'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 증식특성노심설계에서의 소듐기화반응도가 감소연구

Sodium Void Worth Reduction in KALIMER Breeder Core Design

김영인, 송훈, 김상지, 김영진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고증식비를 가지는 칼리머 참조노심설계 조건하에서 노심 구성, 축방향 블랭킷과 소듐충전 노심상부 핵분열개스 플레넘(UFGP) 설치와 함께 노심 높이만을 감소시키는 설계방안을 평가하여 소듐기화반응도가를 최대로 감소시킬 수 있는 노심설계방안을 탐색하였다. 평형핵연료주기 분석을 통한 탐색 결과, 참조노심에서 핵분열성 물질(fissile)인 구동핵연료집합체의 핵연료 영역 높이만 20 cm 감소시키고 이 영역을 소듐충전 UFGP로 대체설치한 노심을 최적 소듐기화반응도가 감소노심으로 선정하였다. 최적선정노심은 증식비가 1.16으로 높은 증식특성을 보유하고 있으며, 모든 핵연료집합체들과 노심 UFGP에서의 소듐 기화를 고려하는 경우에 참조노심과 비교하여 소듐기화반응도가는 1377 pcm에서 1193 pcm으로 감소하였다. 반면에 연소결손반응도는 632 pcm에서 1343 pcm으로 상대적으로 크게 증가하여 노심 핵적 성능측면에서의 두 파라메터에 대한 trade-off이 중요함을 확인하였다.

Abstract

A study was performed to investigate potential design options for the maximum reduction of sodium void worth by evaluating various design options such as core pancaking by the core height reduction and alternative core configurations with the addition of axial blankets and sodium filled upper fission gas plenum(UFGP) in the reference KALIMER core envelope characterized by its high breeding ratio. From the exploratory search of various design options, the radially heterogeneous core that is designed with the reduction of driver fuel fissile height only by 20 cm and the replacement of the drive fuel removal with 20-cm thick sodium filled UFGP was determined to be the best candidate in achieving the sodium void worth reduction. The sodium void worth reduced core has a breeding of 1.16 and the sodium void worth reduction from 1377 pcm to 1193 pcm in case of whole sodium voiding in fuel and blaket assemblies including the sodium filled UFGPs.The burnup reactivity swing is increased from 632 pcm to 1343 pcm and there exists a strong tradeoff between the sodium void worth reduction and the core nuclear performance degradation especially in burnup reactivity swing.

1. 서론

액체금속로의 기본적 장점인 증식특성을 활용하여 증식비 1.1 이상을 설계 목표로 노심설계를 수행하여 국내개발 액체금속로(전기출력 150 MWe)인 KALIMER (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)의 참조노심으로서 증식특성평형노심 모델안을 제안하였다[1, 2]. 그러나, 이 증식특성노심설계에서는 이전 우라늄금속연료노심설계와 비슷한 설계조건 하에서 노심 구성 및 제원이 설정됨에 따라 노심특성 분석 결과는 노심설계 최적화의 여지와 함께 다소 큰 양의 소듐기화반응도를 보였다. 금속연료노심설계에서는 금속연료의 우수한 고유안전특성을 활용하여 고유안전성 향상을 기할 수 있다고 하나, 양의 소듐기화반응도는 노심설계에서 안전성 확보라는 측면에서 아직까지도 중요하게 취급되어지고 있어 이를 감소시키거나 음의 값을 가지도록 하는 연구개발 노력이 계속적으로 이루어지고 있다.

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로심에서 소듐이 노심 외부로 추출되거나 비등현상 등으로 소듐 밀도가 감소하는 경우, 이에 따른 노심내 핵적 균형 변화에 의한 소듐기화반응도가 감소는 일반적으로 중성자 누출, 감속 (스펙트럼 변화), 중성자 흡수 및 중성자 생산의 항목으로 구분되어진다. 위의 항목 중에서 소듐기화 반응도가를 가장 효율적으로 감소시키는 방안으로는 노심 형태에서 중성자 누출을 증가시키는 방법으로서, 현재까지 대부분의 설계연구가 이를 주 대상으로 하고 있다. 이러한 맥락에서 노심 핵적 성능 측면에서 현재 증식특성평형노심에서 나타난 양의 소듐기화반응도가를 감소시켜 고유안전성 향상을 통한 안전성 확보가 가능한 노심설계방안을 강구하였다.

2. 증식특성노심에 대한 노심높이 감소설계

가. 참조노심설계에서의 소듐기화 반응도가 분포

참조노심설계를 기본으로 하여 소듐기화 반응도가를 감소시킬 수 있는 방안을 강구하고자 소듐기화반응도가를 보다 자세히 분석·평가하였다. 소듐기화반응도가는 9군 군정수를 사용하고, 1/6 대칭노심모델을 대상으로 삼각주(tri-z) 기하학적 모델을 사용한 확산이론계산인 DIF3D[3] 계산으로 구하였다. 한편, 3차원 반응도가 분포는 1차 섭동이론계산코드인 PERT-K[4]를 사용하여 구하였다.

