2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER Breakeven 평형노심 열수력 설계 및 특성 분석

Thermal Hydraulic Conceptual Design Characteristics of KALIMER Breakeven Core

김영균, 김영인, 김영일
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

KALIMER breakeven 평형노심의 정상상태 열수력 설계 특성을 분석하고, 그 결과를 증식특성 노심의 열수력 설계 특성과 비교하였다. KALIMER는 전기출력 150 MWe, 열출력 392 MWth인 소형노심으로서 금속핵연료를 사용하는 국내개발 액체금속로이다. 현재까지 설계된 KALIMER 노심은 U금속연료 노심, 증식특성 노심 및 breakeven 노심 등인데 이들은 모두 핵적 특성이 우수하게 나타났으며, 노심 안전성 확보 측면에서 매우 양호함을 보이고 있다. 열수력 특성 분석 결과 반경방향 비균질 노심인 breakeven 노심의 경우 같은 반경방향 비균질 노심인 증식특성 평형노심보다는 평탄한 출력분포를 보여, 노심 중앙부에서의 유량이 적어지고 그에 따라 노심에서의 압력손실이 그만큼 감소하였으나, 균질노심인 U금속연료 노심에 비해서는 노심 중앙부에서 매우 많은 유량이 필요하게 되어 노심에서의 압력손실이 증가하는 것으로 나타났다.

Abstract

A steady state thermal hydraulic analysis of KALIMER breakeven equilibrium core was performed. KALIMER breakeven core is a 150 MWe rated (392 MWth) heterogeneous core fueled with U-Pu-Zr ternary alloy fuel. The three cores were designed for the KALIMER; U metal fueled homogeneous core, breeder core and breakeven core. They all have good neutronic characteristics to give better safety margin in the core design. The comparison of thermal-hydraulic analyses of the designed cores shows that they have similar thermal hydraulic characteristics, except that the breakeven core needs less flow than the breeder core in the core center region, then gives less pressure loss, but more flow than the U metal fueled homogeneous core in the core center region, then gives more press loss.

1. 서론

액체금속로 설계개념 연구과제에서 원자력 중장기과제로 수행한 국내개발 액체금속로 KALIMER (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 설계개념 타당성 연구 결과[1]에 의해, KALIMER의 노심 규모는 전기출력 150MWe, 열출력 392MWth로 설정되었다. 또한, 시동에 필요한 초기노심 핵연료로는 20%농축도 이하의 U-Zr의 이원합금 핵연료로 설정되었으며[2], 그에 따른 노심설계 분석작업 결과는 금속연료 노심 설계분석 보고서[3]에 상세하게 기술되어 있다. KALIMER의 기본 설계개념으로 선정된 금속핵연료 노심은 과도상태시 양호한 음의 반응도 특성을 가지고 있어 고유안전성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 고연소도에 따른 경제성 향상 및 건식재처리를 통한 핵확산저항성 등의 이점을 가지고 있는 것으로 나타났다. 후에, 증식특성을 고려한 노심 개발과 breakeven 설계노심을 개발하도록 하는 변경된 요구가 있어, 초기노심의 핵연료로 U-Pu-Zr 삼원합금 핵연료를 사용하는 비균질 노심인 증식특성 노심과 breakeven 노심에 대한 노심 구성과 핵열수력 특성 분석작업이 수행되었다. 각각의 설계 노심에 대한 세부사항 및 분석작업 결과는 설계분석 보고서[3,4,5]에 자세히 기술되어 있다.

본 논문에서는 비균질 breakeven 평형노심의 노심 열수력설계 특성을 분석하였으며, 그 결과를 기 수행한 증식특성 설계노심의 결과와 비교하였다. 이러한 계산을 위하여는 KALIMER 노심설계 기술개발의 개념설계 초기 단계에서 사용하고 있는 냉각재 유량분배 계산 모듈 ORFCE-F/T와 그에 따른 노심 집합체내 온도분포 계산 코드 SLTHEN을 사용하였다. SLTHEN은 ENERGY 모델을 이용하여 에너지 방정식으로 집합체의 온도분포를 계산하는 코드이다[6].

