

이중구조 가연성독봉 설계안의 최적화 및 노심 핵설계 타당성 평가

윤석균 · 이대진 · 김명현[†]

경희대학교 테크노공학대학

Design Optimization of Duplex Burnable Poison Rods and Feasibility Evaluation for Core Design

Seok-Kyun Yoon, Dae-Jin Lee and Myung-Hyun Kim[†]

Kyung-Hee University, YongIn-shi, Gyeonggi-do, Korea, 449-701

요 약

한국원자력연구소에서는 기존의 일체형 가연성 독봉과 다른 이중구조로 된 가연성독봉 개념을 제시하였다. 이중구조 가연성독봉(Erbia Duplex BP)은 내부에 Natural U+Gd₂O₃, 외부에는 Enriched UO₂+Er₂O₃를 배열시킨 구조이다. 이러한 독봉은 장주기 노심에서 기존의 Gadolinia BP과 동일한 반응도제어를 할 수 있을 것이라 예상된다. 이중구조 가연성독봉의 핵적 타당성을 확인하기 위해 24개월 주기용 한국표준형원자로를 비교대상으로 선정하였으며, 기존 연구된 여러 가지 독봉설계안들과 4가지 핵특성에 대하여 비교 분석하였다. 핵특성 평가 결과, 이중구조가연성 독봉은 비교대상보다 무한증배계수, 침투출력인자, 반응도역제, 감속재온도계수측면에서 모두 유리한 경향을 보였다. 설계변수에 따른 민감도분석을 통해 도출한 최적화된 핵연료집합체를 이용하여 노심적용 타당성을 확인하였다. 주기길이, 침투출력 및 감속재온도계수를 비교하였으며 전 노심해석결과 주기길이 비교대상보다 4~7일 길게 나타났다. 이러한 결과는 등가의 독봉집합체를 설계했음에도 불구하고 노심에 장전되는 우라늄의 양이 서로 달라서 생기는 현상으로 판단된다. 하지만 전체적인 핵특성을 비교해보면 이중구조 가연성독봉을 장전한 노심이 비교대상노심보다 다소 유리하면서도 거의 비슷함을 알 수 있었다. 마지막으로 경제성 평가를 통해 장주기 노심에서의 이중구조 가연성독봉의 제조 가능성 및 적용 타당성이 충분히 확인되었다.

주요어: 가연성독봉, 핵설계, 가압경수로, 가돌리니아, 디스프로시움, 노심설계

Abstract — The duplex burnable poison absorbers concept was suggested by Korea Atomic Energy Research Institute. This BP rod is composed of inner region of natural U-Gd₂O₃ and outer shell of enriched UO₂-Er₂O₃. It is expected that this burnable absorber has same reactivity control capability with gadolinia burnable absorber used in extended fuel cycle. In order to evaluate the nuclear feasibility of duplex BPs, the nuclear design characteristics were compared with that of four types of burnable absorbers; gadolinia, erbia, IFBA, dysprosia duplex BP on 24 months fuel cycle for Korean Standard Nuclear Power plants. According to the evaluation results of nuclear characteristics, the duplex BPs were better than other BPs on k-infinities, reactivity holddown worth (RHW), pin power peaking and moderator temperature coefficient (MTC). The possibility of nuclear core design was also confirmed based on the optimized fuel assemblies which were searched for a sensitivity analysis. Characteristics of core design with duplex BPs was compared with that of reference core with gadolinia BPs for cycle length, power peaking and MTC. The duplex BP core had a little longer cycle length by 4 to 7 days because of increased amount of fissile in enriched uranium at the

[†]To whom correspondence should be addressed.
Kyung-Hee University, YongIn-shi, Gyeonggi-do 449-701,
Korea
Tel: 031-201-2562
E-mail: mhkim@khu.ac.kr

outer shell of duplex BP. In case of power peaking, F_0 of duplex BP core was reduced from 1.5773 to 1.5335. MTC was also less -0.48 pcm/C than that of reference core. Finally, evaluation of fuel cycle economy was performed for the manufacturing feasibility test and fuel cost evaluation with duplex BPs. Fuel cycle economy of duplex BP core almost was equivalent with that of gadolinia BP core.

Key words: Burnable poison, Nuclear design, PWR, Gadolinia, Dysprosium, Core design

1. 서 론

국내 원자력발전소의 재장전 주기는 1980년대 약 12개월이었으나, 현재는 대부분의 원전을 약 15~18개월 주기로 운전하고 있다. 최근에는 24개월 주기 이상으로 연장하는 방안을 연구하고 있다. 노심의 운전 주기를 연장시키면 발전소의 이용률이 증대되기 때문에 핵연료의 경제성이 높아진다. 그러나 장주기 노심은 다량의 가연성 독봉을 필요로 하게 된다. 가연성 독봉은 주기길이를 연장시키기 위해 핵연료 농축도를 높일 경우 주기에 나타나는 잉여반응도를 효과적으로 감소시켜야 함과 동시에 노심내의 높은 침투출력을 주기말까지 효과적으로 억제하여야 한다. 따라서 핵연료 집합체의 여러 위치에 적절하게 독봉을 삽입해야 한다. 현재 Gd_2O_3 가 가장 효과적인 방안으로 일체형 가연성독봉의 형태로 널리 사용되어지고 있다. Gadolinia는 강력한 중성자 흡수력으로 적은 양으로도 탁월한 반응도 제어효과를 얻을 수 있고 연소 후의 잔존 흡수량이 적은 장점이 있다. 그러나 UO_2 에 혼합하였을 때 열전도도가 나빠지므로 출력제어를 위해 낮은 U-235 농축의 핵연료봉에만 사용이 가능하다는 단점이 있다. 또한 핵연료집합체에 장전할 때 집합체의 대칭성 유지를 위하여 일반적으로 4의 배수형태의 장전만이 가능하므로 핵연료 집합체 반응도 제어효과와 조절이 비교적 자유롭지 못하다. 가연성 중성자 흡수물질의 핵연료집합체 반응도 제어효과를 더욱 다양하게 조절하려면 현재 가연성독봉 개수와 가연성 흡수물질 함량 조절에 한정되어있는 가연성독봉 설계에 더 많은 다양성이 필요하다. 그 방안 중 하나로 이중구조로 된 가연성독봉이 제안된 바 있다. 이중구조 가연성 독봉은 하나의 소결체를 내부와 외부로 나누어서 내심에는 Natural U-12 wt% Gd_2O_3 , 외심에는 Enriched UO_2 -2 wt% Er_2O_3 를 배치한 장주기용 가연성 독봉이다^[1]. 이중구조 가연성 독봉은 Gd_2O_3 가 함유된 내부 영역의 함유량과 체적을 조절하여 보다 다양한 핵연료 집합체 반응도의 제어가 가능하도록 하며, 연료봉 외부에 비교적 연소속도가 느린 Er_2O_3 를 장전하여 연료봉 내부의 Gd_2O_3 연소를 다소 늦추면서 독봉의 효과를 고연소도까지 유지시킬 수 있게 한다.

본 연구에서는 장주기 원자로의 반응도 제어에 미치는 Duplex BP의 영향도를 평가하기 위해 비교대상 노

심으로서 현재 운전 중인 영광 3/4호기의 12개 Gadolinia BP가 장전된 핵연료 집합체와 16개의 Gadolinia BP가 장전된 24개월 주기용 한국표준형원전의 독봉집합체를 비교 대상으로 선정하였다. 또한 Duplex BP의 내부 및 외부에 위치한 독봉질의 양과 함량 그리고 독봉의 장전 위치에 대한 민감도분석을 수행하여 설계변수에 따른 핵특성 경향을 조사하였다. 또한 비교대상과 주기로 동일한 반응도 억제제를 갖는 등가 핵연료 집합체를 설계하여 IFBA, Erbia 및 Dysprosia Duplex BP 설계안에 대해서도 핵특성을 평가하였다^{[2][3]}. 격자계산 코드인 HELIOS 코드를 사용하여 동일한 출력조건에서 무한중배계수, 침투출력인자, 반응도억제제, 감속재온도계수를 비교하였으며^[4] 민감도 분석을 통해 도출한 최적 핵연료 집합체를 실제 노심에 적용하여 Duplex BP의 노심 적용 타당성을 확인하였다. 노심계산은 MASTER 코드를 이용하여 주기길이, 침투출력 및 감속재온도계수에 대하여 비교하였다^[5]. 마지막으로 경제성 평가를 통하여 상용원자로의 Duplex BP의 적용 가능성을 확인하였다.

2. Duplex BP 설계안

2-1. 이중구조 가연성독봉

장주기 노심의 핵연료 집합체내 반응도 제어효과를 더욱 다양하게 조절하기 위한 방안중의 하나로 한국원자력연구소에서는 이중구조로 된 가연성독봉(Duplex Burnable Poison Rod, Duplex BP)개념을 제안하였다. Fig. 1은 한국원자력연구소에서 설계안 24개월 주기용 이중구조 가연성독봉의 구조 및 설계제원을 나타낸 것이다. 이 설계안에 대한 제작 가능성은 확인되었으나, 핵적 설계 특

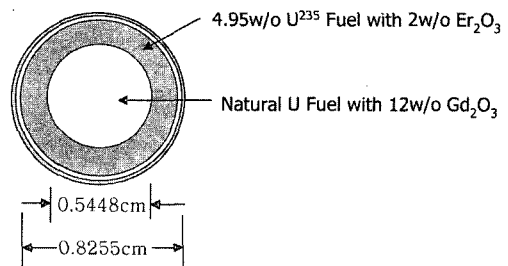


Fig. 1. Duplex BP configuration.

성 및 열수력 설계 특성은 아직 판명되지 않았다. Duplex BP는 핵연료 소결체를 이중으로 제작하여 내부에는 Gd_2O_3 의 가연성 독물질을 사용하고, 외부에는 Er_2O_3 를 사용하는 방식이다. 이중구조 가연성 독봉의 목적은 Gadolinia가 포함된 내부 핵연료의 농축도와 두께를 변화시킴으로써 보다 다양한 핵연료 집합체 반응도 제어를 가능하게 하기 위한 것이며, 외부 연료봉에 비교적 연소속도가 느린 Erbium의 가연성 흡수물질을 장전함으로써 내부 연료봉의 반경 및 함량 감소에 따른 Gadolinia의 연소속도 증가를 억제하기 위한 것이다. 이는 장주기 노심에서의 반응도제어에 효과적인 역할을 할 수 있다. 또한 감속재온도계수 측면에서 유리한 특성을 가진 Er_2O_3 를 외부에 위치시킴으로써 원자로 고유안전성 측면에서 Gadolinia BP보다 유리하게 작용할 수 있다.