그림 1은 참조노심인 증식특성평형노심의 6/1 대칭노심 구성을 보여준다. 증식특성노심은 내부 블랑켈을 노심 영역 내에 배치하여 증식특성을 향상시키는 반경방향 비균질노심이다. 노심영역은 48 개의 구동핵연료집합체, 18 개의 내부 블랑켈집합체, 48개의 반경방향 블랑켈집합체, 6 개의 제어봉집합체, 6 개의 개스팽창모듈(GEMs), 1 개의 USS (Ultimate Shutdown System)으로 구성되어 있으며, 축방향 블랑켈은 없다. 전체 노심의 크기는 우라늄금속연료노심의 경우와 비슷한 344.3cm이다.

그림 2는 참조노심에서 노심높이 만을 20 cm 감소시킨 노심에서 노심 내부영역에 위치한 집합체별 축방향 소듐기화 반응도가 분포를 보여준다. 참조노심의 경우와 비교하여, 노심 높이 감소에 따라 노심 중심영역에 위치한 집합체 중심 부분에서는 노심 높이 감소에 따라 양의 스펙트럼 효과가 증대하며, 동시에 노심 상부에 설치된 소듐 충전 핵분열개스플레넘(UFGP: Upper Fission Gas Plenum)에서의 음의 축방향 누출효과도 증대함을 볼 수가 있다. 또한, 내부 블랭킷집합체 보다는 구동핵연료집합체에서 소듐충전 UFGP에서의 소듐기화에 의한 반응도가 감소가 더욱 효과적임을 알 수가 있다. 그림 3은 노심내 집합체 위치별로 집합체 내 모든 소듐이 기화하는 경우의 소듐기화반응도가 변화를 보이고 있다. 노심 내부 영역에 위치한 대부분의 집합체들은 스펙트럼 경화에 따른 양의 효과가 중성자 누출에 따른 음의 효과 보다 상대적으로 우세하여 전체적으로는 양의 반응도가를 가지며, 특히 핵연료구동집합체의 위치에 따른 소듐기화반응도가 변화가 매우 큼을 알 수가 있다.

그림들에서 보는 바와 같이, 노심 내부 전환비를 증가시키고자 설치된 내부 블랭킷은 이 영역에서의 소듐

기화반응도가를 증가시키고 있다. 따라서, 고증식비 달성과 소듐기화반응도가 감소라는 서로 상반된 설계 목표를 달성하려면 이들 설계최적화 대상인자들에 대한 기준 설정을 통한 trade-off가 중요함을 알 수 있다.

나. 노심설계기준

본 설계변경연구에서는 노심과 핵연료가 적절한 성능과 안전성을 확보하는 동시에 소듐기화 반응도를 최대로 감소시킬 수 있는 설계변경방안을 탐색하였다. 원칙적으로 여기에서 적용한 설계기준 및 요건은 증식특성평형노심설계[2]에 적용한 것과 동일하다. 이러한 노심설계방안을 강구하는 데 있어서 다음과 같이 원자로 운전, 안전성, 핵연료주기비 등을 고려하여 성능파라메터들을 선정하고, 이들 파라메터에 대한 설계제한치를 설정하여 노심설계변경방안을 탐색하였다 :

- 증식비 : > 1.15
- 연소결손반응도 : < 1500 pcm
- TRU 농축도 : < 30 %
- 첨두선출력 < 329 W/cm (10 kW/ft), 평균치는 230 W/cm(7kW/ft)
- 최대연소도 < 150 MWD/kg
- fissile 장전량 및 주기당 재장전량 : 핵연료주기비의 경제성 평가.

다. 노심 핵적 성능 분석

증식특성평형노심설계를 기본으로 하여 타 분야 설계작업에의 영향을 최소화하면서 소듐기화반응도를 효율적으로 감소시킬 수 있는 방안으로서 노심높이만을 감소하는 방안을 채택하였다. 이 방안은 증식특성노심과 같은 소형노심에서 다소 크게 설정된 노심영역의 높이와 반경을 고려하고, 노심높이 감소에 따른 축방향 중성자 누출 증가로 발생하는 음의 소듐기화반응도 감소효과가 상대적으로 큰 점을 감안하여 채택하였다.