2. Breakeven 노심 개념설계

2.1 평형노심 개념설계 최적화

노심설계 목표 및 요건 설정

증식특성을 보유하는 다양한 노심 개념설계를 개발하고자 하는 요구에 의하여, 재순환 평형핵연료주기에서 fissile 핵연료 물질의 외부 공급이 필요 없이 자급자족할 수 있는 기능의 breakeven노심 개념설계가 수행되었다. 먼저 수행된 증식비 1.18의 증식특성노심 개념설계[4]에서 적용된 설계기준이 동일하게 적용되었으며, 증식비는 현재의 건식재처리를 사용하는 후행핵연료주기에서의 기술 수준[7]을 적용하여 자급자족할 수 있도록 1.05 정도가 목표로 설정되었다. 특히, 본 노심설계 수행을 통하여 그 동안의 노심 개념설계 결과에 대한 검토자문 및 타 설계 분야와의 연계작업에서 드러난 개선보완 사항들을 고려함으로써, 기술 개선에 따른 노심 개념설계의 최적화 범위 확대를 통하여 궁극적으로 노심 개념설계 최적화를 달성하도록 하였다.

핵연료주기 모델 설정

평형핵연료주기 분석을 위하여 노심에서 방출된 핵연료집합체는 노내 핵연료저장조에서 운전주기인 18 개월 동안 냉각한 후 원자로 밖으로 방출하여, 각각 8개월의 건식재처리, 8개월의 핵연료제조, 2개월의 재장전에 앞선 저장 등을 고려하여 노심 방출 후 재장전까지의 기간을 총 36 개월로 가정하였다.

순환핵연료주기에서의 핵연료물질 수지분석에서는 현재의 금속핵연료 건식재처리 기술 수준을 적용하여 재처리 과정에서 TRU의 99.9 %는 회수되고, 나머지 0.1 %는 폐기물 분류로 이동한다고 가정하였다. 또한, 희토류 핵분열생성물의 경우에는, 5 %만 재순환되며 나머지 모든 핵분열생성물은 폐기물 분류로 이동한다고 가정하였다[7].

2.2 Breakeven 노심 구성 및 핵설계 특성

노심구성 및 설계제원 설정

반경방향 비균질 노심형태의 증식특성노심 구성을 기본으로 하여 설계목표 및 설계기준을 만족하는 최적의 노심구성 및 설계제원을 설정하였다. 구동핵연료집합체 장전량 수를 54 ~ 66 개로 하는 구성 가능 노심을 대상으로 하여, 목표 증식비를 달성하도록 내부 및 반경방향 블랑킷집합체의 체적비를 고려하고 유효노심 높이는 110 cm ~ 80 cm 범위 내에서 소듐기화반응도가 감소를 위하여 노심 높이 대 직경비 (H/D) 를 최소화할 수 있도록 하는 최적 노심구성 및 설계제원을 탐색하였다. 이러한 설계변경연구에서는 증식특성 노심에서의 노심 및 연료계통의 설계제원을 동일하게 적용하고 노심구성 변경은 되도록 유효 노심영역 (반경방향 블랑킷영역 이내) 에서만 이루어지도록 하여 고증식특성 노심에서 breakeven 노심으로의 기능 변경으로 인한 설계변경 영향을 최소화하도록 하였다.

