex BP를 장전한 핵연료 집합체 후보 모형의 반경방향 출력분포 비교 (BOC)

0.000						case01	
1.076 1.157* 1.044	0.590 1.145 0.572					case02	
1.047 1.094 1.001	1.046 1.060 0.988	1.112 0.590 1.058				case03	
1.006 1.015 0.981	1.040 1.021 0.561	1.103 1.061 1.082	0.000				
0.986 0.983 1.013	0.565 0.560 1.050	1.090 1.074 1.113					
1.009 1.004 1.056	1.024 1.018 1.085	1.093 1.085 1.150*	1.094 1.085 1.118	1.108 1.100 1.087	1.115* 1.109 1.060		
1.009 1.046 1.086	1.056 1.051 1.095	1.041 1.036 1.103	0.576 0.573 1.073	1.058 1.053 0.570	1.047 1.043 0.989	0.570 0.568 0.552	
1.100 1.096 1.131	1.095 1.091 1.130	1.070 1.066 1.117	1.052 1.048 1.079	1.064 1.060 1.039	1.071 1.068 1.027	0.998 0.995 0.969	1.047 1.044 1.021

그림 26. 24개월 주기에 대한 24개 Duplex BP를 장전한 핵연료 집합체 후보 모형의 반경방향 출력분포 비교 (BOC)

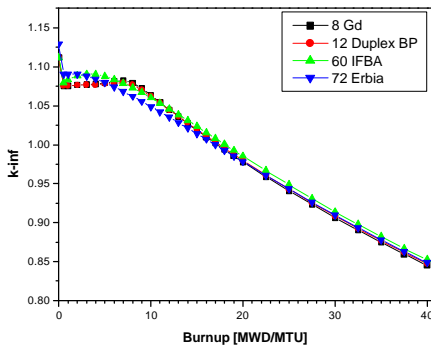


그림 27. 연소에 따른 무한증배계수 변화 (12개월 주기)

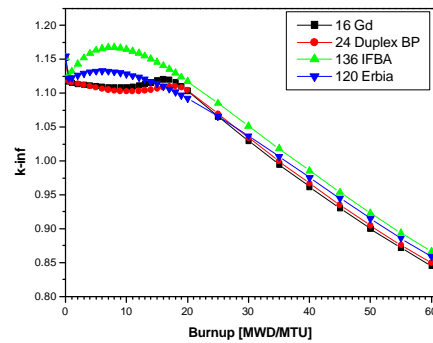


그림 28. 연소에 따른 무한증배계수 변화 (24개월 주기)

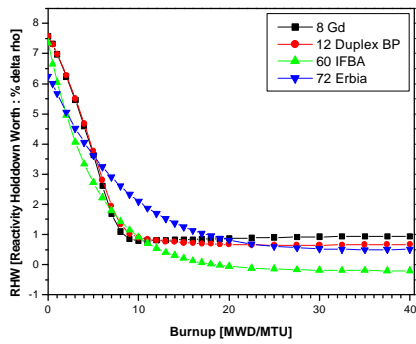


그림 29. 연소에 따른 반응도억제가 변화 (12개월 주기)

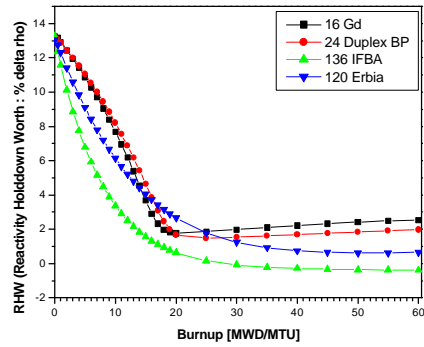


그림 30. 연소에 따른 반응도억제가 변화 (24개월 주기)

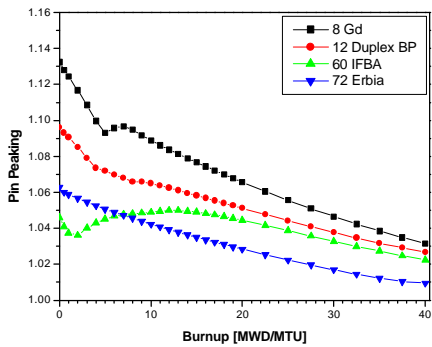


그림 31. 연소에 따른 침두봉 출력인자 변화 (12개월 주기)

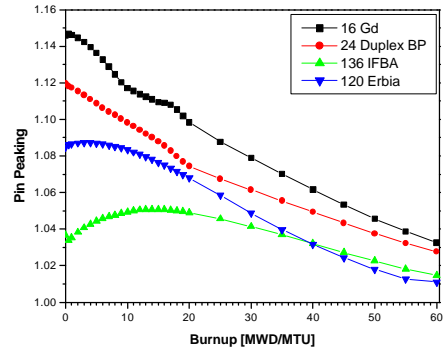


그림 32. 연소에 따른 침두봉 출력인자 변화 (24개월 주기)

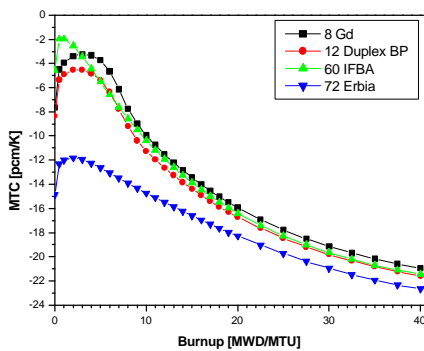


그림 33. 연소에 따른 감속재온도계수 (12개월 주기)

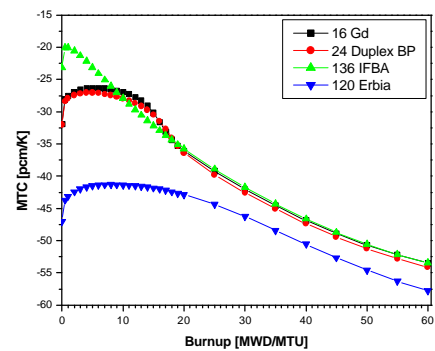


그림 34. 연소에 따른 감속재온도계수 (24개월 주기)