반경방향 비균질노심인 증식특성평형노심모델을 참조노심(H120ABX)모델로 하여, 축방향 블랑켙 및 소듐충전 노심상부 플레넘(UFGP: upper fission gas plenum) 설치방안을 함께 고려하여 노심(특히 핵연료 영역) 높이를 120 cm에서 60 cm (H/D : 0.83 0.42 해당)까지 20 cm씩 감소시키면서 소듐기화반응도가 감소노심모델을 탐색하였다. 설계인자 변경에 따른 노심 핵적 특성 및 소듐기화 반응도가를 포함한 기타 노심성능 파라메터들은 평형주기분석을 통하여 구하였으며, 특히 소듐기화반응도가는 여러 소듐 기화 발생이 가능한 경우에 대하여 비교·분석하였다. 표 1.1에서 1.3은 각 설계방안 적용시 노심 높이 감소에 따른 주요 노심성능 파라메터들의 변화를 수록하고 있다.

표 1.1에서 보는 바와 같이 축방향 블랭킷이 없는 기존의 참조노심에서 단순히 노심 높이 만을 감소시키는 경우에는 축방향 중성자 누출 증가로 소듐기화반응도가가 크게 감소하나, 이에 따른 핵적 성능 저하로 증식비가 감소하고, 연소결손반응도도 크게 증가하였다. 특히, 증식비의 감소량이 커져서 1.15 이상의 증식비 요건을 만족하기 어려우며, 결과적으로 단순한 노심높이 감소만으로는 주어진 성능요건들을 만족하면서 소듐기화반응도가 감소를 달성하기가 어려움을 알 수가 있다. 이와 같은 커다란 증식비 감소를 보완하기 위하여 축방향 블랭킷을 설치하는 경우에는 표 1.2에서 보는 바와 같이 노심 높이 감소에 따른 다소 증식비 감소를 완화시킬 수 있다. 즉, 20 cm 두께의 축방향 블랭킷을 노심 상하부에 설치하면, 약 증식비 0.2 정도 증가하게 되어 노심 높이 60cm 인 매우 편평한 노심(H60AB)의 경우에도 1.15의 증식비를 얻을 수가 있다. 그러나, 반면에 동일 노심 높이를 가지는 노심과 비교하여 연소결손반응도가가 상대적으로 크다.

이러한 두 가지의 서로 상반되는 현상을 보완하기 위하여 핵분열성 물질(fissile)인 구동핵연료 영역 높이만 상대적으로 20 cm 감소시키면서, 이 영역은 소듐충전 UFGP로 대체설치하는 방안을 강구하였다. 표 1.3

에서 보는 바와 같이, 참조노심에서 구동핵연료집합체의 핵연료 영역 높이만 20 cm 감소시킴으로써 증식비를 크게 감소시키지 않으면서 소듐기화반응도가 감소와 기타 성능요건들을 만족하는 노심모델(H100IB120)을 최적 소듐기화반응도가감소노심으로 선정하였다.

선정된 노심모델에 대한 노심성능 파라메터는 표 1.3에서 참조노심모델(H120ABX)의 경우와 비교하고 있다. 이 표에서 소듐기화반응도가는 소듐 기화 발생이 가능한 여러 경우에 대하여 비교·분석하였다. 그림 4에서도 보는 바와 같이 GEM을 제외한 모든 핵연료집합체들과 노심상부 플레넘에서의 소듐 기화를 고려하는 경우에는 증식특성평형노심(H120ABX)과 비교하여 소듐기화반응도가는 1377 pcm에서 1093 pcm으로 감소하며, 이에 GEM에서의 소듐기화를 함께 고려하면 376 pcm에서 202 pcm으로 감소한다. 한편, 그림 5에서도 보는 바와 같이 노심높이 감소에 따라 소듐기화반응도가가 감소하는 반면에 연소결손반응도는 632 pcm에서 1343 pcm으로 상대적으로 크게 증가한다. 연소결손반응도 증가는 제어봉 정지계통 및 제어봉 운용에 대한 부담 증가와 직결하므로, 제어봉 운용과 함께 핵연료관리 최적화를 통하여 크게 증기한 연소결손반응도를 감소시키는 노력이 요구된다. 따라서, 노심 핵적 성능 측면에서 서로 상반된 특성을 가지는 연소결손반응도와 소듐기화반응도가의 두 파라메터에 대한 trade-off이 중요함을 확인하였다. 그림 6은 노심 높이에 따른 증식비 변화를 보여주며, 설정된 노심의 증식비는 1.16으로 고증식비를 보유하고 있다. 참조노심의 경우와 비교하여 첨두핵연료방출연소도는 133.6 MWD/kg으로서 16.7 MWD/kg 증가하였으며, 주기초 fissile 장전량은 1134.7 kg으로서 118.6 kg 감소하였다.