핵특성 분석 및 노심 설정

탐색 결과로 총 29 개의 노심 구성모델을 대상으로 하여 평형핵연료주기 분석 결과에 기초한 노심 핵특성 분석에 의해 D54EH100 노심모델을 최적 노심구성으로 설정하였다[5]. 유효 노심높이는 100cm로서 증식특성 노심보다 20cm 감소하였으며, 평형핵연료주기 분석 결과, 공급핵연료의 TRU 농축도는 30.0%, 증식비는 1.05로 구하여졌다. 설정된 breakeven 평형노심 배치도는 그림 1과 같으며, 이 노심에 대한 주요 운전조건 및 설계사양은 표 1에 나타낸 바와 같다. 주기초 fissile 장전량은 1123.4 kg이고 증식특성 노심에 비하여 농축도가 증가되었으며 구동핵연료집합체 장전 개수 가 48개에서 54개로 증가되었다. 노심을 구성하고 있는 총 집합체 수는 367 개로 증식특성 노심보다 12개가 작다. 최대 핵연료 방출 연소도는 120.7 MWD/kg이며, 18 개월의 평형운전주기 동안에 얻어지는 fissile Pu양은 13.9kg으로서, 증식특성 노심의 경우와 비교하여 23.4kg이 감소하였다[5].

노심 최대 속중성자 fluence는 반경방향 블랭킷에서 3.07 x 10^{23} n/cm^2로서 설계기준 (< 4.0 x 10^{23} n/cm^2)을 만족한다. 노심영역별 출력분율을 보면, 운전주기 동안에 연소 증가에 따라 내부/반경방향 블랭킷 영역의 출력분율이 증가한다. 특히, 비균질노심 구성형태에서 내부 블랭킷 영역의 경우, 주기 초 9.9%에서 주기 말 14.2%로 크게 증가함을 보이고 있다. 구동핵연료영역에서의 출력첨두인자는 주기초 1.427에서 1.448로 다소 증가하며, 노심출력분포는 연소 증가에 따라 노심 외부로 이동함을 보이고 있다. 이에 따라 최대 선출력밀도는 각각 주기초 구동핵연료에서 287.1W/cm, 주기말 반경방향 블랭킷에서 284.9W/cm으로 이동하며, 이 최대값들은 설계기준 (< 328 W/cm)을 만족한다.

3. 노심 열수력 설계 및 특성분석 방법론

3.1 노심 열수력 설계 방법론

나트륨을 냉각재로 사용하고 있는 액체금속로 노심의 핵연료 집합체는 일반적으로 삼각형 격자 형태로 장전되어 있는 핵연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 형태로 구성되어 있다. 따라서, 덕트와 덕트 간에 열교환은 발생하지만 유량은 교환되지 않는 폐쇄회로를 형성하게 된다. 그러므로, 이들 각각의 집합체에 흐르는 냉각재 유량을 적절하게 분배하고, 그에 따른 온도분포를 적절하게 유지시키는 것이 핵연료 집합체에서 생성되는 열량을 효과적으로 추출할 수 있는 열수력 설계의 기본 목표가 된다. 각 집합체에 필요한 유량은, 정상상태는 물론 과도상태에서도 핵연료, 피복관 및 구조재의 건전성 확보, 냉각재 비등방지 조건 등을 고려하여 분배되어야 한다. 전반적인 액체금속로 노심 열수력 개념 설계 및 분석 작업은 노심구성과 그에 따른 핵설계 데이터를 연계자료로 하여 유량분배, 온도분포계산, 정상상태 열수력 해석, 과도상태 열수력 해석, 안전해석 연계자료 제공의 흐름에 따라서 진행하게 된다.

개념설계 단계에서의 열수력 설계 및 특성 분석은 먼저 노심 열수력 설계목표에 따라 노심내 전체유량을 계산한 후, 각 집합체별 열출력과 그 집합체에서의 핵연료봉 최고 선출력 밀도에 따라 집합체별 필요 유량을 계산한 후 이들을 몇 개의 유량그룹으로 나눈다. 다음으로 이렇게 분배된 유량을 바탕으로 각 집합체의 최고온도 연료봉에 대한 냉각재 온도, 피복관 중심온도, 핵연료 중심온도 등을 계산하는 방식으로 수행된다. 이 때, 각 집합체에서의 핵연료 피복관 최고 중심온도가 같은 값을 같도록 유량을 재조절하며, 이 유량에 의한 노심내 압력손실값을 비롯한 모든 계산값들이 설계조건을 만족하는지를 확인하고, 그에 따른 집합체별 필요 유량을 결정하여 유량분배 장치인 오리피스를 구성하게 된다. 이러한 일련의 해석 절차는 노심 핵설계 및 안전성 분석과 연계되어 반복 수행하며, 최종적으로 핵열수력 안전성 분석을 통하여 검증을 받게 된다.