2-2. 독봉내 중성자속 분포와 수밀도

이중구조 가연성 독봉은 서로 다른 독물질이 독봉의 내부와 외부에 위치한 새로운 개념의 독봉이다. Gd_2O_3 와 Er_2O_3 의 독물질을 이용하는 Gadolinia BP와 Erbium BP에 대해 독봉내 중성자속 분포와 수밀도변화를 통해 Duplex BP의 특성을 확인하였다. Duplex BP의 내부와 외부에 위치하는 Gd_2O_3 와 Er_2O_3 의 중성자 흡수 경향을 알아보기 위해 각각의 독물질을 이용한 가연성 독봉의 내부 반경에 따른 중성자속 변화를 비교하였다. Fig. 2는 Gadolinia BP와 Duplex BP 내부에서의 중성자속 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 Gadolinia BP와 달리 Duplex BP 경우 독봉 바깥쪽에서는 비교적 완만한 중성자속 감소경향을 나타낸다. 이는 급격하게 감소하는 중성자의 흡수 속도를 일차적으로 Er_2O_3 가 늦추게 하는 효과를 나타냄으로써 주기초 급격히 감소하는 Gadolinia의 연소를 오래 지속시킬 수 있다. 또한 이 효과로 인해 독작용이 소진되는 시점인 주기중간에서는 Gadolinia 영역에서의 출력분포가 매우 평탄해진 것을 볼 수 있다. 주기중간(Middle of Cycle, MOC, 30 MWD/kg-U)에서는 중성자속이 주기초 Duplex BP보다 낮았던 Gadolinia BP가 높게 나타나는데 그 이유는 주기초에 독물질을 다 소진하여 더 이상의 독작용을 할 수 없기 때문에 중성자를 Duplex BP보다 많이 흡수하지 못하여 나타난 현상이라 할 수 있다. Fig. 3은 Gadolinia BP와 Erbium BP내 주된 독작용을 하는 동위원소인 Gd^{155} , Gd^{157} 그리고 Er^{166} 에 대해 핵연료집합체 내에서의 연소에 따른 수밀도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Gd^{155} , Gd^{157} 의 경우는 20 MWD/kg-U까지 독작용이 지속되다 그 이후로는 독물질의 능력을 상실하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Er^{166} 의 경우는 주기말까지 독작용이 잔존하는 것을 볼 수 있다. 이로

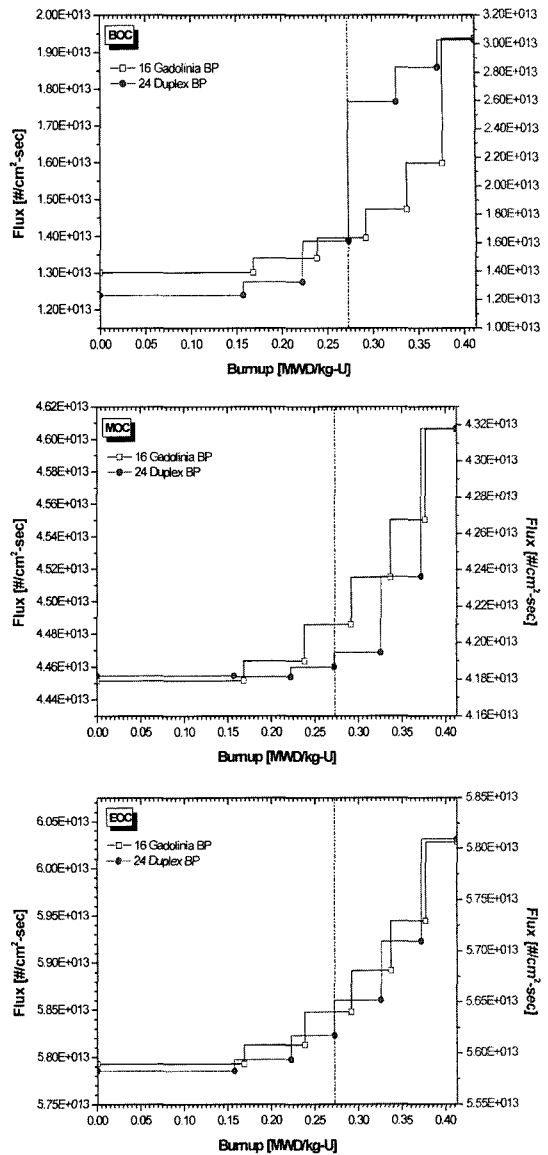


Fig. 2. Flux distribution with gadolinia BP and duplex BP pins.

서 Erbium에 비해 Gadolinia가 주기말 잔존 독작용 측면에서 보다 유리한 독물질이라 할 수 있다. 이렇게 외부에 연소속도가 Gadolinia에 비해 비교적 느린 Erbium을 위치시킴으로서 단일 독물질을 사용하는 Gadolinia BP에 비해 독봉 바깥쪽에서 나타나는 급격한 독작용 소진을 감소할 수 있다^[6]. Fig. 4는 Gadolinia BP와 Duplex BP내 Gd^{155} , Gd^{157} 의 연소에 따른 수밀도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 연소에 따른 Gadolinium의 감소가 Gadolinia BP보다 Duplex BP 내에서 더 적

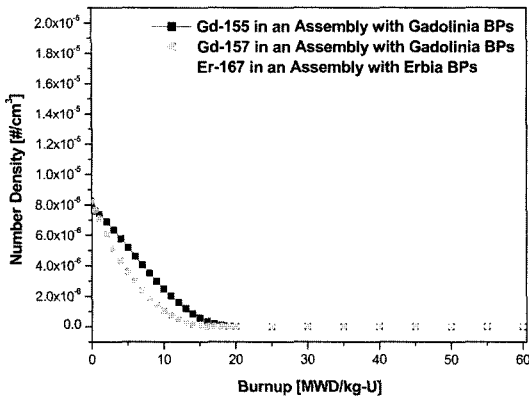


Fig. 3. Number density of Gd^{155} , Gd^{157} , Er^{167} in gadolinia & erbia BP pins vs. burn-up.

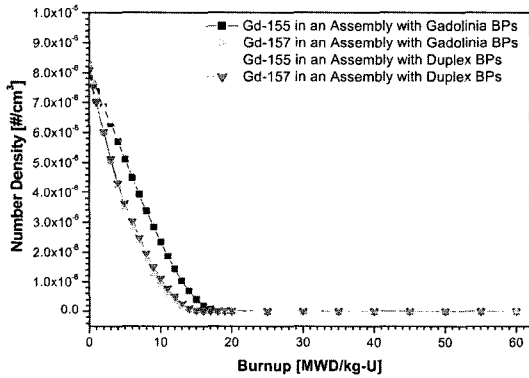


Fig. 4. Number density of Gd^{155} , Gd^{157} in gadolinia & Duplex BP pins vs. burn-up.

게 나타난다. 이러한 이유로 Duplex BP가 장주기 노심에서 더 유리한 반응도 제어능력을 보일 것이라고 판단된다.

3. 이중구조 가연성 독봉의 최적화

3-1. 설계변수에 따른 민감도분석

본 연구에서는 이러한 다양한 핵연료집합체 반응도 제어를 위해 내부와 외부에 위치한 독물질의 함량 및 양에 따른 핵적 민감도분석을 수행하였다. 24개 Duplex BP를 장착한 독봉집합체 모형은 한국원자력연구소가 설계한 구조를 이용하였다. 내부 독물질에 혼합하는 핵연료의 농축도를 동일하게 Natural Uranium을 적용하였고, Gd_2O_3 의 함량을 6, 9, 12 wt%에 대해서 수행하였다. 그리고 외부 독물질과 혼합하는 핵연료의 농축도를 4.95 wt%로 고정시키고, Er_2O_3 의 함량을 1 wt%의 가감을 두어 1,

2, 3 wt%의 함량에 대해서 민감도분석을 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 0.27240 cm일 때를 기준으로 하여 $\pm 20\%$ 의 변화를 두어 수행하였다.

3-1-1. Gd_2O_3 함량에 따른 핵특성 분석

Fig 5, 6, 7은 16개의 Gadolinia BP가 장착된 핵연료 집합체에 대해 Gd_2O_3 함량 변화에 따른 Duplex BP의 무한증배계수를 나타낸 것이다. Er_2O_3 의 함량을 1, 2, 3 wt%, 내부반경을 0.2724 cm로 고정시킨 상태에서 Gd_2O_3 함량 변화에 대하여 비교하였는데, 16개 Gadolinia BP를 장착한 핵연료 집합체 경우 17~20 MWD/kg-U 사이에서 연소초기에 비해 무한증배계수가 다시 증가하는 현상을 보였다. 이는 독물질이 핵연료보다 빠르게 소진되

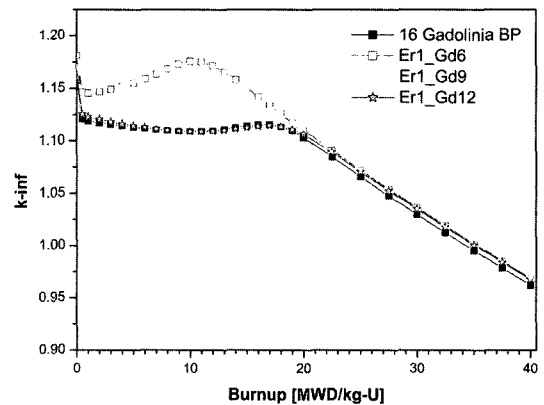


Fig. 5. K-infinity of various Gd_2O_3 enrichment vs. burn-up [Fixed Er_2O_3 1 wt%].

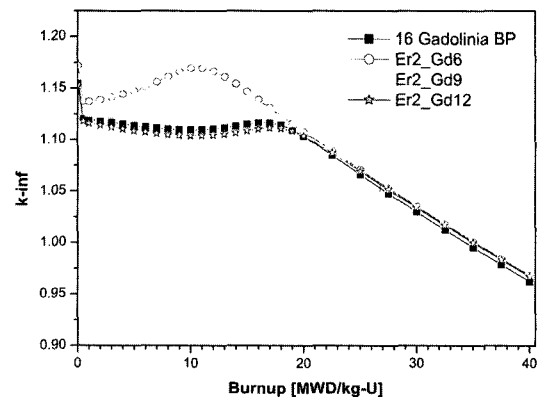


Fig. 6. K-infinity of various Gd_2O_3 enrichment vs. burn-up [Fixed Er_2O_3 2 wt%].

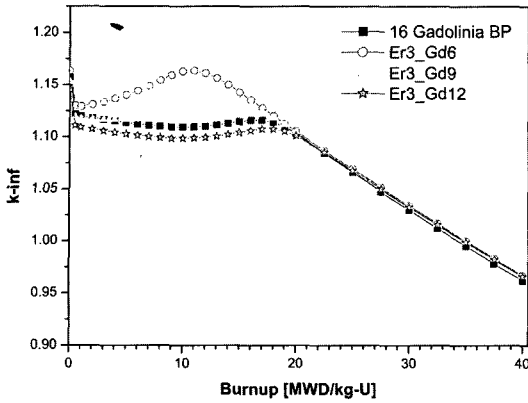


Fig. 7. K-infinity of various Gd₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Er₂O₃, 3 wt%].