3. 노심구성에 따른 소듐기화반응도가 감소설계

가. 노심구성

소듐기화 반응도가 감소 측면에서 노심구성에 따른 기술적 장·단점과 감소 가능성을 평가하기 위하여 참조노심인 반경방향 비균질노심 (RHC) 설계조건 하에서 반경방향 균질노심 (HOC)와 축방향 비균질노심 (AHC)를 구성하였다. 우선 일반적인 비균질노심 (HOC)은 그림 7에서와 같이 기존 우라늄금속연료노심[5]과 동일하게 18개의 내부 블랑켈집합체를 내부노심 구동핵연료집합체로 대체함으로써 총 66개로 이루어진 2농축도 영역의 구동핵연료집합체 영역을 구성하였다. 구동핵연료집합체 영역 이후의 노심구성은 참조노심인 축방향 비균질노심(RHC)의 경우와 동일하다. 축방향 비균질노심(AHC)은 HOC를 기본으로 내부노심은 20 cm 두께의 내부 블랑켈 영역을 구동핵연료집합체 중앙에 삽입하여 구성하였으며, 외부노심은 축방향 비균질성을 갖지않는 기존 형태의 집합체 36개로 구성하였다. 이와 같이 구성된 노심모델은 참조노심의 경우와 같이 축방향 블랑켈이 없으며, 노심높이는 120 cm이다.

나. 노심 핵적 성능 비교·분석

표 2에서는 반경방향(RHC) 및 축방향(AHC) 비균질노심, 균질노심(HOC) 구성에 따른 주요 노심 성능 파라메터 결과를 보이고 있다. 이 표에서는 또한 앞서 구하여진 최적 소듐기화반응도가 감소노심의 결과도 함께 보이고 있다.

우선 반경방향(RHC) 및 축방향 비균질노심(AHC)을 비교하면, AHC의 주요 장점은 구동핵연료집합체 수의 증가로 인한 TRU농축도 및 첨두선출력의 감소이다. 반면에 동일한 노심 높이의 다른 노심구성과 비교하여, 증식비 감소와 비교적 큰 연소결손반응도 증가를 단점으로 들 수 있다. 증식비는 제한요건을 만족하지 못하며, 일반적인 예상과는 달리 소듐기화반응도가 감소를 달성하지 못하고 있다. 이러한 점에 미루어 현 AHC(D66H120)를 기본으로 노심높이 감소에 의한 소듐기화반응도가감소설계가 달성하기 어려움을 알 수 있다. 상기 비교 분석을 통하여 칼리머 노심과 같이 노심 영역이 매우 제한적인 소형노심 설계에서는 종합적

인 노심 성능 측면에서 RHC가 AHC보다 우수하며, 또한 RHC에서 얻어지는 소듐기화반응도가 감소에 상당하는 AHC 구성이 어렵다는 것을 알 수가 있다.

다음으로 균질노심(HOC)과 앞서 노심 성능이 보다 좋은 것으로 나타난 반경방향 비균질노심 (RHC)을 비교하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 HOC는 구동핵연료집합체 수 증가로 인하여 TRU 농축도와 첨두선출력의 감소, fissile 장전량 감소 및 출력분포 향상 등의 장점이 있는 반면에 증식비 감소와 비교적 큰 연소결손반응도 증가를 주요 단점으로 들 수가 있다. 축방향 블랭킷 설치로 이러한 노심 성능 저하를 보완하여주기는 하나 소듐기화반응도 감소는 이루어지지 못하고 있다. 이러한 낮은 증식비와 큰 연소결손반응도 결과로 AHC의 경우와 같은 경향을 미루어서, 더 이상의 노심높이 감소에 따른 반응도가 감소설계가 어려움을 알 수 있다. HOC에서의 소듐기화반응도가는 RHC의 것과 비슷하나, 종합적인 노심성능측면에서는 RHC가 보다 우수하다. 또한, 칼리머 노심과 같은 소형노심에서는 주어진 성능요건을 만족하는 HOC설계가 어려움을 알 수 있다.

상기의 비교·분석 결과에 의하면, 칼리머 참조노심과 같은 소형노심에서는 반경방향 비균질노심(RHC)이 노심 성능이 가장 우수하면서 소듐기화반응도가를 최소화할 수 있는 노심구성임을 알 수 있다. 앞의 증식특성노심 설계연구 결과와 종합하면, 구동핵연료 영역(fissile) 높이가 100 cm인 반경방향 비균질노심(RHC)이 칼리머 참조노심설계 조건하에서 노심성능요건을 만족하면서 소듐기화반응도가 최소화할 수 있는 최적노심임을 알 수 있다.

본 설계 최적화를 통하여 구동핵연료영역 길이만 20 cm 감소시키는 노심설계안을 최적 소듐기화반응도가 감소노심으로 설정하였다. 그러나, 이러한 설계변경안은 단지 노심 핵적 성능측면에서만 최적화 방안이 탐색된 결과로, 이러한 노심설계변경안을 적용할 경우 증식특성을 보유한 칼리머 원자로에 대한 노심설계, 원자로시스템 설계 및 이의 운전 등에 미치는 영향 등에 대하여 설계 종합 측면에서의 평가가 요구된다.