3.2 노심 유량영역 구분

각각의 집합체에 분배될 유량은 집합체 하단의 노심 입구 플레넘 부분에 설치된 오리피스 장치에 의하여 조절된다. 이러한 장치들은 일단 설계·제작되어 장전되면 운전기간 중에는 유량을 변화시켜 가면서 조절할 수 없다. 또한, 기계적으로 한계가 있어 미소한 유량을 정밀하게 조절할 수도 없다. 따라서, 각 집합체에 분배되는 유량은 핵연료가 노내 장전기간 중에 생성하는 발열량의 최대값을 고려한 유량이 되어야 한다. 유량분배는 경제성과 효율성을 고려하여 각 집합체의 필요 유량을 몇 개의 그룹으로 나누고 그 유량을 각 집합체에 분배하는 방법을 이용한다. 이렇게 분배된 유량에 따라서 노심내의 온도분포를 계산하게 된다.

집합체별로 필요한 유량을 분배하고 이들을 몇 개의 유량그룹으로 나누기 위해서는, 핵계산 결과로부터 구한 집합체의 출력 및 집합체별 최대 선출력 밀도에 따라 각 집합체에 필요한 유량을 계산하고, 이를 기본으로 하여 약 10% 정도 범위 내외의 유량을 갖는 집합체들을 하나의 그룹으로 묶는 방법을 사용한다. 그러나, 집합체의 종류가 달라지면 비록 유량이 같다고 할지라도 다른 그룹으로 분리한다. 이 때, 제어봉과 USS(Ultimate Shutdown System) 에서는 발생하는 출력이 없지만 thermal striping을 고려하여 최소 필요 유량을 공급해 주어야 한다. 반사체, 차폐체, 노내저장 집합체 등의 경우에는 출력이 매우 작아 필요한 유량도 그만큼 작고 전 주기 동안의 출력변화도 매우 작으므로 유량분배에 커다란 영향을 미치지 않게 되어, 일

반적으로 개념설계 초기 단계에서는 이들 집합체에 대한 유량분배 계산을 수행하지 않으며, 이들 집합체에 대하여는 추후에 상세한 계산작업을 수행할 때 감마가열을 고려하여 유량분배를 실시하게 된다. 한편, 현재의 개념설계 단계에서는 집합체간의 갭과 제어봉, 반경방향 차폐체 등의 저발열부에서는, 실제적인 계산을 수행하지 않으며, 일반적으로 총유량의 1.5% 정도를 할당하게 된다[8].

3.3 노심내 집합체별 온도분포 계산

위와 같이 하여 노심내 집합체별로 분배된 유량에 따라 집합체별 피복관 중심 최고 온도를 계산하여, 그 온도가 설계제한값 내에 있는지 확인하는 반복 계산을 수행한 후 그룹별로 필요 유량이 결정된다. 핵연료 피복관이 손상될 확률이 모든 집합체에서 일정하도록 해주는 것이 중요하기 때문에, 일반적으로 각 집합체에서 최고 선출력을 갖는 연료봉의 피복관 중심온도를 같게 하는 제한조건을 적용한다. 그러므로, 계산된 유량에 따라서 집합체별 냉각재 온도분포, 핵연료 피복관 중심 온도 및 최고 thermal striping 온도 (임의의 집합체에서의 냉각재 출구 온도가 주변 6개 집합체의 냉각재 출구 온도와 갖는 차이값 중에서 최고인 값) 등을 구하여 제한조건을 만족하는지 확인하게 된다. 각 부분에서의 온도를 계산할 때에는 각 단계마다 실제로 계산된 정규값에 설계 및 계산에 의한 불확정성 인자들인 HCF(hot channel factor)를 고려하여 2σ값을 구하게 된다. 이렇게 불확정성 인자들을 고려하여 계산된 온도는 최종적으로 확인하게 될 상세 부수로 해석 계산 결과 보다 매우 보수적인 값을 갖게 되는 것이다. 개념설계 단계의 계산에서 일반적으로 사용하는 설계 제한값으로는 핵연료 피복관 중심온도를 630℃, 집합체 출구온도를 593℃, thermal striping 온도를 205℃, 핵연료 표면온도를 704℃, 그리고 연료봉 중심온도를 927℃로 사용하고 있다[5,8].