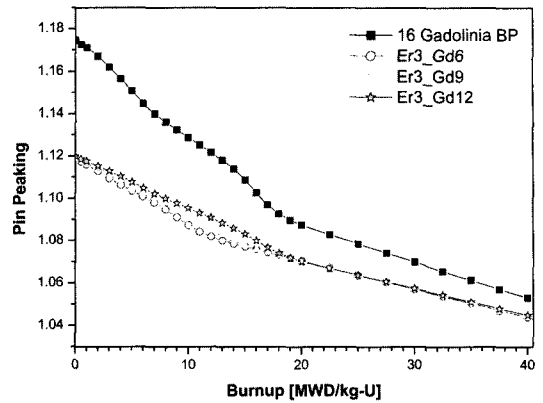


Fig. 10. Pin peaking of various Gd₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Er₂O₃, 3 wt%].

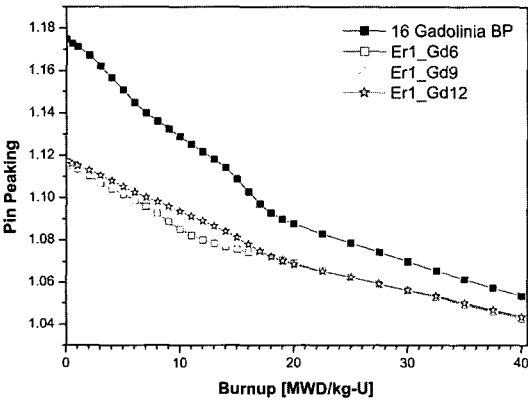


Fig. 8. Pin peaking of various Gd₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Er₂O₃, 1 wt%].

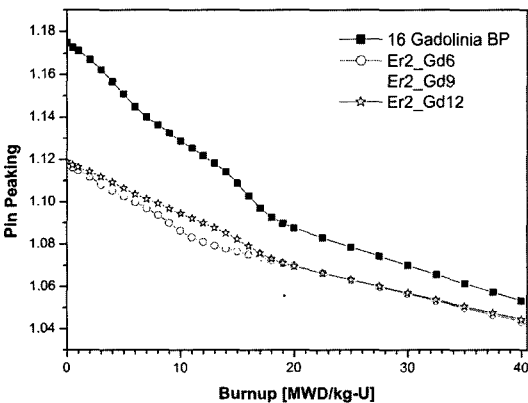


Fig. 9. Pin peaking of various Gd₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Er₂O₃, 2 wt%].

어 그동안 연소되지 않고 있던 BP 내부 및 주변 핵연료가 연소되면서 생기는 현상으로 상대적으로 핵연료가 집합체 반응도에 크게 기여하기 때문으로 판단된다. Fig. 8, 9, 10은 위와 동일한 조건을 적용하여 Gd₂O₃의 함량에 따른 침두봉출력 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 내부 독물질인 Gd₂O₃의 함량이 높을수록 침두봉출력은 높아진다. 이는 독물질의 함량이 증가할수록 자연성 독봉의 출력이 감소하게 되어 연소초기 독봉주위 핵연료봉의 출력 억제효과가 커지게 되어서 침두봉출력을 나타내는 주위 핵연료봉의 출력이 상대적으로 증가하기 때문에 침두봉출력이 높게 나타나는 것이다.

3-1-2. Er₂O₃ 함량에 따른 핵특성 분석

Fig 11, 12, 13은 16개의 Gadolinia BP가 장착된 핵연료 집합체에 대해 Er₂O₃ 함량 변화에 따른 Duplex BP

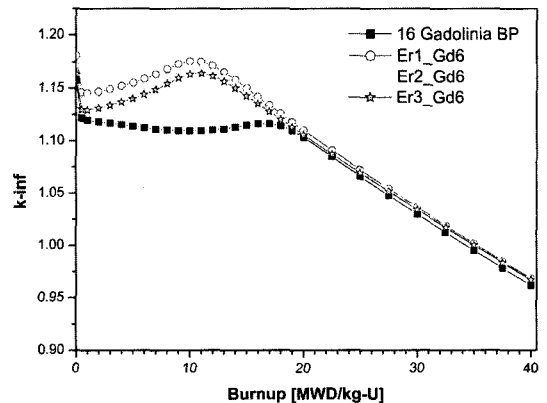


Fig. 11 K-infinity of various Er₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Gd₂O₃, 6 wt%].

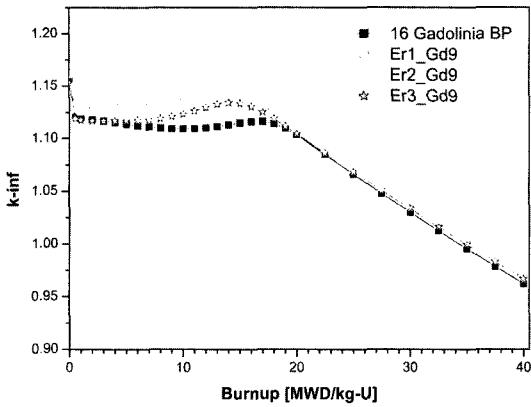


Fig. 12. K-infinity of various Er₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Gd₂O₃, 9 wt%].

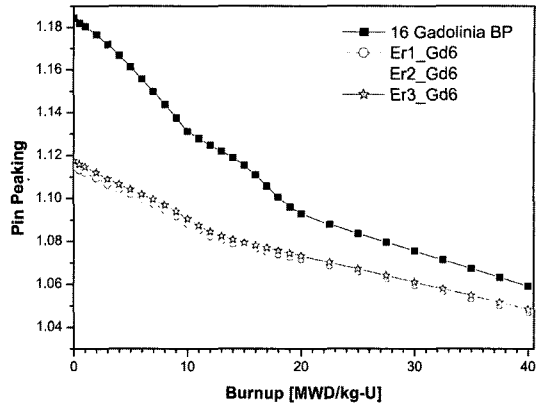


Fig. 14. Pin peaking of various Er₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Gd₂O₃, 6 wt%].

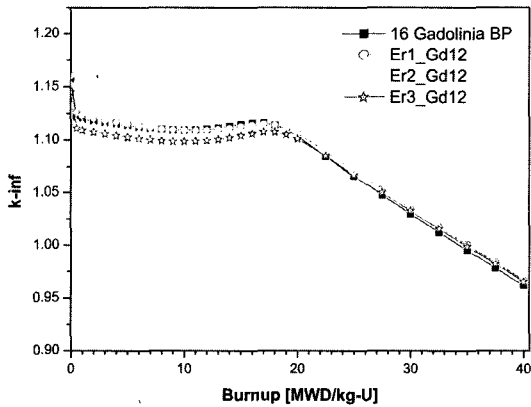


Fig. 13. K-infinity of various Er₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Gd₂O₃, 12 wt%].

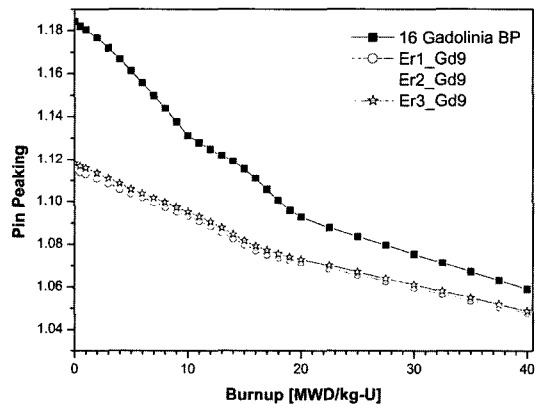


Fig. 15. K-infinity of various Er₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Gd₂O₃, 9 wt%].

의 무한증배계수를 나타낸 것이다. Gd₂O₃의 함량을 6, 9, 12 wt%, 내부반경을 0.2724 cm로 고정시킨 상태에서 Er₂O₃ 함량 변화에 대하여 비교하였다. 그림에서 보면 Er₂O₃의 함량을 1 wt%씩 가감했을 때 무한증배계수의 차이가 최대 1000 pcm 이상으로 나타났다. 하지만 Gd₂O₃의 함량을 변화시켰을때의 무한증배계수 변화보다는 작은 쪽의 차이를 보였다. Fig. 14, 15, 16은 위 조건을 동일하게 적용했을 때의 침두봉출력 변화를 나타낸 것인데, 이 또한 이와 동일한 결과로서 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 Gadolinium에 비해 Erbium이 갖는 중성자 흡수 단면적이 매우 작기 때문에 무한증배계수 및 침두봉출력 제어에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

3-1-3. 내부 반경크기에 따른 핵특성 분석

Fig 17, 18은 16개의 Gadolinia BP가 장전된 핵연료 집합체에 대해 내부반경 변화에 따른 Duplex BP의 무

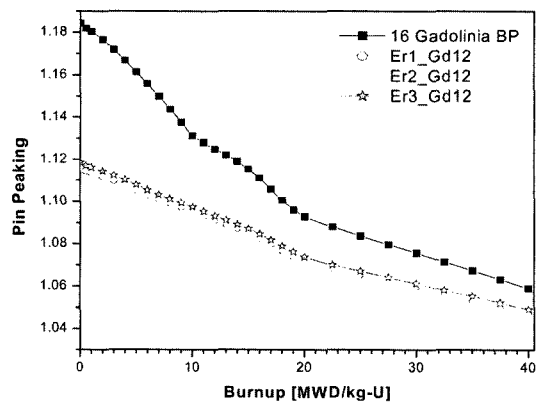


Fig. 16. K-infinity of various Er₂O₃ enrichment vs. burn-up [Fixed Gd₂O₃, 12 wt%].

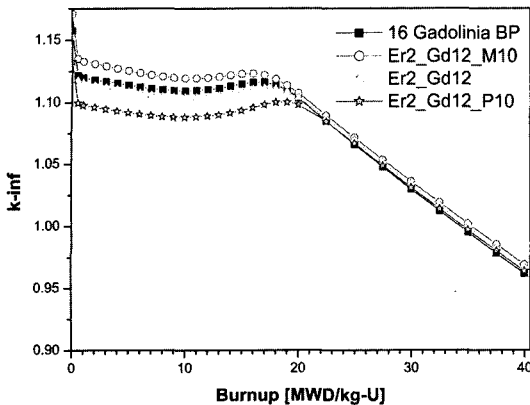


Fig. 17. K-infinity of various inner radius vs. burn-up.