4. 결론

고증식비를 가지는 칼리머 참조노심설계 조건하에서 축방향 블랭킷과 소듐충전 노심상부 핵분열개스 플레넘(UFGP) 설치와 함께 노심 높이만을 감소시키는 설계방안을 평가하여 소듐기화반응도가를 최대로 감소시킬 수 있는 노심설계방안을 탐색하였다. 한편, 노심구성에 따른 소듐기화반응도가 감소 성능도 비교·평가하였다. 평형핵연료주기 분석을 통한 탐색 결과, 참조노심에서 핵분열성 물질(fissile)인 구동핵연료집합체의 핵연료 영역 높이만 20 cm 감소시키고 이 영역은 소듐충전 UFGP로 대체설치한 노심을 최적 소듐기화반응도가감소노심으로 선정하였다. 소듐기화반응도 감소를 위한 설계 변경으로 노심의 증식비는 1.18에서 1.16으로 감소하였으며, 모든 핵연료집합체들과 노심 UFGP에서의 소듐 기화를 고려하는 경우에 참조노심과 비교하여 소듐기화반응도가는 1377 pcm에서 1093 pcm으로 감소하였다. 반면에 연소결손반응도는 632 pcm에서 1343 pcm으로 상대적으로 크게 증가하여 칼리머 참조노심설계 조건하에서는 노심 핵적 성능측면에서의 두 파라메터에 대한 trade-off이 중요함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] **김상지 외** 2**인**, "Development of 150 MWe LMR Conceptual Nuclear Design with Breeding Characteristics," '99 **춘계학술발표회 논문집**, **한국원자력학회** (1999).

[2] Y. I. Kim, "KALIMER Breeder Equilibrium Core Conceptual Design and Analysis," LMR/CD120-ER-01 Rev. 0/99, KALIMER Internal Document, KAERI (1999).

[3] K. L. Derstine, "DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems," ANL-82-64, ANL (April 1984).

[4] **김택겸 외** 2**인**, "**육각형 노심용 섭동이론코드 개발**," '98 **추계학술발표회 논문집**, **한국원자력학회** (1988).

[5] Y. I. Kim, "Conceptual Design of KALIMER Uranium Metallic-Fueled Core," KAERI/TR-1279/99, KAERI (1999).

표 1. 노심 높이 감소에 따른 노심 핵적 성능 변화

표 1.1 축방향 블랭킷 미설치의 경우

Case	Reference H120ABX	H100ABX	H80ABX	H60ABX
Geometry Parameters				
Core Height (H) (cm)	120	100	80	60
Axial Blanket Thickness (cm)	0	0	0	0
Upper Fission Gas Plenum Length (cm) (Na filled)	20.0	20.0	20.0	20.0
Equivalent Core Diameter (D) (cm)	144.5	144.5	144.5	144.5
H/D Ratio	0.83	0.69	0.55	042
Performance Parameters				
TRU Enrichment (wt. %)	26.30	29.08	34.44	45.16
Breeding Ratio	1.18	1.11	1.01	0.88
Burnup Reactivity Swing (pcm)	632	1365	2522	4524
Peak fuel Discharge Burnup (MWD/kg)	116.9	134.9	162.1	207.9
Fissile Inventory (kg)				
BOEC	1253.3	1103.7	949.7	794.1
EOEC	1288.3	1125.8	955.3	776.4
Peak Linear Power (W/cm)	286.5	322.4	387.8	497.2
Na Void Worth (pcm)				
Case 1[1] : BOEC	1773	1472	1107	652
EOEC	1948	1676	1340	916
Case 2[2] : BOEC	1222	747	25	- 1044
EOEC	1377	927	200	- 923

1) Case 1 : (DF + IB + RB) voiding withour UFGP voiding, fissile height voiding only

2) Case 2 : (DF + IB + RB) voiding and UFGP voiding

표 1.2 축방향 블랭킷 설치의 경우

Case	Reference H120ABX	H100ABX	H80ABX	H60ABX
Geometry Parameters				
Core Height (H) (cm)	120	100	80	60
Axial Blanket Thickness (cm)	20.0	20.0	20.0	20.0
Upper Fission Gas Plenum Length (cm) (Na filled)	0.0	0.0	0.0	0.0
Equivalent Core Diameter (D) (cm)	144.5	144.5	144.5	144.5
H/D Ratio	0.83	0.69	0.55	042
Performance Parameters				
TRU Enrichment (wt. %)	26.30	26.89	30.21	36.64
Breeding Ratio	1.18	1.28	1.23	1.15
Burnup Reactivity Swing (pcm)	632	1181	2174	3714
Peak fuel Discharge Burnup (MWD/kg)	116.9	131.6	155.3	193.7
Fissile Inventory (kg)				
BOEC	1253.3	1192.3	1061.8	935.8
EOEC	1288.3	1245.1	1104.5	964.3
Peak Linear Power (W/cm)	286.5	316.6	376.4	472.9
Na Void Worth (pcm)				
Case 1[1] : BOEC	1773	1472	1087	625
EOEC	1948	1724	1400	1009
Case 2[2] : BOEC	1222	1313	849	249
EOEC	1377	1565	1163	637