4. Breakeven 평형노심 열수력 설계 특성 및 비교·분석

4.1 노심 유량영역 구분 결과

그림 1에는 breakeven 설계노심의 배치도를, 표 1에는 주요 운전조건 및 설계사양을, 그림 3과 표3에는 증식특성 노심의 배치도와 설계사양을 각각 나타내었다. 노심의 설계용량은 모두 전기출력 150MWe, 열출력 392MWth이며, U-Pu-Zr 삼원합금 핵연료를 사용한 비균질 노심이다.

노심입구의 냉각재 온도는 386.2℃, 노심출구의 냉각재 온도는 530℃로서 노심에서의 온도 증가는 143.8℃이다. 증식특성 노심 구성을 위한 노심 설계의 최적화 과정에서 핵연료설계 및 핵계산 작업과의 설계연계 협의에 의해 결정된 핵연료봉의 외경 7.4 mm를 유지하였으며, 핵연료 노심의 공급핵연료 농축도는 28%에서 30%로 약간 증가되었다. 또한, 노심 중앙 부분에서의 평균 선출력과 최대 선출력 값이 낮아지게 되어, 전체적으로 노심의 출력이 반경방향으로 평탄화 됨에 따라서 중앙부분에서 출력이 상대적으로 낮아졌다.

각각의 설계 노심에 대한 유량분배 결과는 표 2, 그림 2 및 표 4, 그림 4에 각각 나타내었다. 표에서 보듯이 breakeven 노심의 유량그룹이 핵연료집합체 부분에 3개, 내부 블랑켈집합체 부분에 2개, 반경방향 블랑켈 부분에 4개 등 총 9개의 유량그룹으로 나뉘어, 증식특성 노심에서의 3개, 2개, 7개의 유량그룹에 비하여, 반경방향 블랑켈집합체에서 절반 가량으로 줄어들었다. 그리고, 노심 중앙부분에서의 출력이 낮아짐에 따라

집합체 유량의 최고값은 39.8kg/s에서 35.0kg/s로 매우 낮아졌으며, 이에 따라 최고 유량을 갖는 집합체의 평균 유속은 6.42m/s에서 5.65m/s로 낮아졌고, bundle 내 압력강하는 0.42MPa에서 0.30MPa로 매우 감소하는 등 열수력 특성은 향상되었음을 알 수 있다.

4.2 노심내 집합체별 온도분포 계산결과

유량그룹별 최고온도 계산결과를 표 2와 표 4에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 피복관 중심에서의 2σ 온도가 제한값인 630℃ 이하이지만 현재로는 온도의 여유가 거의 없는 수준이기 때문에, 추후 설계 최적화 작업을 수행할 경우에는 이 온도의 여유가 높아지도록 하는 방향으로 작업을 수행하여야 할 것이다. 표에서 나타낸 계산값들은 유량영역 중에서 가장 높은 출력을 갖는 연료봉의 2σ값에 해당하는 온도이다. 그림 2와 그림 4는 노심내 집합체별 최종 유량분배 및 그에 따른 온도분포 계산결과를 집합체의 위치, 집합체의 종류, 유량그룹, 집합체 출력, 출구온도 값 등을 1/6노심에 대하여 나타낸 것이다.

