

'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신 핵연료개념을 이용한 1300MWe급 원자로의
무붕산 노심 개념설계 연구

A Study on a Conceptual Core Design of 1300MWe Reactor
for SBF Operation Using a New Fuel Concept

김순영, 김종경

한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

요약

가압형 경수로 노심 반응도 제어의 70% 이상을 담당하고 있는 붕산수를 제거함으로써 붕산수의 사용에 따르는 여러 단점들을 해소하고 보다 개선된 대용량의 가압형 경수로를 설계하려는 목적으로, 1300MWe급 차세대 원자로(Korean Next Generation Reactor)를 대상으로 무붕산 노심설계를 수행하였다. 원자로 운전 시 붕산수 사용을 완전 배제하고 가연성독봉과 제어봉만으로 노심 반응도 및 출력분포를 제어하는 전략하에 기존 설계된 한국형 차세대 원자로의 핵연료집합체와 제어봉 설계를 변경하였으며, 농축 우라늄을 사용하는 핵연료봉 성분의 U-238 함량중 소량을 Pu-238로 대체한 새로운 핵연료 개념을 도입하였다. 새로운 핵연료의 사용으로 주기초 상당량의 노심 잉여반응도 제어가 가능하였고, 가연성독봉만에 의한 국부적 제어가 아닌 노심 전반에 걸친 균일한 제어를 가능하게 함으로써, 본 연구에서 도입한 핵연료 개념은 무붕산 운전에 매우 효과적이라고 판단된다. 새로운 핵연료를 사용하고 핵연료집합체 및 제어봉 설계를 변경한 후 무붕산 차세대 원자로의 초기노심 및 평형노심 설계를 수행한 결과, 충분한 원자로 상온 정지 능력을 확보할 수 있었고, 제논진동에 의한 출력변화에서도 안정된 특성을 나타냄으로써 대용량 원자로에서의 무붕산 노심설계 가능성을 제시하였다.

Abstract

A conceptual core design of 1300MWe KNGR (Korean Next Generation Reactor) without using soluble boron for reactivity control was developed to determine whether it is technically practical to implement SBF (Soluble Boron Free) operation in a large-sized reactor. Under the strategy of reactivity and power distribution control by burnable poison rods and control rods only, the fuel assembly and control rod configuration of the borated KNGR were modified. A new fuel rod that Pu-238 had been substituted for

a small amount of U-238 in fuel composition was introduced to suppress the excess reactivity at BOC and to avoid the local reactivity control by burnable poison rods only. The new fuel assembly showed good reactivity suppression capability throughout entire cycle burnup, especially at BOC. The analysis results of SBF KNGR core showed that sufficient shutdown margin and the stability against axial xenon oscillations were secured in this SBF core. It is, therefore, concluded that a SBF operation is technically practical for a large-sized LWR.

1. 서론

현재 가동되고 있는 가압형 경수로의 노심 반응도 및 출력분포 제어는 가연성독봉, 제어봉 및 붕산수에 의하여 이루어지고 있다. 가연성독봉은 초기노심 및 평형노심에서의 잉여 반응도를 보상하고 특히 원자로의 근본적인 안전성 확보를 위해, 주기초(BOC)의 붕산수 농도를 줄여 감속재 온도계수(Moderator Temperature Coefficient, MTC)를 보다 음(negative)의 값으로 만드는데 기여한다. 연료연소로 인한 반응도 제어를 제외하면, 가연성독봉은 반응도 제어에 전혀 기여하지 않고 있으며 나머지 반응도는 제어봉과 붕산수에 의해 제어되고 있다. 제어봉은 출력문전 영역내에서의 작은 반응도 변화를 보상하기도 하지만 주로 원자로 정지시와 같은 급속한 반응도 변화를 제어하기 위함이므로, 원자로 운전중의 제어봉 사용에는 제약이 따르게 되고 결국 노심 반응도 제어는 출력분포를 변형시키지 않는 장점을 갖고 있는 붕산수가 상당부분을 담당하고 있다. 그러나, 붕산수의 사용은 1차 냉각수내 붕산농도 조절계통을 복잡하게 하고 원자로내 부품들의 부식문제 및 액체 폐기를 생성문제를 야기할 뿐만 아니라, MTC를 양(positive)의 값으로 만들어 원자로 고유 안전성 확보에 물리하게 작용한다. 따라서, 국내외적으로 노심 반응도 제어에 주 기능을 담당하고 있는 붕산수를 제거함으로써 보다 개선된 가압형 경수를 설계하려는 연구가 중소형급 원자로를 대상으로 수행되어 그 가능성을 제시한 바가 있다.^{1,2)}