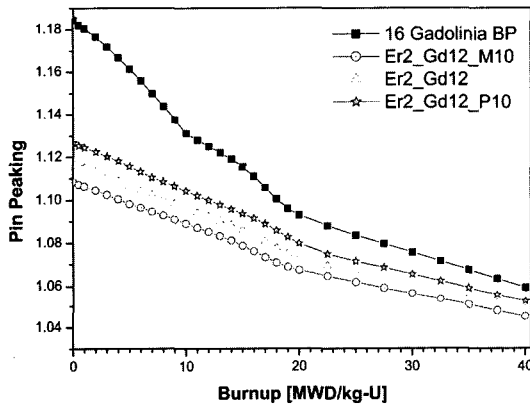


Fig. 18. Pin peaking of various inner radius vs. burn-up.

한중배계수를 나타낸 것이다. Duplex BP의 독물질 함량을 Gd₂O₃는 12 wt%, Er₂O₃는 2 wt%로 고정시킨 상태에서의 내부반경을 각각 10%씩 감소시키거나 증가시켰을 때의 무한중배계수 및 첨두봉출력 변화를 비교하였다. 내부 반경의 증가로 인해 독물질의 양이 증가하면서 무한중배계수 감소폭이 많이 완화되었고, 반대로 첨두봉출력은 증가하였다. 이 결과는 Gd₂O₃의 함량 변화에 대한 결과와 동일하게 나타났다. 내부 반경을 감소시켰을 때가 Gd₂O₃의 함량을 감소시켰을 때에 비해 연소 초기뿐만 아니라 연소가 진행됨에 따라 전체적인 연소구간에 걸쳐 첨두봉출력이 감소되는 폭이 보다 크게 나타났다.

3-1-4. Duplex BP의 최적 설계안

위의 설계변수에 대한 핵특성 경향을 고려하여 무한중배계수의 letdown curve가 평탄하게 하기 위해서는

Table 1. Optimized duplex BP design parameter.

Parameter	
Inner fuel rod material	Natural UO ₂ +12 wt% Gd ₂ O ₃
Outer fuel rod material	4.95 wt% UO ₂ +2 wt% Er ₂ O ₃
Inner fuel rod diameter (cm)	0.54480
Outer fuel rod diameter (cm)	0.82550
Cladding outer diameter (cm)	0.97210
Outer annulus thickness	0.14035

Gd₂O₃의 함량을 높여야하며, 이로 인해 증가되는 첨두봉출력은 내부반경을 감소시킴으로써 Gd₂O₃의 양을 감소시키는 방향으로 설계하였다. Duplex BP의 독물질 조성은 내부는 Natural U+12 wt%Gd₂O₃, 외부는 4.95 wt% UO₂+2 wt%Er₂O₃ 조성을 이용하였다. 그리고 연소에 따른 첨두봉출력인자가 16개 Gadolinia BP가 장전된 핵연료 집합체보다 낮으며 핵연료 집합체내 무한중배계수 감소폭을 평탄하게 할 수 있는 설계변수를 반복계산을 통해 도출하였다. 그 이유는 장주기 노심에서 중요시되는 반응도 제어효과가 기존 독물질집합체보다 더 유리한 독물질집합체를 선정하기 위해서이다. 이러한 허용범위는 독물질의 구조적인 특성으로 인해 고온 및 고압에 견딜 수 있는 재조가능 기준치를 한국원자력연구소에서 제시하였다. 계산결과 내부반경이 0.2724 cm일 때 16개 Gadolinia BP가 장전된 핵연료 집합체와 동일한 주기초 무한중배계수를 나타냈다. Table 1은 위와 같은 방법으로 반복계산을 하여 찾아낸 24개월 주기에 대한 Duplex BP의 최적설계안이다.

3-2. Duplex BP 핵연료 집합체 최적화

최적 Duplex BP 핵연료 집합체를 결정하기 위해서는 여러 가지 방법이 있다. 그러나 여기서는 앞에서 설계변수에 대한 민감도 분석을 통해 도출한 최적 Duplex BP 설계안을 이용하여 독물질 위치변화에 대한 핵적민감도 분석방법을 택하였다. 핵적민감도 분석에 사용되는 무한중배계수, 첨두봉출력인자, 감속재온도계수 등의 핵특성들 중 무한중배계수와 감속재온도계수는 독물질의 위치변화에 거의 무관하기 때문에 독물질의 위치변화에 따른 민감도분석은 첨두봉출력인자에 중점을 두고 수행하였다. 24개월 주기 노심에는 12개와 16개의 Gadolinia BP를 장전한 핵연료 집합체를 사용하는데 이에 대한 등가 Duplex BP의 개수는 각각 16개와 24개로 사용될 수 있다. 등가 Duplex BP는 12, 16개 Gadolinia BP와 주기초 동일한 반응도 역제거를 갖는 BP의 개수로 선정하였다. 16개와 24개의 Duplex BP를 핵연료내 대칭이 되도록 설계하였으며, 최대한 가능한 경우의 수를 조합하여 최적 핵연료 집합체 장전모형을 Fig. 19, Fig. 20과

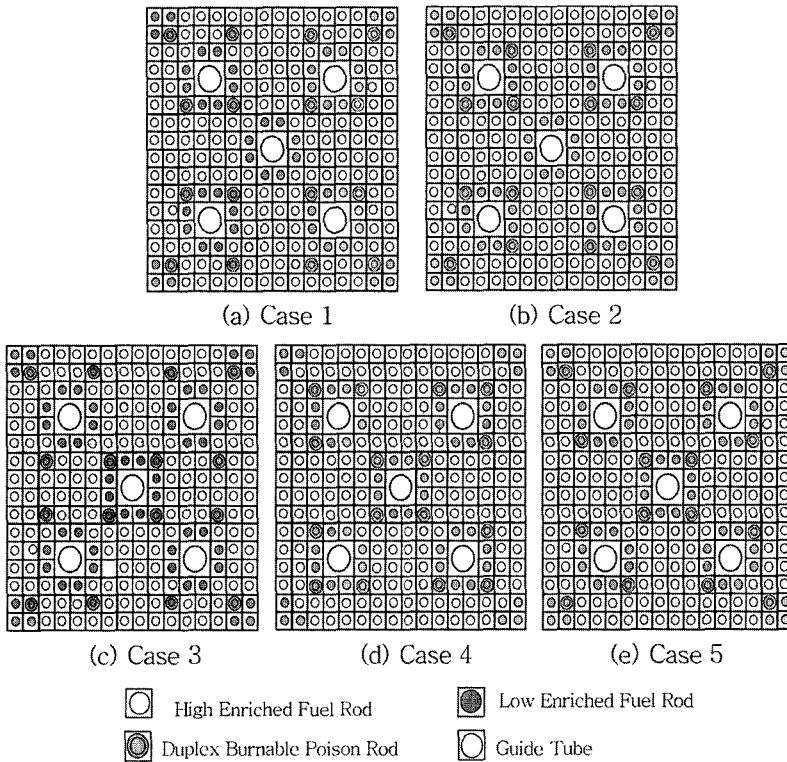


Fig. 19. BP pin location models with 16 duplex BPs.

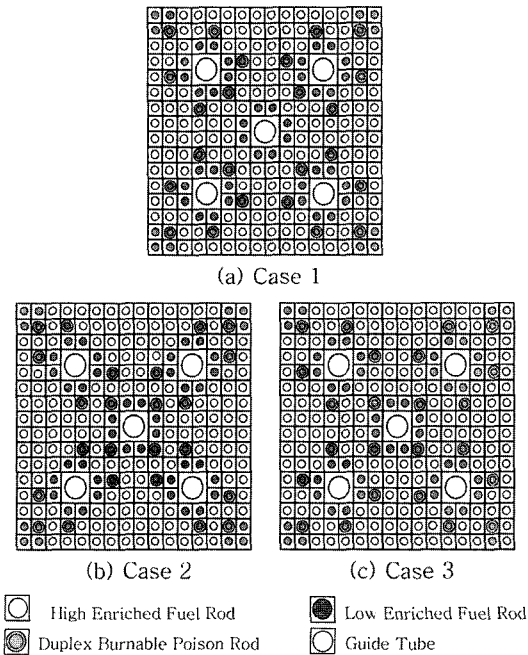


Fig. 20. BP pin location models with 24 duplex BPs.

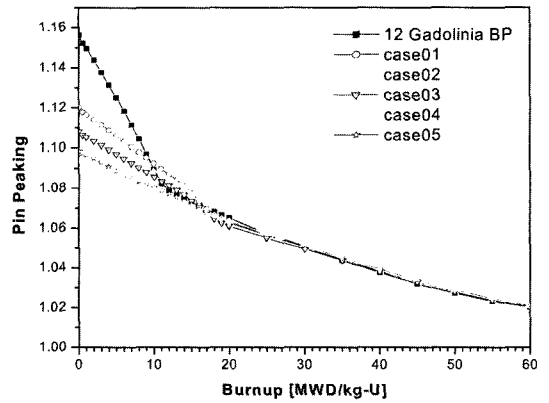


Fig. 21. Pin peaking vs. burn-up (Assemblies with 16 duplex BPs).

같이 결정하였다. 최적 독봉집합체 사양 선택 방법은 연소에 따른 침두봉출력 변화를 각 독봉집합체 사양별로 비교하여 가장 낮은 침두봉출력을 갖는 사양을 선택하였다. Fig. 21, Fig. 22는 16개와 24개 Duplex BP를 장착한 Duplex 독봉집합체 사양에 대한 연소도별 침두봉

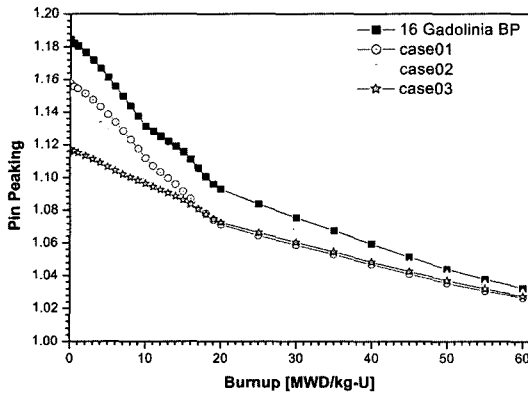


Fig. 22. Pin peaking vs. burn-up (Assemblies with 24 duplex BPs).

출력 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 16개 Duplex BP 핵연료 집합체에서는 Case4가 가장 낮은 침투봉출력을 나타내어 최적의 Duplex 독봉집합체로 선정하였다. 24개 Duplex BP 핵연료 집합체에 대해서도 전반적으로 낮은 침투봉출력 변화를 갖는 Case3을 최적의 Duplex 독봉집합체 사양으로 선정하였다.