4.3 설계특성 및 비교·분석

액체금속로 KALIMER breakeven 설계노심에 대한 정상상태 열수력 설계 특성과 증식특성 평형노심의 열수력 설계특성을 비교하면 다음과 같다. 두 노심 모두 열출력 392MWth, 전기출력 150MWe이며, 비균질 노심으로서 U-Pu-Zr 삼원합금 핵연료를 사용하고 있다. 두 노심 모두 같은 조건에서 유량분배를 수행하였으며, breakeven 노심은 핵연료집합체 부분에 3개, 내부 블랭킷집합체 부분에 2개, 반경방향 블랑켈집합체 부분에 4개 등 총 9개의 유량그룹으로 나뉘어, 증식특성 노심에서의 3개, 2개, 7개의 유량그룹에 비하여, 반경방향 블랑켈집합체에서 절반 가량으로 줄어들어, 었다. 이 부분에서의 출력평탄화가 많이 이루어진 것을 알 수 있다. 또한, 피복관 중심 온도를 제한치인 630℃이하로 일정하게 유지할 수 있었다. 이것은 핵연료 및 노심 핵계산 작업과의 연계를 통해서 노심 설계를 최적화시키는 작업을 지속적으로 수행해 온 결과이다. 특히, 노심구성의 최적화 작업을 위하여 많은 설계연계 작업이 수행되었으며, 이에 대한 상세한 기술은 각각의 설계노심에 대한 설계분석 보고서[3,4,5]에 자세히 기술되어 있다.

열수력 특성분석 결과 반경방향 비균질 노심인 breakeven 노심이 증식특성 노심에 비하여 노심 중앙에서의 출력이 낮아짐에 따라 집합체 유량의 최고값은 39.8kg/s에서 35.0kg/s로 매우 낮아졌으며, 그에 따라 최고 유량을 갖는 집합체의 평균 유속과 bundle내 압력강하가 매우 감소한 것 외에는 큰 차이를 보이지 않아 열수력 특성이 향상되었음을 알 수 있다.

5. 결론 및 연구방향

열출력 392MWth, 전기출력 150MWe인 U-Pu-10%Zr 삼원합금 핵연료 사용 소형노심인 액체금속로 KALIMER breakeven 평형노심에 대하여 정상상태 열수력 설계 특성을 분석하고, 그 결과를 증식특성 평형노심의 열수력 설계 특성과 비교하였다. 두 개의 설계 노심 모두 핵적 특성은 우수하게 나타나, 노심안전성 확보 측면에서 매우 양호함을 보였다. 모두 반경방향 비균질 노심인 두 노심의 열수력 특성분석 결과

breakeven 평형노심이 증식특성 평형노심에 비해 노심 중앙부에서 필요로 하는 유량이 적어 노심에서의 압력손실이 그만큼 감소한 것 외에는 큰 차이를 보이지 않았다.

본 논문에서 기술한 breakeven 설계 노심을 기초로 하여 타분야와의 설계연계와 검토작업을 통하여 추후 KALIMER의 노심의 기본설계가 수행될 것이다. 이에 따른 상세한 노심 부수로 해석 작업은 노심 열수력 설계 및 특성 분석을 위해 필수적인 작업이 될 것이다. 본 논문에서 계산 및 비교·분석을 위해서 사용된 코드는, 현재 KALIMER 노심설계 기술개발의 개념설계 초기 단계에서 사용하고 있는 냉각재 유량분배 계산 모듈 ORFCE-F/T와 그에 따른 노심 집합체내 온도분포 계산 코드 SLTHEN[6]이다. 개념설계 초기 단계에서 계산된 집합체의 유량분포나 온도분포는, 현재 개발하고 있는 상세 부수로 해석코드인 MATRA-LMR[9]을 사용하여 더욱 자세한 계산을 수행할 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 박창규 외, “액체금속로 설계개념 연구”, KAERI/RR-1719/96 (1996).

[2] 박창규 외, KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97 (1997).