그러나, 무붕산 운전이 중소형급이 아닌 대용량의 원자로에서도 가능할 지에 대해서는 아직 의문이므로, 본 연구에서는 1300MWe급 대용량의 원자로인 차세대 원자로(Korean Next Generation Reactor, KNGR)를 대상으로 무붕산 노심 개념설계를 수행하였다. 제 2절에서는, 핵연료봉 위치에 장전된 다량의 가연성독봉으로 인해 증가되는 노심 평균 선출력밀도(Linear Power Density)를 감소시키고자 핵연료집합체 설계변경을 수행하였고, 붕산수와 같이 노심 전반에 걸쳐 균일한 출력제어가 가능하면서 적은 수의 가연성독봉으로도 노심 잉여반응도를 상당히 억제할 수 있도록 하기 위하여 차세대 원자로의 핵연료봉 성분을 변경하였다. 제 3절에서는 제 2절의 설계변경을 가지고 무붕산 차세대 원자로의 초기노심 및 평형노심 개념설계가 각각 이루어졌고, 원자로 정지 여유도(Shutdown Margin)를 포함하여 노심 안전특성 변수에 대한 분석이 수행되었다.

2. 핵연료집합체 설계

2.1 핵연료집합체 배열

무붕산 노심은 고온전출력 상태에서의 연료연소로 인한 장기적 반응도 제어에 가연성독봉을 주로 사용한다. 제어봉의 과도한 사용은 축방향 출력분포를 심하게 변형시키므로 노심 전 주기동안 연료연소로 인한 반응도 보상에 가급적 제어봉 사용을 억제하는 전략이 필요하고, 이를 위하여 무붕산 노심 설계에 적합한 가연

성독봉의 선정 및 사용은 매우 중요한 작업이라 할 수 있다. 본 연구에서는 가연성독봉의 종류 및 개수의 선택에 있어 자유도(Degree of Freedom)를 높이려는 목적으로 핵연료집합체의 배열을 17×17 으로 결정하였고, 안내관 크기는 1×1 형태로 구성하였다.

이 때, 핵연료집합체의 크기는 기존 차세대 원자로 사양을 그대로 유지한 채 핵연료봉 크기만을 감소시켜 사용하였다. 핵연료봉 크기를 그대로 유지한 채 핵연료집합체 크기변경을 고려해 보기도 하였으나, 전체 노심 크기의 증가는 적절하지 못하다고 판단되어 그림 1과 같이 새로운 17×17 핵연료집합체 설계를 수행하였다.

새로운 핵연료봉 설계는 기존 차세대 원자로심과 유사한 핵연료 대 감속재 비(fuel-to-moderator ratio)를 갖도록 하는데 기본 바탕을 두고 이루어 졌다. 또한, 원자로 정지시 전적으로 제어봉에만 의존해야 하는 무봉산 노심의 특성상 보다 큰 제어봉가를 확보하기 위하여 표준 17×17 핵연료집합체내의 24개 안내관 수를 28개로 증가시켜 설계하였다.

2.2 핵연료 성분

본 연구에서는 핵연료집합체 배열을 변경하는 작업 외에, 기존 농축 우라늄을 사용하는 핵연료봉 성분의 U-238 함량 중 소량을 Pu-238로 대체한 새로운 핵연료 개념을 도입하였다. 수용성 보론은 노심 전반에 걸쳐 반응도 및 출력분포를 균일하게 제어한다는 점에 착안, 핵연료봉에 새로운 물질을 첨가함으로써 가연성독봉만에 의한 국부적인 제어를 피하고자 하였다. 기존의 농축우라늄 핵연료봉은 이미 널리 알려져 있는 바와 같이 선형 반응도 모델(Linear Reactivity Model)^[4]을 따르고 있기 때문에 목표로 하는 주기길이를 만족시키기 위해서는 주기초 상당량의 잉여반응도를 보유하고 있어야 한다. 그러나, 무봉산 운전개념은 전 주기동안의 잉여반응도를 오직 가연성독봉과 제어봉만으로 보상해야 하기 때문에 제어봉의 과다사용을 억제하고 주기초의 높은 잉여반응도를 보상하기 위해서는 상당량의 가연성독봉을 필요로 하게 된다. 이는 본 연구에서와 같이 제어봉 삽입 위치에 대한 제한을 없애기 위해 가연성독봉을 핵연료봉 위치에 장전하는 경우, 더욱 크게 선출력밀도의 상승을 유발하게 된다.