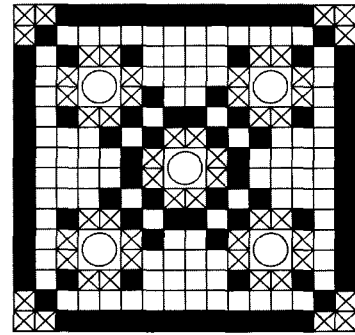
4. 핵연료 집합체별 핵특성 비교

4-1. 등가독봉집합체 설계

집합체별 핵특성을 비교하기 위해 주기초 동일한 독작용을 하는 독봉집합체를 각 독봉 설계안에 대해 설계하였다. 비교대상으로서 16개 Gadolinia BP 핵연료 집합체를 선정하였고, Duplex BP 핵연료 집합체는 위에서 민감도분석을 통해 도출한 최적 핵연료 집합체를 이용하였다. Erbium은 함량을 조절하였으며, IFBA는 보론도포 두께를 달리하여 등가 독봉집합체를 설계하였다. Table 2는 각 독봉설계안에 대한 등가독봉집합체의 설계 제원을 나타낸 것이다.

4-1-1. Erbium 독봉집합체 설계

16개 Gadolinia BP 장전 핵연료 집합체에 대한 등가



○ 안내관 ■ Erbium + 고농축도봉
 □ 고농축도봉 ⊗ Erbium + 저농축도봉

Fig. 23. Structure of assemblies with erbium BPs.

Erbium 독봉집합체를 설계하기 위해 참고문헌^[2]의 연구 내용을 이용하였다. 참고문헌^[2]에서는 Erbium의 함량 1 wt%로 고정하고 독봉의 개수만 변화시켜 Gadolinia 독봉집합체와 주기초 등가를 이루는 Erbium 독봉 개수를 선정하여 12개, 16개 Gadolinia BP에 대한 등가 독봉개수는 각각 108개 및 140개로 대칭을 이루도록 장전하였다. Fig. 23는 Erbium 독봉집합체 사양을 나타낸 그림이다^[2].

4-1-2. IFBA 독봉집합체 설계

IFBA 독봉집합체 역시 등가 Erbium 독봉집합체를 설계한 것과 동일한 방법으로 설계하였다. 기준 비교 대상에 대한 IFBA 등가 독봉집합체를 설계하기 위해 0.00127 cm의 ZrB₂ 도포두께를 가진 IFBA를 136개 장전한 독봉집합체를 선정하였다. 비교대상과 주기초 동일한 반응도 억제기를 갖게 하기위해 IFBA의 도포 두께를 변화시켜 가면서 ZrB₂ 양에 따른 무한증배계수를 계산하였다. 계산결과 도포 두께가 0.00125 cm 일 때 12개, 16개 Gadolinia 독봉을 장전한 핵연료 집합체와 등가 반응도 억제기를 갖게 하기위해 92개, 136개 IFBA의 개수를 선정하였다. Fig. 24는 IFBA 독봉집합체 사양을 나타낸 그림이다.

Table 2. Assembly design parameters of various burnable poison assemblies.

UO ₂ Enrichment (wt%)		Burnable Absorber (BA)	
Normal/Low	Material	Composition	# of BA's
4.95/4.45	Gd	8 wt% Gd ₂ O ₃	16
	Er	1.4 wt% Er ₂ O ₃	140
	IFBA	0.00125 cm (Boron Coating Thickness)	136
	Duplex BP	Outer Region : Natural U+12 wt% Gd ₂ O ₃ Inner Region : Enriched UO ₂ +2 wt% Er ₂ O ₃	24

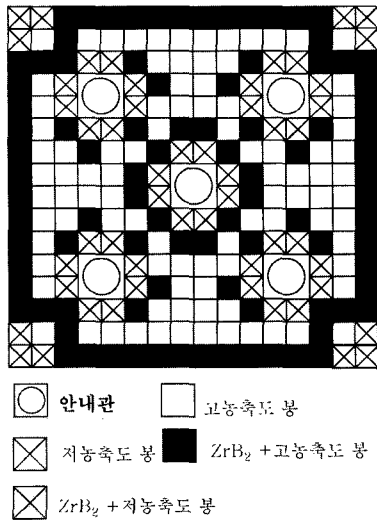


Fig. 24. Structure of assemblies with IFBA BPs.

4-2. 무한증배계수 특성

Fig. 25은 24개월 주기의 16개 Gadolinia BP를 장전한 핵연료 집합체에 대한 각 독봉설계안별 무한증배계수를 비교한 것이다. Erbium, IFBA 독봉집합체의 무한증배계수는 연소초기에 증가하는 경향을 보였다. Gadolinia BP 장전 핵연료 집합체의 경우 무한증배계수 감소곡선이 17~20 MWD/kg-U 사이에서 나타 혹 모양처럼 증가하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 Gadolinia가 핵연료보다 빠르게 연소되어 독물질의 소진 후 나타나는 현상으로 핵연료집합체의 반응도를 제어하는데 불리하게 작용한다. 그러나 내부에 Natural U+12 wt%Gd₂O₃, 외부에 4.95 wt% UO₂+2 wt%Er₂O₃를 위치시킨 Duplex BP(Erbium Duplex BP)장전 핵연료 집합체의 경우는 의

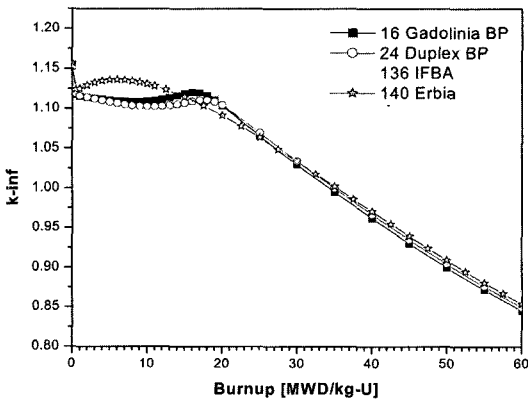


Fig. 25. K-infinity vs. burn-up.

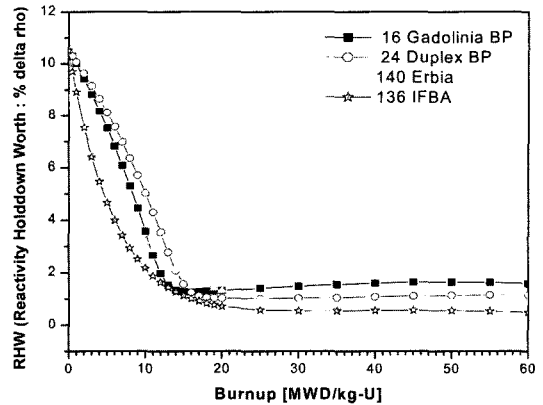


Fig. 26. RHW vs. burn-up.

부에 Gd₂O₃보다 비교적 연소속도가 느린 Er₂O₃를 장전 시킴으로써 연소초기에 급격한 Gd₂O₃의 연소속도를 지연시켜주기 때문에 비교대상 핵연료 집합체보다 무한증배계수 감소곡선이 평탄하게 나타난다. 독물질 연소시점인 20 MWD/kg-U에서의 무한증배계수를 비교한 결과, 비교대상인 Gadolinia BP 핵연료집합체보다 Erbium Duplex BP 핵연료집합체의 무한증배계수가 100 pcm 낮은 감소 효과를 보였다.

4-3. 반응도억제가 특성

Fig. 26은 24개월 주기의 16개 Gadolinia BP를 장전한 핵연료 집합체에 대한 각 독봉설계안별 반응도억제기를 비교한 것이다. Erbium과 IFBA 핵연료 집합체의 반응도억제기는 연소초기에 급격히 감소하지만 연소말로 갈수록 IFBA가 Erbium BP 핵연료 집합체보다 잔여독작용이 작게 나타난다. 또한 Gadolinia BP 핵연료 집합체는 타 핵연료 집합체에 비해 잔여독작용이 크게 나타난 반면 Duplex BP 핵연료 집합체는 Gadolinia BP 핵연료 집합체 보다 낮은 반응도억제기를 보였다.

4-4. 첨두봉출력인자 특성

Fig. 27은 24개월 주기의 16개 Gadolinia BP를 장전한 핵연료 집합체에 대한 각 독봉설계안별 첨두봉출력인자를 비교한 것이다. Erbium과 IFBA 핵연료 집합체의 첨두봉출력인자는 대체적으로 나머지 2개의 독봉집합체에 비해 낮으며 평탄한 첨두봉출력인자 변화 경향을 보였다. 이는 Gadolinia와 Erbium Duplex 독봉집합체에 비해 Erbium은 140개, IFBA는 136개라는 다량의 가연성독봉이 핵연료 집합체내에 고루 분포되어져 핵연료 집합체내의 출력분포를 보다 평탄하게 만들었기 때문으로 판단된다. 또한 Duplex BP 장전 핵연료 집합체는 Gadolinia

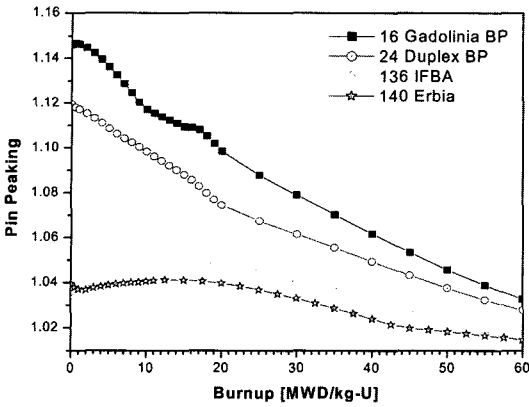


Fig. 27. Pin peaking vs. burn-up.

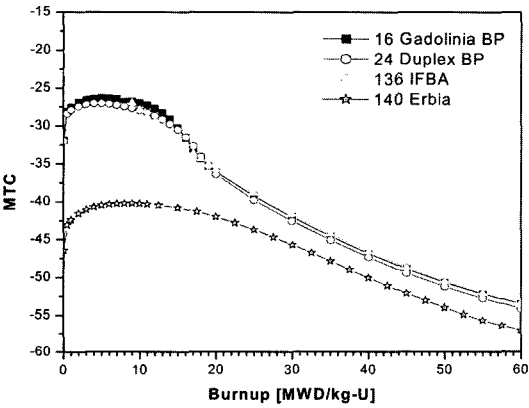


Fig. 28. MTC vs. burn-up.

BP 장전 핵연료 집합체에 비해 연소초기에 매우 낮은 침투봉출력인자를 보였으며 연소도 전 구간에 걸쳐 낮은 침투봉출력인자 변화를 보였다.

4-5. 감속재온도계수 특성

Fig. 28은 24개월 주기의 16개 Gadolinia BP를 장전한 핵연료 집합체에 대한 각 독봉설계안별 감속재온도계수를 비교한 것이다. 모든 독봉집합체 설계안이 음(-)의 감속재온도계수를 보였고, Erbia BP 핵연료 집합체가 가장 낮은 감속재온도계수 특성을 보였다.