1) Case 1 : (DF + IB + RB) voiding except for reference core case, fissile height voiding only

2) Case 2 : (DF + IB + AB + RB) voiding

표 1.3 노심높이 차등의 경우

Case	Reference H120ABX	H100ABX	H80ABX	H60ABX
Geometry Parameters				
Core Height (H) (cm)				
Driver Fuel (H1)	120	120	100	80
Internal Blanket (H2)	120	140	120	100
H1/H2	1.00	0.86	0.83	0.80
Axial Blanket Thickness (cm)	0.0	0.0	0.0	0.0
Upper Fission Gas Plenum Length[1] (cm) (Na filled)	20.0	20.0	20.0	20.0
Equivalent Core Diameter (D) (cm)	144.5	144.5	144.5	144.5
H/D Ratio	0.83	0.87	0.73	059
Performance Parameters				
TRU Enrichment (wt. %)	26.30	25.84	28.29	32.83
Breeding Ratio	1.18	1.22	1.16	1.07
Burnup Reactivity Swing (pcm)	632	620	1343	2495
Peak fuel Discharge Burnup (MWD/kg)	116.9	116.1	133.6	160.4
Fissile Inventory (kg)				
BOEC	1253.3	1278.4	1134.7	931.3
EOEC	1288.3	1320.4	1165.3	1006.7
Peak Linear Power (W/cm)	286.5	276.8	327.0	383.5
Na Void Worth (pcm)				
Case 1[3] : BOEC	1773	1775	1461	1072
EOEC	1948	1956	1674	1320
Case 2[4] : BOEC	1222	1451	994	376
EOEC	1377	1626	1093	593
Case 3[5] : BOEC		1786	1477	1098
EOEC		1968	1692	1349

1) Na filled UFGP locates only above driver fuel assembly
2) An average value is considered for height (H)
3) Case 1 : (DF + IB + RB) voiding without UFGP voiding
4) Case 2 : (DF + IB + RB) voiding and UFGP voiding
5) Case 3 : (DF + IB + RB) voiding without UFGP voiding, fissile height voiding only

표 2. 노심구성에 따른 핵적 성능 비교

Case	RHC		HOC		AHC
	Reference (D48)H120	(D48)H100IB120	(D66)H120	(D66)H100	(D66)H120
Core Configuration	Radially Hete.	Radially Hete.	Homo.	Homo.	Axially Hete.
Geometry Parameters					
Core Height (H) (cm)	120/120	120/100	120/120	100/100	120/100
AB/IB Thickness (cm)	0/0	0/0	0/0	20/0	0/20
Upper Fission Gas Plenum Length[1] (cm) (Na filled)	20	20	20	0	20
No. of Assembly inside R. Blanket	73	73	73	73	73
Equivalent Core Diameter (D) (cm)	144.5	144.5	144.5	144.5	144.5
H/D Ratio	0.83	0.73	0.83	0.69	0.83
Performance Parameters					
Thermal Power (MWt)	382.2	382.2	382.2	382.2	382.2
TRU Enrichment (wt. %)	26.30	28.29			
IC/OC			15.10/21.52	15.73/22.47	17.70/25.29
Breeding Ratio	1.18	1.16	1.11	1.21	1.10
Burnup Reactivity Swing (pcm)	632	1343	2068	2732	1509
Fissile Inventory (kg)					
BOEC	1253.3	1134.7	1161.1	1119.1	1221.1
EOEC	1288.3	1165.3	1183.3	1159.3	1242.1
Peak Linear Power (W/cm)	286.5	320.0	235.0	267.7	234.9
Na Void Worth (pcm)					
Case 1[3] : BOEC	1773	1461	1787	1386	1098
EOEC	1948	1674	2028	1713	1318
Case 2[4] : BOEC	1222	994	1207	1181	329
EOEC	1377	1193	1423	1508	535
Case 3[5] : BOEC	791	495	629	1036	1098
EOEC	1043	779	947	1266	1318
Case 4[5] : BOEC	142	-68	241	388	329
EOEC	376	202	540	586	535