Pu-238은 U-238과 비교하여 열중성자 포획단면적(Radiative Capture Cross Section)이 매우 크기 때문에 소량으로도 주기초의 잉여 반응도를 상당부분 억제할 수 있다. 본 연구에서는 플루토늄의 동위원소들 중 질량수가 우수(even number)인 Pu-238과 Pu-240이 각각 첨가된 핵연료에 대하여 연소도에 따른 무한증배계수를 계산하였고, 그 결과 소량으로도 핵연료가 갖는 선형 반응도 특성을 상당부분 완화시켜 줄 수 있는 특성을 확인할 수 있었다. 또한, 새로운 핵연료는 Pu-238 혹은 Pu-240이 첨가되어 가연성독봉의 사용 없이도 주기초 노심 잉여반응도를 상당부분 억제함으로써 무봉산 운전에 적합한 특성을 보여 주었다. 그림 2는 이와 같은 특성을 보여주는 결과로서 같은 양의 플루토늄 동위원소가 첨가되었을 때 주기초 노심 반응도 제어 효과는 Pu-240을 첨가한 경우가 Pu-238보다 더 효과적임을 나타내고 있다. 이는 노심내의 중성자 에너지 영역에서 Pu-240이 Pu-238보다 중성자 흡수능력이 큰 점에 기인한다.

본 연구에서는 주기초 노심 잉여반응도 제어에 보다 효과적인 Pu-240대신 Pu-238을 사용하였다. 비록 Pu-240이 Pu-238보다 소량으로도 더욱 효과적이긴 하나, Pu-240은 중성자 흡수반응에 의하여 핵분열성 물질인 Pu-241로 변환되므로 노심 연소에 따른 잉여 반응도 증가가 매우 크게 나타나는 반면, Pu-238은 핵분열성 물질로의 변환이 없기 때문에 연소도에 따라 잉여반응도가 서서히 감소하게 되므로 새로운 핵연료가

가연성독봉과 함께 노심에 장전되었을 때 보여주는 반응도 특성은 Pu-238을 사용하는 경우가 무용산 노심설계에는 보다 더 적합한 것으로 나타났기 때문이다.

2.3 가연성독봉 설계

무용산 노심설계에서 전 주기동안 연소도에 따른 노심 잉여반응도 변화량을 가급적 적게 유지하는 것은 매우 중요한 작업이다. 농축 WABA(Wet Annular Burnable Absorber)와 농축 PYREX 독봉은 이러한 요구를 잘 만족시킴으로써 연소도에 따른 핵연료의 선형 반응도 특성을 평평하게 만드는데 커다란 역할을 담당하였다.^[40] 그러나, 본 연구에서 도입된 플루토늄 첨가 핵연료봉은 이미 선형 반응도 특성이 상당부분 완화된 핵연료이므로 농축 WABA 및 농축 PYREX 독봉을 사용시 주기초에서 주기중까지 노심 잉여반응도가 큰 폭으로 증가하는 현상을 나타내게 된다. 독물질 종류에 따른 무용산 노심에서의 핵특성 분석결과, 형태는 PYREX 독봉 형태를 띠고 있으나 독물질은 $B_4C-Al_2O_3$ 가 사용된 새로운 가연성독봉이 본 연구에서 도입된 새로운 핵연료봉의 연소특성에 적합하게 나타나 이를 가연성독봉으로 사용하였다.

3. 노심설계

3.1 초기노심설계

앞서 설계된 핵연료집합체와 가연성독봉을 사용하여 무용산 차세대 원자로 초기노심 설계를 수행하였다. 주기길이 선정에 있어서는, 실험원자로에서 추구하는 18/24개월의 주기길이를 만족시키기에는 어려움이 있어 발전소 가동률(Availability Factor)이 85.5%의 12개월 주기길이를 갖는 무용산 차세대 원자로를 개념 설계하였고, F_{xy} 의 목표값은 뽕산사용 차세대 원자로와 동일하게 1.55 이하로 설정하였다. 노심계산을 위한 전산체계로는 CASMO-3^[41]XFORM^[42]MASTER^[43] 체계를 사용하였다.