5. 독물질 구성에 따른 Duplex BP 설계안의 핵특성 비교

이중구조 가연성 독봉의 다양한 설계변수에 따른 핵특성 평가를 위해 3가지 경우에 대한 독봉집합체를 설계하였다. 첫 번째로 독봉외부에 Er_2O_3 보다 중성자 흡수

단면적이 큰 Dy_2O_3 를 사용하여 핵특성을 확인하였고, 두 번째로 두 영역의 독물질의 함량 차이를 줄여 재료적인 문제점을 줄이고자 하였다. 마지막으로 독봉 외부에 사용되는 Er_2O_3 의 독작용 효과를 파악하기 위해 Er_2O_3 대신 천연우라늄과 농축우라늄을 사용한 설계안에 대해 비교하였다.

5-1. 독봉 외부영역에 Dy_2O_3 를 사용한 Duplex BP (Dysprosia Duplex BP) 설계안

Fig. 29, 30, 31, 32는 앞에서 도출한 최적의 Erbia Duplex BP 설계안을 이용하여 독봉 외부영역에 Dy_2O_3 를 사용했을 때의 핵특성을 평가하였다. 독봉의 구조는 앞에서 언급했던 Erbia Duplex BP의 구조를 사용하였고 독봉외부에 Erbia 대신 주기초 동일한 반응도 억제자인 1.1 wt%의 Dysprosia를 장전하였다. Dy_2O_3 를 사용한 이유는 기존의 Erbium보다 중성자 흡수단면적이 큰

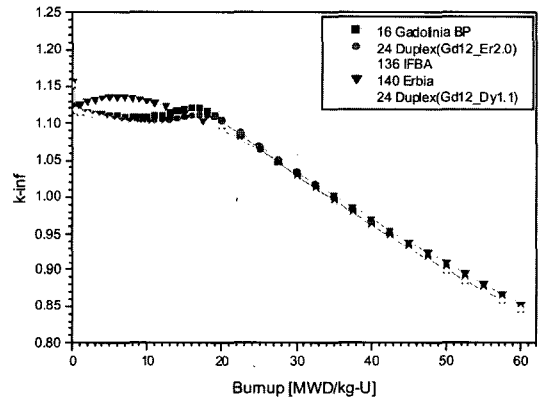


Fig. 29. K-infinity of dysprosia duplex BP vs. burn-up.

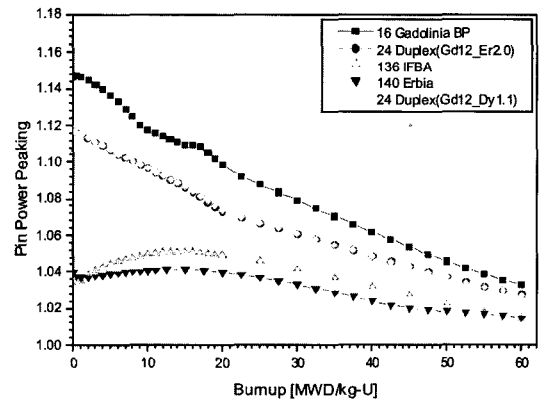


Fig. 30. Pin peaking of dysprosia duplex BP vs. burn-up.

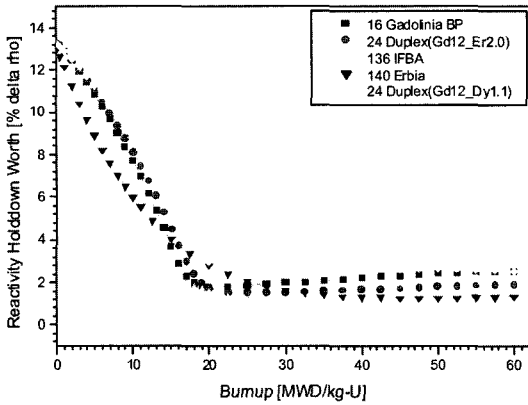


Fig. 31. RHW of dysprosia duplex BP vs. burn-up.

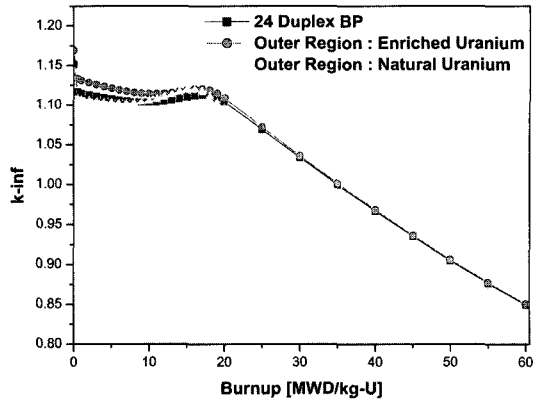


Fig. 33. K-infinity of various outer region vs. burn-up.

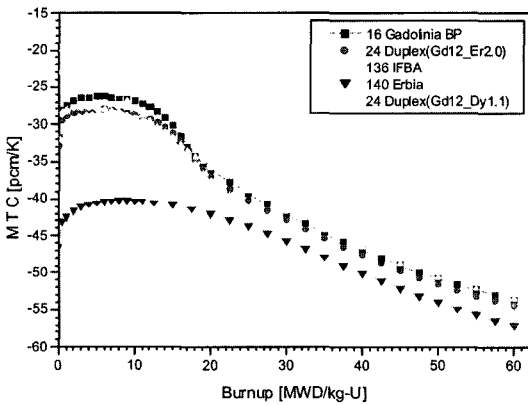


Fig. 32. MTC of dysprosia duplex BP vs. burn-up.

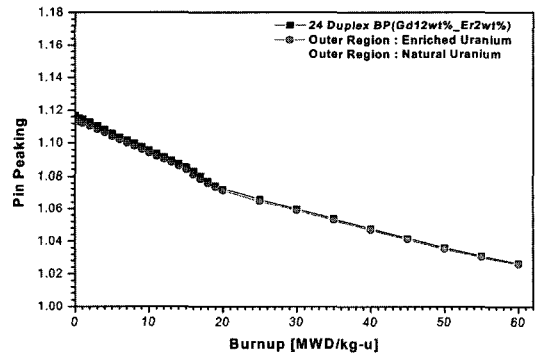


Fig. 34. Pin peaking of various outer region vs. burn-up.

Dysprosium을 사용함으로써 적은 양으로도 동일한 독작용 효과를 얻을 수 있고, 노심 적용시 경제적인 측면에서도 유리할 것이라 판단되기 때문이다. 핵특성 분석결과 무한증배계수 측면에서는 Erbia Duplex BP보다 더욱 평탄한 무한증배계수 감소곡선을 보였고, 첨두봉출력인자 측면에서는 Er_2O_3 와 마찬가지로 Dy_2O_3 도 Gd_2O_3 보다 중성자 흡수능력이 월등히 작기 때문에 첨두봉출력 변화에 큰 영향을 미치지 못했다고 판단된다. 감속재은도계수 측면에서는 모든 독봉집합체 설계안이 음(-)의 감속재은도계수를 보였다. 반응도억제가 측면에서는 Dysprosia Duplex BP 핵연료 집합체의 주기말 잔존독작용이 Erbia Duplex BP 핵연료 집합체보다 크게 나타나 노심에 적용했을 때 주기길이 측면에서 불리할 것으로 예상된다.

5-2. 독봉 외부영역에 Natural 및 Enriched Uranium을 사용한 Duplex BP 설계안

Fig 33, 34, 35, 36은 이중구조 가연성 독봉내의 외

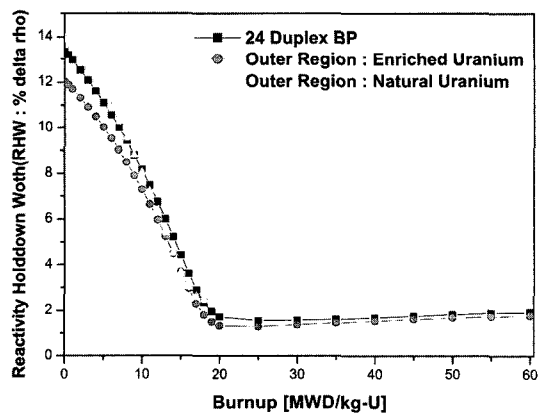


Fig. 35. RHW of various outer region vs. burn-up.

부영역에 장전되는 Erbia가 독봉집합체에 대해 어떠한 영향을 미치는지 핵특성을 비교한것이다. 그 이유는 Erbia

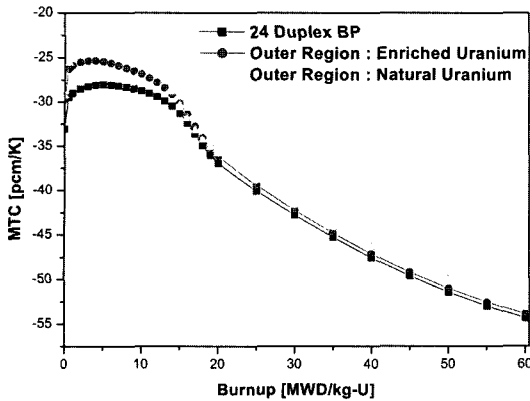


Fig. 36. MTC of various outer region vs. burn-up.

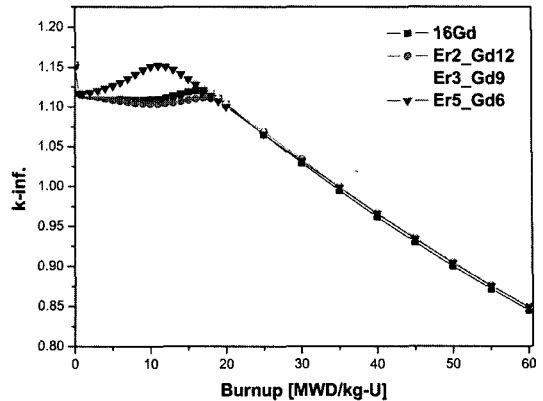


Fig. 37. K-infinity of various weighting percent vs. burn-up.

의 중성자 흡수단면적이 Gadolinia에 비해 상당히 작기 때문에 연소에 따른 무한증배계수나 침투봉출력인자에 영향을 주지 못한다. 따라서 이러한 특성을 갖는 Erbium Duplex BP에서 외부 영역에 위치한 Er_2O_3 대신에 천연우라늄과 농축우라늄을 위치했을 때 핵연료 집합체에서의 핵특성을 비교하였다. 연소에 따른 무한증배계수 특성으로 Erbium Duplex BP의 외부영역에 Er_2O_3 를 위치한 비교대상에 비해 외부에 농축우라늄을 위치한 Duplex BP는 주기초 높은 무한증배계수를 갖는다. 전체 핵연료 집합체내에 장전되는 Fissile material 양이 Er_2O_3 의 독물질이 없어짐으로써 상대적으로 증가되었기 때문이다. 천연우라늄을 장전한 Duplex BP는 농축우라늄을 사용한 핵연료 집합체에 비해 Fissile material 양이 감소되어 주기 전반에 걸쳐 낮은 무한증배계수가 나타났다. 반응도 역제가 측면에서는 독물 외부에 천연우라늄을 사용한 설계안이 타 설계안들보다 잔존 독작용이 크게 나타났다. 이는 외부에 천연우라늄을 사용한 설계안의 무한증배계수가 타 설계안보다 낮게 나타나 상대적으로 독작용이 오래 지속되는 것과 같은 현상을 보이기 때문이다. 침투봉출력인자 측면에서는 Erbium Duplex BP와 농축우라늄을 사용한 설계안이 낮은 침투봉출력인자 변화를 보이는 반면 천연우라늄을 사용한 설계안은 전체적으로 높은 침투봉출력변화를 보였다.