1) Case 1 : (DF + IB/AB + RB) voiding wihout UFGP voiding
2) Case 2 : (DF + IB/AB + RB) voiding and UFGP voiding
3) Case 3 : (DF + IB/AB + RB + GEM) voiding wihout UFGP voiding
4) Case 4 : (DF + IB/AB + RB + GEM) voiding and UFGP voiding

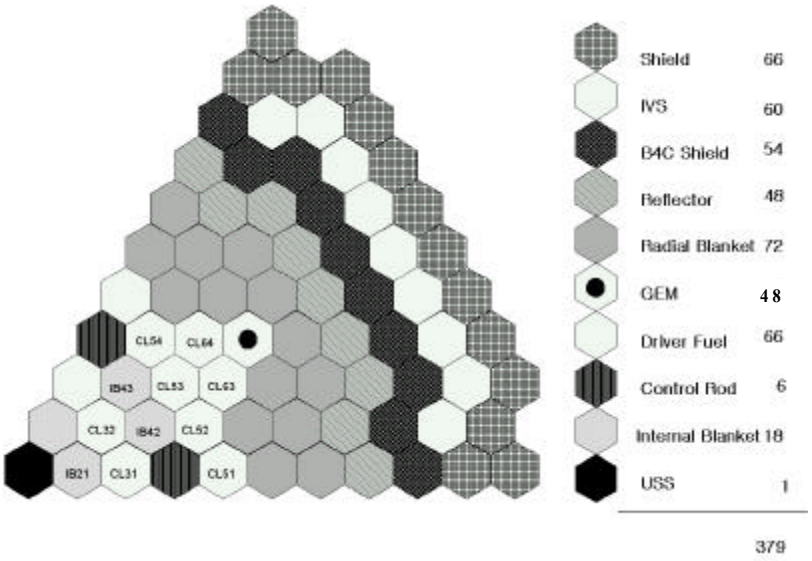

그림 1. 증식특성노심 구성 (1/6 대칭모델)

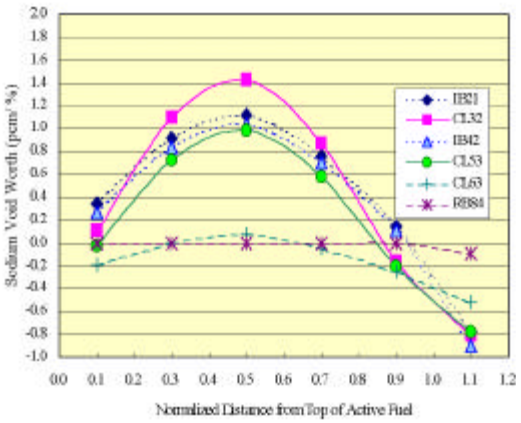

그림 2. 단위 소듐기화율에 따른 소듐기화반응도가 분포(H100ABX 노심)

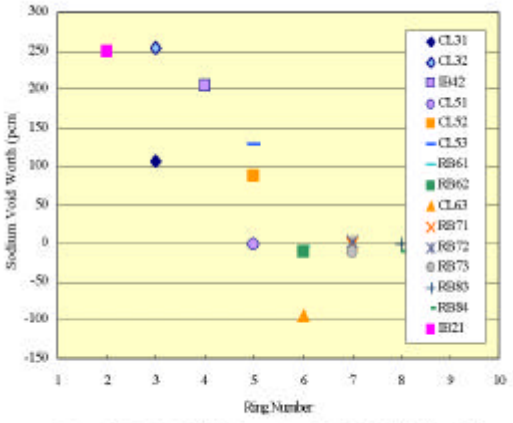

그림 3. 전 소듐기화시 집합체별 소듐기화반응도가 (H100ABX 노심)