초기노심 설계에 사용된 핵연료집합체의 특징은 표 1에 나타나 있고, 노심 장전모형은 그림 3과 같다. 뽕산수를 제거함으로써 발생하는 축방향 출력분포의 노심 하단부 치우침 현상을 제어하기 위하여 핵연료집합체 축방향 zoning을 사용하였다. A 형태와 B 형태의 핵연료집합체는 일부 집합체에 축방향 zoning이 이루어졌고, C 형태의 모든 핵연료집합체는 축방향 zoning이 이루어 졌다. 축방향 zoning은 핵연료에 첨가되는 Pu-238의 양을 변화시키는 방법을 사용하였는데, 이는 재장전 운전시에도 zoning 효과가 어느 정도 지속되도록 하기 위함이다.

가연성독봉은 A 형태와 B 형태의 핵연료집합체 경우 12개, C 형태의 경우는 16개가 사용되었고, 그 장전 모형은 그림 4에 잘 나타나 있다. 독봉 장전위치는 기본적으로 대칭을 유지하도록 한 후, 민감도 분석을 통하여 첨두출력치가 최소가 되도록 선정하였다.

반복적인 노심 연소계산을 통하여 전 주기동안의 잉여반응도 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에 나타난 것처럼 노심 잉여반응도는 가연성독봉만으로 전 주기동안 1.75% 미만으로 제어가 가능하였다. 연소도에 따른 AO 변화는 1%~5% 범위의 양의 값을 가짐으로써 제어봉 삽입시 하단부로 치우치는 축방향 출력분포를 최소화하는데 효과적일 수 있는 결과를 보였다.

제어봉은 크게 잉여반응도와 출력분포 제어를 동시에 담당하는 RCB(Reactivity Control Bank)와 원자로

정지를 담당하는 SDB(Shutdown Bank)로 구성하였고, 그 배열 형태는 그림 6에 잘 나타나 있다. RCB는 RCB1, RCB2, RCB3, RCB4, 및 RCB5의 5개 bank로, SDB는 SDB1, SDB2, SDB3, 및 SDB4의 4개 bank로 나뉘어진다. 제어봉 집합체 수는 총 241개의 핵연료집합체 중 141개로서 Checkerboard 형태보다는 약 20개 정도 증가된 형태를 띄고 있다. 제어봉 재질로는 정지여유도를 충분히 확보하기 위하여 SDB의 경우 B₄C를 사용하였고, 원자로 운전중에 노심내에 삽입되는 RCB는 Ag-In-Cd를 사용하였다.

그림 6과 같이 구성된 bank들에 대한 임계 제어봉 위치탐색 작업이 수행되었고 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7과 같이 제어봉이 삽입된 상태에서의 AO 및 F_{xy} 는 ARO 상태에서의 결과와 함께 그림 8과 그림 9에 각각 나타나 있다. AO는 전주기동안 -8.7%~0%의 범위에서 제어되었고 F_{xy} 는 목표값인 1.55 이하에서 제어됨을 확인하였다.

무봉산 노심에서의 원자로 상온정지를 위한 반응도 제어는 일반적인 봉산사용 원자로와는 달리 감속재 온도계수가 최대 음의 값을 갖는 주기초에서 가장 크게 요구되므로, 본 연구에서는 설계된 노심에 대해 주기초에서의 원자로 정지여유도를 계산하였고 이를 표 2에 나타내었다. 이 때, 축방향 출력분포변화에 의한 영향은 계산을 수행하지 않고 일반적인 값을 사용하였다. N-1 rod 상태에서의 제어봉가를 계산하고 10%의 물확실성을 고려한 후 출력 및 온도 감소로 인한 반응도 삽입량을 상쇄시켰을 때 정지여유도는 약 5.3% $\delta\rho$ 를 나타냄으로써, 본 연구에서 개념설계된 무봉산 차세대 원자로 초기노심은 충분한 정지여유도가 확보되어 있음을 확인하였다.

본 연구에서 개념설계된 무봉산 노심의 제논진동에 대한 축방향 출력변화 제어와 안정 특성을 평가하기 위하여 3-D 모델을 사용, 주기초와 주기말에서 제논진동을 유발시킨 후 시간에 따른 AO 변화를 72시간 동안 살펴보고, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 계산결과, 축방향 안정지수(Axial Stability Index)는 주기초에 -0.00457 h^{-1} 로서 음의 값을 나타내었고, 제논 제어가 어려워 ASI가 불안정하게 되는 주기말에도 -0.00829 h^{-1} 의 음의 값을 나타냄으로써 본 연구에서 개념 설계된 무봉산 노심의 축방향 제논진동에 대한 안정성을 보여주고 있다.