5-3. 독물 내부와 외부영역의 독물질 함량차를 낮춘 Duplex BP 설계안

Fig 37, 38, 39, 40은 독물 내부와 외부영역의 독물질 함량차에 대한 핵특성을 비교한것이다. Duplex BP는 제조할 시 내부영역의 독물질과 외부영역의 독물질의 함량 차이가 클 때는 두 영역의 경계면에서 재료적인 문제점이 발생할 수 있다. 서로 다른 독물질의 큰 함

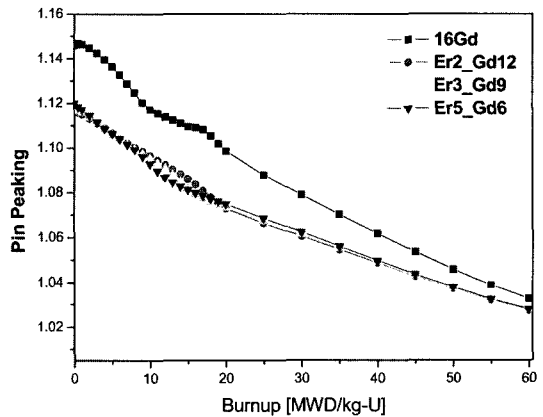


Fig. 38. Pin peaking of various weighting percent vs. burn-up.

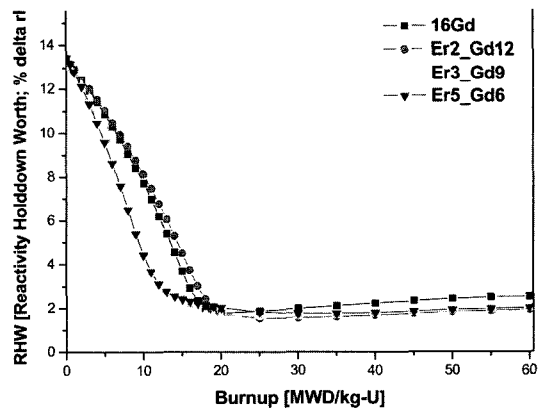


Fig. 39. RHW of various weighting percent vs. burn-up.

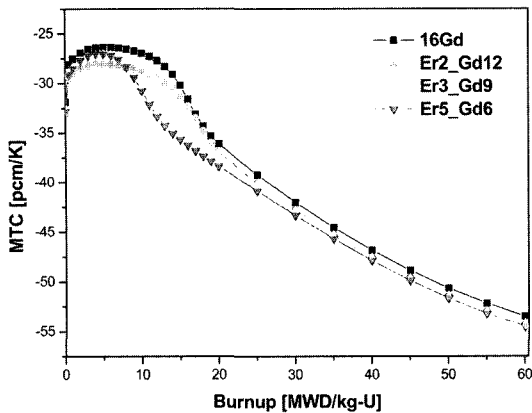


Fig. 40. MTC of various weighting percent vs. burn-up.

Table 3. Contents of erbia duplex BP.

Gd ₂ O ₃ Contents	Er ₂ O ₃ Contents
12 wt%	2 wt%
9 wt%	3 wt%
6 wt%	5 wt%

량 차이에 의한 경계면 균열 발생을 방지하기 위해 동일한 주기초 반응도 억제제를 갖는 독봉설계안에 대해

비교하였다. Table 3은 계산과정을 통해 도출한 독물질의 함량이다. 계산 결과 무한증배계수 측면에서는 Gd₂O₃의 함량이 큰 설계안의 무한증배계수 감소곡선이 가장 평탄하게 나타났다. 반응도억제제가 측면에서는 주기초 차이가 있었지만 15 MWD/kg-U 이후로는 3가지 Erbia Duplex BP 설계안 모두 유사한 감소곡선을 보였다. 침두봉출력과 감속재 온도계수 측면에서도 큰 차이를 보이지 않아서 재료적인 문제만 없다면 어떠한 설계안을 사용하여도 무방하다고 판단된다.

5-4. 결과요약

독봉의 설계변수에 따른 핵특성을 3가지 경우에 비교하였다. 첫 번째로 독봉 외부영역에 Dy₂O₃를 사용한 Duplex BP 설계안에 대한 핵특성을 평가해 본 결과, 기존의 Erbia Duplex BP와 무한증배계수, 침두봉출력변화, 감속재온도계수 특성에서 유사한 경향을 보였지만, 반응도억제제가 측면에서는 Dysprosia Duplex 독봉집합체가 주기말 잔존독작용이 크게 나타났다. 두 번째 설계안에 대해서는 천연우라늄을 사용한 설계안이 핵특성면에서 가장 불리한 경향을 나타냈고, 농축우라늄과 Er₂O₃를 사용한 설계안을 비교해 볼 때 핵특성에서 큰 차이가 없었지만, 노심의 고유안전성 측면을 고려하면 Er₂O₃를 사용하는 것이 더 유리하다고 판단된다. 세 번째로 독물질

Table 4. Configuration of 24 month fuel cycle, 3 batch for Korea standard nuclear plant.

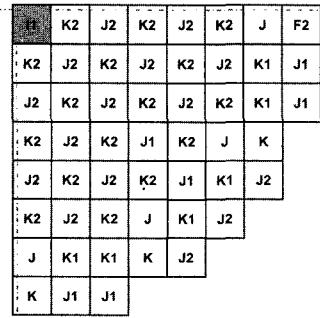
Assembly type	UO ₂ wt%	# of Rods	Burnable Absorbers			Cycle
	Normal/Low		Normal/Low	Material	wt%	# of BA's
A	1.40	236				1
B	2.87/2.37	184/52				1
B1	2.87/2.37	176/52	Gd	6.0	8	1
C	3.37/2.87	184/52				1
C1	3.37/2.87	128/100	Gd	6.0	8	1
D	4.00/3.50	184/52				2
D1	4.00/3.50	176/52	Gd	8.0	8	2
D2	4.00/3.50	172/52	Gd	8.0	12	2
D3	4.00/3.50	124/100	Gd	8.0	12	2
E, F, G	4.50/4.00	184/52	① Natural U+12 wt%Gd ₂ O ₃ , 4.95 wt% UO ₂ +2 wt% Er ₂ O ₃			3, 4, 5
E1, F1, G1	4.50/4.00	172/52	② Natural U+9 wt%Gd ₂ O ₃ , 4.95 wt% UO ₂ +3 wt% Er ₂ O ₃			16
E3, F2, G2	4.50/4.00	168/52	③ Natural U+6 wt%Gd ₂ O ₃ , 4.95 wt% UO ₂ +5 wt% Er ₂ O ₃			24
H, I, J, K	4.95/4.45	184/52	① Natural U+12 wt%Gd ₂ O ₃ , 4.95 wt% UO ₂ +2 wt% Er ₂ O ₃			6, 7, 8, 9
H1, I1, J1, K1	4.95/4.45	172/52	② Natural U+9 wt%Gd ₂ O ₃ , 4.95 wt% UO ₂ +3 wt% Er ₂ O ₃			16
H2, I2, J2, K2	4.95/4.45	168/52	③ Natural U+6 wt%Gd ₂ O ₃ , 4.95 wt% UO ₂ +5 wt% Er ₂ O ₃			24

의 함량치를 줄인 설계안에 대해서는 Gd₂O₃의 함량이 증가 할 수록 무한증배계수 곡선이 더욱 평탄해진다. 하지만 모든 설계안이 기준치에 만족하므로 노심설계시 아무런 문제가 없을거라 판단된다.

6. 노심적용 타당성 평가

6-1. Duplex BP를 이용한 노심설계

앞에서 설계한 Duplex BP 장전 핵연료 집합체를 이용하여 24개월 주기 영광 3/4호기 노심에 대해 노심 적용성을 확인하였다. 비교대상으로는 16개 Gadolinia BP가 장전된 핵연료집합체와 독물질 함량차이가 다른 3가지 Duplex BP(Case01 : 6 wt%Gd₂O₃_5 wt% Er₂O₃, Case02 : 9 wt%Gd₂O₃_3 wt%Er₂O₃, Case03 : 12 wt%Gd₂O₃_2 wt%Er₂O₃) 핵연료집합체를 장전한 노심에 대해 수행하였다. 24개월 주기 3배치 노심은 1, 2주기는 현 영광 3/4호기 핵연료집합체를 장전하여 설계하였으며, 3주기부터 18개월 3배치 노형으로 설계하였다, 5주기에서 어느 정도 평형주기가 성립된다고 가정하여 6주기부터 24개월 주기를 만족하는 Duplex BP 최적 핵연료 집합체를 동일한 공급핵연료 집합체에 위치에 장전하여 9주기에 평형노심을 이루도록 설계하였다. Table 4는 24개월 주기 영광 3/4호기 3배치 노심에 사용하게 될 각 주기별 핵연료집합체를 정리한 것이다. 또한 Fig. 41은



□ Fresh Fuel □ Once Burned ■ Twice Burned

Fig. 41. Loading pattern of equilibrium duplex BP core.

노심의 핵연료집합체 장전모형을 나타낸 것이다.

6-2. 노심계산 결과

6-2-1. 주기길이

1주기와 2주기에는 Gadolinia BP와 독물질 함량별 Duplex BP 사용 노심 모두 동일하게 주기길이를 만족했고 3주기부터 서로 다른 가연성 독봉을 사용하게 되므로 이후 주기길이에서 약간의 차이가 있었다. 등가의 독

Table 5. Fuel cycle length of KSNP based on 24 month fuel cycle.