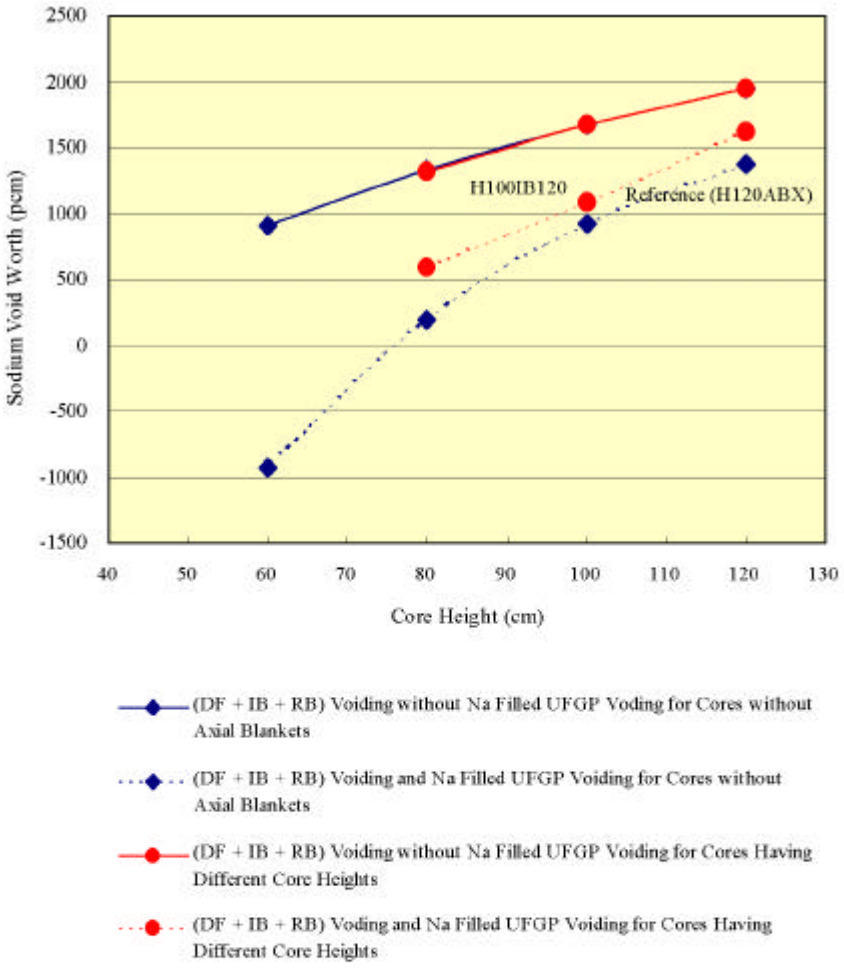

그림 4. 소듐충전 UFGP를 포함한 구동핵연료, 블랭킷집합체에서의 소듐 기화시 노심 높이에 따른 소듐기화반응도가 변화

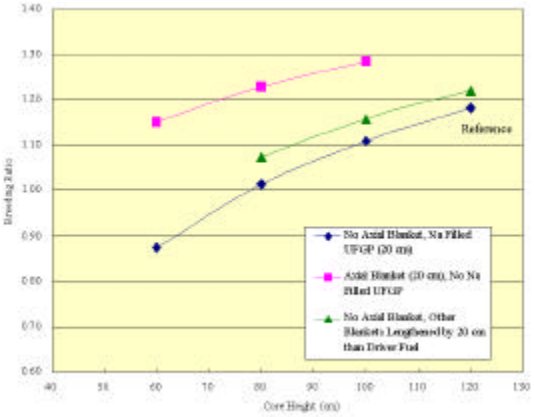

그림 5. 노심높이에 따른 연소결손반응도 변화

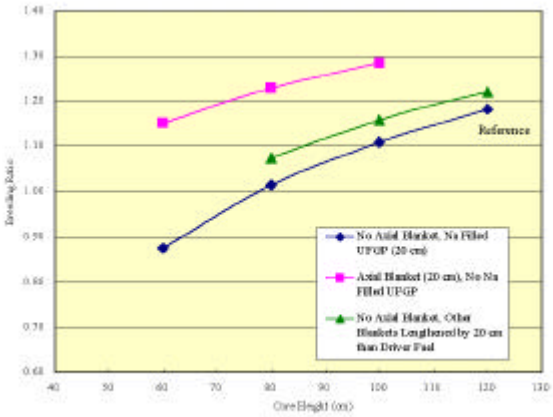

그림 6. 노심높이에 따른 증식비 변화

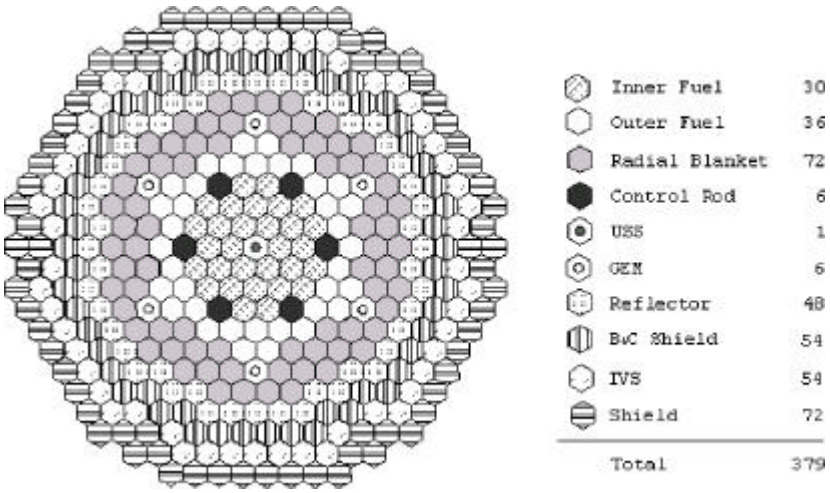

그림 7. 균질노심 (HOC)