3.2 평형노심설계

3.1절의 초기노심 설계작업 후 평형노심 설계를 수행하였다. 일반 봉산사용 원자로의 재장전 노심설계와 비교하여 무봉산 노심의 재장전 노심설계는 연소도에 따른 핵연료집합체의 반응도 특성이 다르기 때문에 노심 장전모형을 주의깊게 선정하여야 한다. 즉, 신연료집합체(Fresh Assembly)는 연소도에 따라 반응도가 평평한 분포를 보이지만 이미 한 번 이상 연소된 핵연료집합체(Burnt Fuel Assembly)는 가연성독물질의 소진으로 인해 반응도가 선형적으로 크게 감소하는 특성을 보이게 된다. 노심 전체의 잉여반응도를 가급적 평평하게 유지하기 위해서는 신연료집합체의 반응도가 연소 핵연료집합체로 인해 감소하는 반응도를 보상해야 하므로 신연료집합체는 연소도에 따라 반응도가 지속적으로 크게 증가하도록 해야 한다. 그러나, 이러한 전략은 주기중부터 주기말까지 신연료집합체와 연소 핵연료집합체사이의 반응도 차이를 크게 하므로 반경방향 점두 출력치인 F_{xy} 의 상승을 초래하게 되어 F_{xy} 목표값 이하로 제어하는 것을 어렵게 한다. 따라서, 본 연구에서는 신연료집합체의 반응도가 연소도에 따라 천천히 증가하는 특성을 가지도록 핵연료 농축도 및 가연성독물의 개수를 결정하였고, 현재 주로 사용되고 있는 In-Out 장전모형 대신 Out-In 형태에 가까운 장전모형을 사용하여 신연료집합체의 반응도 증가 특성이 노심 전체의 반응도에 미치는 영향을 최소화하도록 하였

다.

평형노심은 8주기에 도달한 것으로 판단되며, ARO 상태에서의 노심 잉여반응도 계산결과는 그림 10에 나타나 있다. 기존 뭉산사용 노심과 비교하여 평형주기가 늦게 나타났고 상기에 언급하였던 이유로 천이노심 장전모형 선정에 있어 많은 시간이 소요되었다. AO는 초기노심을 비롯하여 재장전 매주기마다 $\pm 10\%$ 이내를 유지하였고, 주로 전 주기길이동안 출력분포가 노심하부로 치우쳐 있다가 주기말에 상부로 치우치도록 하였다. 이는 축방향 zoning된 신연료집합체의 상부와 하부 반응도 차이를 줄여 노심 침투출력치 제어에 효과적으로 작용하게 된다.

초기노심 설계시와 마찬가지로 임계 제어봉 위치탐색 작업이 그림 11과 같이 수행되었고, AO와 F_{∞} 결과는 각각 그림 12와 그림 13에 각각 나타나 있다. AO는 -7% 에서 0.4% 범위를 가지며, F_{∞} 도 최대치가 1.51 이하로 출력분포 제어가 잘 되었음을 보여주고 있다.

설계된 평형노심에 대해서도 상온 정지여유도를 분석하였다. 초기노심과 마찬가지로 감속재 온도계수가 최대 음의 값을 갖는 주기초에서의 정지여유도를 계산하였고, 이를 초기노심 결과와 함께 표 2에 나타내었다. 정지여유도는 약 $3.1\% \delta\rho$ 를 나타냄으로써, 본 연구에서 개념설계된 무뮌산 차세대 원자로 평형노심의 정지여유도는 충분함을 확인하였다.

본 연구에서 개념설계된 무뮌산 평형노심의 제논진동에 대한 축방향 출력변화와 안정특성을 3.1절에서 기술한 방법과 동일하게 3-D 모델을 사용, 주기초와 주기말에서의 시간에 따른 AO 변화를 72시간 동안 살펴 보았고 표 4에 나타내었다. 표 4에 나타난 바와 같이 주기초에는 -0.0241 h^{-2} 를, ASI가 불안정하게 되는 주기말에도 -0.0105 h^{-2} 의 음의 값을 나타냄으로써 평형노심의 경우에도 축방향 제논진동에 대한 안정성을 보여주고 있다.