주기	Duplex BP Core							
	Gadolinia BP Core		6 wt%_Gd ₂ O ₃ 5 wt%_Er ₂ O ₃		9 wt%_Gd ₂ O ₃ 3 wt%_Er ₂ O ₃		12 wt%_Gd ₂ O ₃ 2 wt%_Er ₂ O ₃	
	EFPD	MWD/kg-U	EFPD	MWD/kg-U	EFPD	MWD/kg-U	EFPD	MWD/kg-U
1	350	12.922	350	12.922	350	12.922	350	12.922
2	247	12.805	247	12.805	247	12.805	247	12.805
3	391	14.456	396	14.666	399	14.768	397	14.682
4	421	15.554	428	15.840	430	15.915	430	15.937
5	434	16.062	430	15.922	432	16.002	431	15.952
6	596	22.031	595	22.022	597	22.114	597	22.125
7	592	21.900	601	22.268	604	22.375	604	22.398
8	600	22.184	601	22.274	604	22.372	604	22.394
9	597	22.103	601	22.265	604	22.367	604	22.389

Table 6. Power peaking factors.

	24 month fuel cycle			
	Gadolinia BP Core	Duplex BP Core (Gd6_Er5)	Duplex BP Core (Gd9_Er3)	Duplex BP Core (Gd12_Er2)
연소초 (No Xenon)	1.7800	1.7568	1.7519	1.7363
연소중 최대값	1.5773	1.6127	1.5654	1.5335

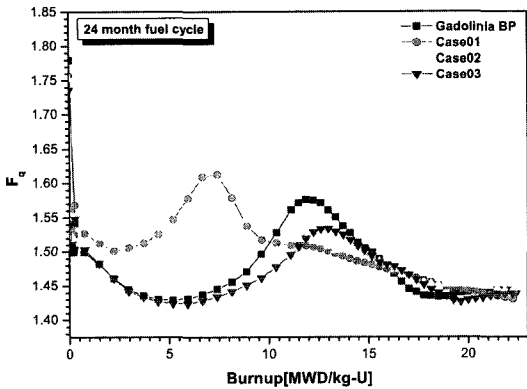


Fig. 42. F_q vs. burn-up.

봉집합체를 대상으로 노심설계를 하였지만 비교노심인 Gadolinia BP 노심의 경우 597일의 주기길이를 보였고, Case01 노심은 601일, Case02 노심은 604일, Case03 노심은 604일로 비교노심보다 4~7일 연장된 결과를 보였다. 이러한 결과는 각 핵연료집합체에 장전되는 우라늄 양의 차이와 장전모형 차이에 따른 결과로 보여진다. 이로 인해 Duplex BP를 장전한 핵연료집합체의 노심적용 가능성을 확인할 수 있었다. Table 5는 설계안별 노심의 주기길이를 비교한 것이다.

6-2-2. 첨두출력

Table 6은 축방향 첨두봉출력인자를 고려한 F_q 값을 주요 연소시점에 대하여 나타낸 것이다. 연소초 F_q 는 Gadolinia BP 노심보다 Case01 노심은 0.0232 낮은 3차원 첨두출력 값을 보였고, Case02 노심은 0.0281, Case03 노심의 경우도 0.0437 낮은 3차원 첨두출력 값을 보였다. 모든 설계안들이 설계기준치인 약 2.5 정도를 초과하지 않으므로 안전상에는 문제가 없다고 판단된다. Fig. 42는 연소에 따른 F_q 값의 변화를 나타낸 것이다.

6-2-3. 감속재온도계수

24개월 노심 모두 음(-)의 감속재온도계수를 보였으며, 임계농도도 주기전반에 걸쳐 감소하는 현상을 보였다. Table 7은 주요시점에서의 감속재온도계수를 나타낸 것이다. 주기초 Gadolinia BP 노심에 비해 Case01 노

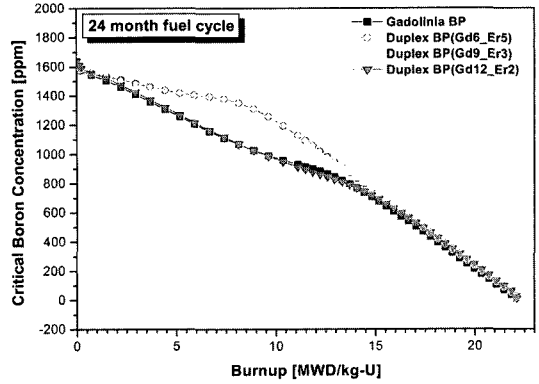


Fig. 43. CBC vs. burn-up.

심은 Eq.Xe BOC에서 1.02 pcm/°C, Case02 노심은 0.29 pcm/°C, Case03 노심은 0.48 pcm/°C 낮게 나타났다. 독물질 함량차이에 따른 설계안의 임계농도농도의 변화를 비교해보면 Gd_2O_3 의 함량이 낮을수록 주기중 임계농도농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Gadolinia의 급격한 소진에 따른 반응도의 제어 보상을 봉산이 대신하게 됨으로 생기는 결과라 할 수 있다. Fig. 43은 연소에 따른 임계농도농도변화를 나타낸 것이다.

7. Duplex BP의 경제성 평가

Duplex BP를 사용하는 노심설계안의 핵연료 주기에 대한 경제성을 Gadolinia BP를 사용하는 노심과 비교하여 평가하였다. 경제성 평가에 고려한 항목으로는 원광소요량 및 농축비용, 변환과 제조비용까지 고려하였으며, 핵연료집합체를 완성하기까지의 비용을 계산하였다. 각각의 공정에 사용한 비용단가는 OECD/NEA에서 제안한 표준단가를 적용하였다. 농축공정에서는 Separative Work Unit(SWU)을 사용하여 평가하였다. 각 독봉집합체별 제조비용에 따른 독봉의 비용과 원광비용에 따른 독봉의 비용을 비교해 보았다. 제조단가 증가에 따른 발전원가는 전체 비용을 기준으로 1.5% 이내의 변화를 보였고, BP의 원광비 증가에 따른 발전원가도 약 0.8% 이내에서 변화하여 Duplex를 사용하더라도 경제성면에서

Table 7. Moderator temperature coefficient.

	24 month fuel cycle			
	Gadolinia BP Core	Duplex BP Core (Gd6_Er5)	Duplex BP Core (Gd9_Er3)	Duplex BP Core (Gd12_Er2)
No.Xe. BOC	-10.13 pcm/°C	-10.91 pcm/°C	-10.58 pcm/°C	-10.76 pcm/°C
Eq.Xe BOC	-17.37 pcm/°C	-18.39 pcm/°C	-17.66 pcm/°C	-17.85 pcm/°C
Eq.Xe EOC	-73.41 pcm/°C	-73.77 pcm/°C	-73.44 pcm/°C	-73.37 pcm/°C

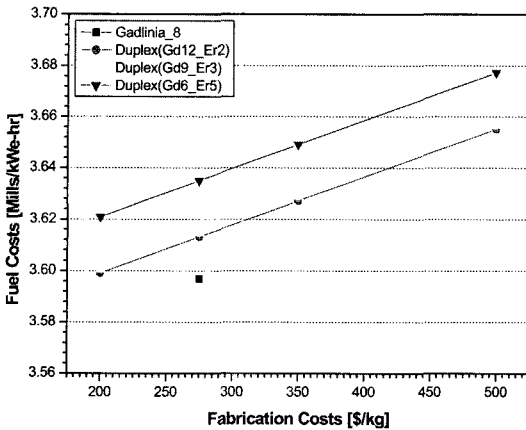


Fig. 44. Fabrication cost vs. fuel costs.

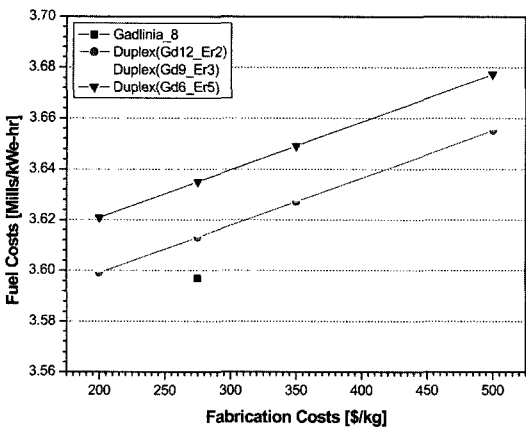


Fig. 45. BP ore cost vs. fuel costs.

는 큰 차이를 보이지 않는다는 결론이 나왔다. Fig. 44와 Fig. 45는 제조비용과 원광비용에 따른 발전원가의 변화를 나타낸 것이다. Table 8은 각 독봉집합체당 발전원가를 산출한 결과이다.

Table 8. Fuel costs [Mills/kWe-hr].

Component		Gadolinia (Gd_8)	Duplex (Gd12_Er2)	Duplex (Gd9_Er3)	Duplex (Gd6_Er5)
Ore	U	1.0670	1.0730	1.0739	1.0797
	Gd*	0.0211	0.0199	0.0149	0.0100
	Er*	-	0.0061	0.0091	0.0153
Conversion		0.1666	0.1675	0.1677	0.1686
Enrichment		1.6846	1.6979	1.6994	1.7086
Fabrication		0.6576	0.6488	0.6493	0.6528
Total		3.5970	3.6131	3.6144	3.6350

* : Ore Unit Cost : Gd-\$ 1910/kg, Er-\$ 2700/kg.

8. 결 론

본 연구에서는 장주기 원자로에서의 안정적이고 경제적인 운전에 필요한 이중구조형태의 가연성독봉에 대한 핵특성을 비교하였다. 이중구조 가연성독봉의 핵특성을 평가하기 위해 24개월주기 한국표준형원전을 비교대상으로 선정하였으며, 여러 가지의 독봉설계안들과 비교분석하였다. 이중구조 가연성독봉은 상용화된 Gadolinia 독봉에 비해 장주기노심에서 보다 효과적인 반응도제어를 할 수 있으며, 독물질의 함량조절에 따른 다양성을 제공할 수 있다. 또한 최적화된 핵연료집합체를 실제 노심에 장전하여 적용 가능성을 확인하였고 마지막으로 경제성분석을 통해 이중구조로 독봉을 제조하여도 단일독봉과 비용측면에서 큰 차이가 없음을 확인하였다.

참고문헌

- Jung, Y.H. *et al.*: "Development of advanced LWR fuel : Development of advanced LWR fuel pellet technology", KAERI/RR-2023/99, pp. 37-38. Korea Atomic Energy Research Institute (2000).
- Kim, C.H. *et al.*, "Nuclear design evaluation for improved core design characteristics", TR.95ZJ16.J1999.115, pp. 9-10. Korea Electric Power Research Institute (1999).
- 윤석균 외: "이중구조 가연성독봉 설계안의 최적화 및 노심 핵설계 타당성 평가", 한국원자력학회 춘계학술 발표회논문집, 경주 (2004).
- Stammler, R. *et al.*: "User's manual for HELIOS", Scanpower (1994).
- Cho, B.O. *et al.*: "MASTER-2.0; Multi-purpose analyzer of static and transient effects of reactors", KAERI/TR-1211/99, Korea Atomic Energy Research Institute (1999).
- Lee, D.-J. *et al.*: "Nuclear design characteristics of duplex BP for extended cycle core", Proceeding of GLOBAL2003 (2003).