4. 결론

1300MW급 한국형 차세대 원자로를 대상으로, 원자로 운전시 뭉산수 사용을 완전 배제하고 가연성독봉과 제어봉만으로 노심 반응도 및 출력분포를 제어하는 무뮌산 노심 개념설계를 수행하였다. 가압형 경수로 노심설계 기술에 기초를 두고 기존 차세대 원자로의 핵연료집합체와 제어봉 설계를 변경하였으며, 농축 우라늄을 사용하는 핵연료봉 성분의 U-238 함량중 소량을 Pu-238로 대체한 새로운 핵연료를 도입하였다. Pu-238은 U-238과 비교하여 열중성자 포획단면적이 매우 크기 때문에 소량으로도 주기초의 잉여반응도를 상당부분 억제할 수 있었고, Pu-238의 사용으로 연료연소로 인한 장기적 반응도 제어를 담당하는 가연성독봉의 개수를 감소시킬 수 있을 뿐 아니라, 가연성독봉만에 의한 국부적 제어가 아닌 노심 전반에 걸친 균일한 제어를 가능하게 함으로써, 본 연구에서 도입한 핵연료 개념은 무뮌산 운전에 매우 효과적이라고 판단된다. 축방향 출력분포 제어를 위한 핵연료집합체 zoning에 있어서는 가연성독봉의 농축도/개수를 사용하지 않고 핵연료에 첨가되는 Pu-238의 함량을 조정함으로써 축방향 zoning에 의한 효과를 오래도록 지속시킬 수 있었다.

새로운 핵연료를 사용하고 핵연료집합체 및 제어봉 설계를 변경한 후 무뮌산 차세대 원자로의 초기노심 및 평형노심 설계를 수행한 결과, 충분한 원자로 상온 정지 능력을 확보할 수 있었고, 제논진동에 의한 출력 변화에서도 안정된 특성을 나타냄으로써 대용량 원자로에서의 무뮌산 노심설계 가능성을 제시하였다. 본 연구에서 도입된 무뮌산 노심설계 개념 및 요소 기술은 중소형급 무뮌산 원자로 설계에도 반영되어 보다 향상된 노심을 기대할 수 있고, 나아가 국내 무뮌산 노심설계 연구에 크게 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 신형원자로연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] 기초전력공학공동연구소, "무봉산운전을 위한 운전방식의 개선연구," KAERI/CM-097/96, July 1997.
- [2] ABB-CE, "Soluble Boron Free Passive PWR Study Phase II Summary Report," November 29, 1989.
- [3] M. J. Driscoll, T. J. Downar, and E. E. Pilat, "The Linear Reactivity Model for Nuclear Fuel Management," American Nuclear Society, 1990.
- [4] 김순영, 김종경, "가연성독봉에 의한 차세대 원자로 무봉산 노심의 잉여 반응도 제어," '97춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1997.
- [5] STUDSVIK, "CASMO-3 User's Manual," STUDSVIK/NFA-89/3, 1989.
- [6] 한국원자력연구소, "XFORM 1.0 User's Manual," KAERI/TR-707, January, 1996.
- [7] 한국원자력연구소, "MASTER User's Manual," Rev. 2, January, 1998.
- [8] S. Y. KIM, J. K. KIM, and S. K. CHUNG, "Conceptual Core Design of the 1300MW(electric) Reactor for SBF Operation," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **79**, 1998 Winter Meeting, Washington D. C., November 15-19, 1998.

표. 1 초기노심 핵연료집합체 특성

	A ^ω			B ^ω			C ^ω		
	A1	A2	A2 ^ω	B1	B2	B2 ^ω	C1	C2	C2 ^ω
U-235(w/o)	3.0			3.5			4.0		
Pu-238(w/o)	0.4	0.55	-	0.75	0.95	-	0.7	1.1	-

^ω : 초기노심 핵연료집합체

^a : 축방향 zoning 된 핵연료집합체, A2(50%) + A1(50%)

^b : 축방향 zoning 된 핵연료집합체, B2(50%) + B1(50%)

^c : 축방향 zoning 된 핵연료집합체, C2(50%) + C1(50%)

표. 2 원자로 정지여유도 계산 결과(BOC)

Requirements(% $\delta\rho$)	
A. Control Rod Requirements [(a)+(b)+(c)+(d)+(e)]	12,1193(10,8667[*])
(a) Power Defect	2,1665(2,1191 [*])
(b) Xenon Burnout	2,5471(2,3643 [*])
(c) Isothermal Defect	5,3821(4,0190 [*])
(d) Rod Insertion Allowance	1,5236(1,8643 [*])
(e) Redistribution	0,5000(0,5000 [*])
B. Control Rod Scram(N-1) Worth [(f)-(g)]	19,3871(15,5138[*])
(f) All Full-length Assemblies Inserted	19,7690(17,8844 [*])
(g) Stuck Rod Worth	0,3819(2,3706 [*])
C. 10% Uncertainty Less [B×0.9]	17,4484(13,9624[*])
D. Shutdown Margin [C-A]	5,3291(3,0957[*])

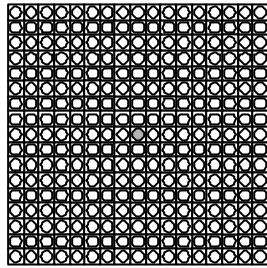
* : 평형노심에서의 값

표. 3 ASI 계산 결과(1주기)

Burnup	Oscillation Period (hr)	ASI (hr ⁻¹)
BOC	30	-0,00457
85% EOC	28	-0,01125
EOC	29	-0,00829

표. 4 AS 계산 결과(8주기)

Burnup	Oscillation Period (hr)	ASI (hr ⁻¹)
BOC	32	-0,02409
85% EOC	28	-0,02044
EOC	31	-0,01047



17 × 17

그림 1. 핵연료집합체 설계

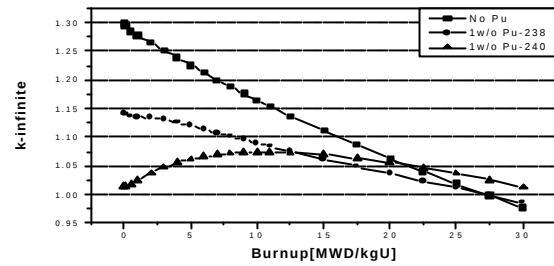


그림 2. 플루토늄 첨가 핵연료봉의 연소 특성

A1	AZ	A1	AZ	A1	AZ	BZ	BZ	CZ
AZ	A1	AZ	A1	AZ	A1	BZ	B1	CZ
A1	AZ	A1	AZ	A1	B1	B1	CZ	CZ
AZ	A1	AZ	A1	AZ	A1	B1	CZ	CZ
A1	AZ	A1	AZ	A1	B1	B1	CZ	CZ
AZ	A1	B1	A1	B1	BZ	CZ	CZ	
BZ	BZ	B1	B1	B1	CZ	CZ		
BZ	B1	CZ	CZ	CZ	CZ			
CZ	CZ	CZ	CZ					

그림 3. 초기노심 장전모형

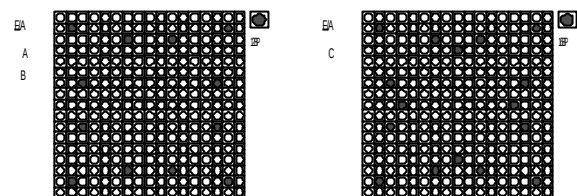


그림 4. 가연성독봉 장전모형

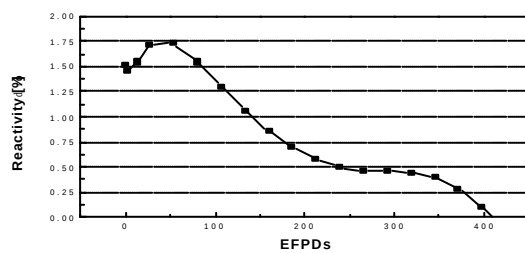


그림 5. 노심 잉여반응도 변화(1주기, HFP, Eq. Xe)

R1		R4		S3	R2	S1		S2
	S3		S2		S4		S4	
R4		S3	S1	S4	S2	S1		S2
	S2	S1	R5		S3		S3	R3
S3		S4		R3		S1		
R2	S4	S2	S3		S2		S4	
S1		S1		S1		S4		
	S4		S3		S4			
S2		S2	R3					

Index	Control Bank Name	Material
R1, R2, R3, R4, R5	RCB 1, 2, 3, 4, 5	Ag-In-Cd
S1, S2, S3, S4	SDB 1, 2, 3, 4	B ₄ C

그림 6. 제어봉 배열

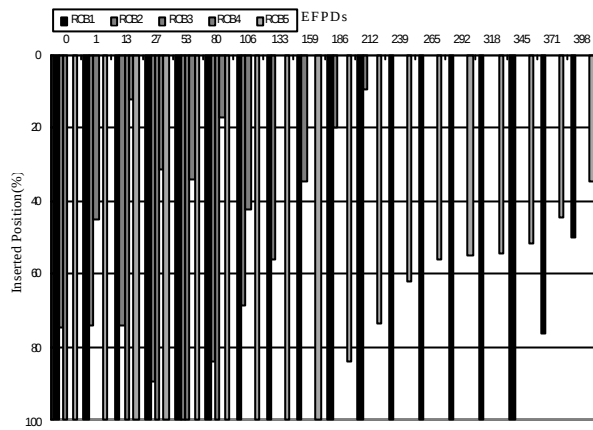


그림 7. 잉계 제어봉 위치탐색 결과(1주기, HFP, Eq. Xe)

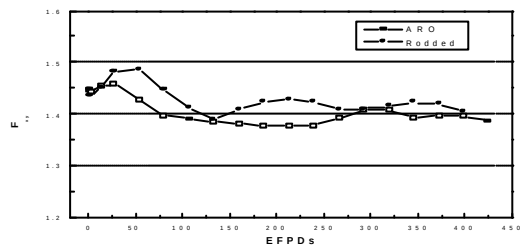


그림 9. β_{eff} 변화(1주기, Critical OR Position)

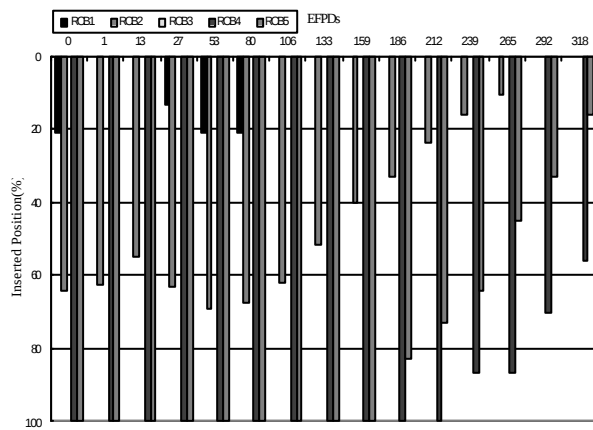


그림 11. 잉계 제어봉 위치탐색 결과(8주기, HFP, Eq. Xe)

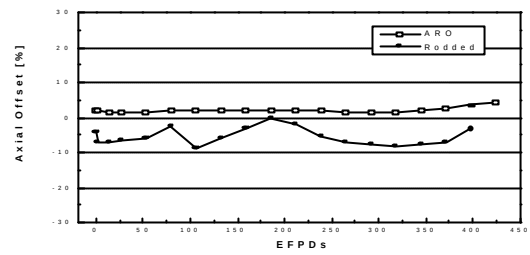


그림 8. AO 변화(1주기, Critical OR Position)

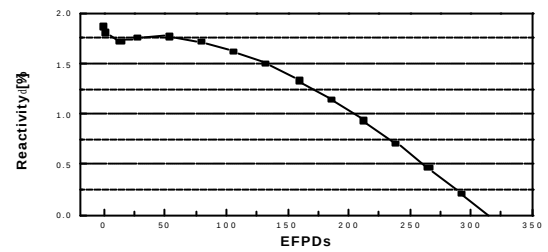


그림 10. 노심 잉여반응도 변화(8주기, HFP, Eq. Xe)

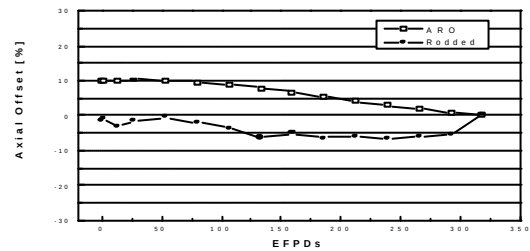


그림 12. AO 변화(8주기, Critical OR Position)

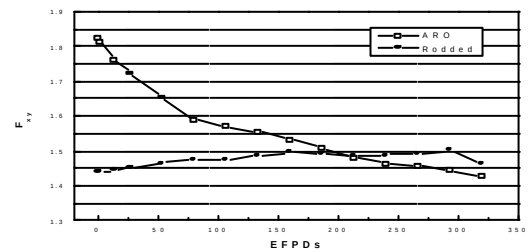


그림 13. β_{eff} 변화(8주기, Critical OR Position)