[3] 김영인 외, KALIMER Uranium Metallic Fueled Equilibirum Core Design and Analysis, LMR/CD100-ER-01 Rev. 0/98, Internal Document, KAERI (1998).

[4] 김영인 외, KALIMER Breeder Equilibrium Core Conceptual Design and Analysis, LMR/CD120-ER-01 Rev. 0/99, Internal Document, KAERI (1999).

[5] 김영인 외, “Nuclear and Thermal-hydraulic Characteristics for KALIMER Breakeven Equilibrium Core," LMR/CD112-ER-01 Rev. 0/2000, Internal Document, KAERI (2000).

[6] W. S. Yang, "An LMR Core Thermal-Hydraulics Code Based on the ENERGY Model", Journal of KNS, Vol. 29, No. 5, pp. 406-416, (1997).

[7] OECD, "Physics of Plutonium Recycling, Volume V, Plutonium Recycling in Fast Reactors,” p. 14, OECD (1996).

[8] D. H. Hahn, et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995).

[9] W. S. Kim et al., "Development of a Subchannel Code for LMR Core Thermal Hydraulic Analysis", ICONE-8, April 2-6 2000, Baltimore (2000).

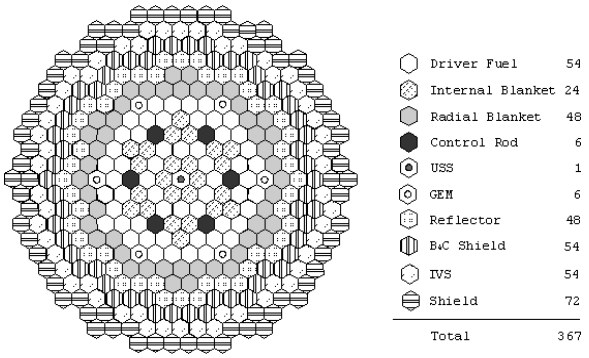

그림 1 Breakeven 노심 배치도

표 1 Breakeven 노심 운전조건 및 설계사양

Core Thermal Output (MWth)	392.2
Core Electric Power(MWe)	150.0
Net Plant Thermal Efficiency(%)	38.2
Core Inlet/Out Temperature(℃)	386.2/530.0
Total Flow Rate (kg/s)	2143
Active Core Height (cm)	100.0
Core Diameter (cm)	344.30
Core Configuration	Heterogeneous
Number of Core Enrichment Zones	1
Feed Fuel TRU Enrichments (w/o%)	30.00
Fuel Type	U-Pu-10%Zr
Refueling Interval (months)	18
Refueling Batches (Driver/IB/RB)	3/3/6
Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	149.60
Pins per Fuel Assembly (Driver/Blanket)	271/127
Pin Outer Diameter (Driver/Blanket) (mm)	7.40/12.0
Pin P/D Ratio (Driver/Blanket)	1.203/1.083
Average/Peak Fuel Burnup for Driver (MWD/kg)	87.6/120.7
Avg/Peak Linear Power for Driver (BOEC)(W/cm)	201.2/287.1
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) ($x10^{23}$n/cm^2)	2.41
Cladding Material	HT9

표 2 Breakeven 평형노심 유량영역 및 최고온도 (2σ)

Orifice Group	Assembly Type	No. of Assy	Assy Flow (kg/s)	Bundle Pressure Drop (MPa)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (℃)	Cladding Midwall (℃)
1	Driver Fuel	12	35.0	0.30		546	629
2	Driver Fuel	18	32.2	0.26		547	629
3	Driver Fuel	24	27.2	0.19	77.0	548	629
4	Internal Blanket	18	10.2	0.07		527	629
5	Internal Blanket	6	9.4	0.06	11.0	528	628
6	Radial Blanket	18	5.9	0.03		530	629
7	Radial Blanket	12	5.1	0.02		528	627
8	Radial Blanket	6	3.4	0.01		528	627
9	Radial Blanket	12	2.3	0.01	10.0	525	620

Total primary loop flow : 2143 kg/s
Total bypass flow : 2.0 %

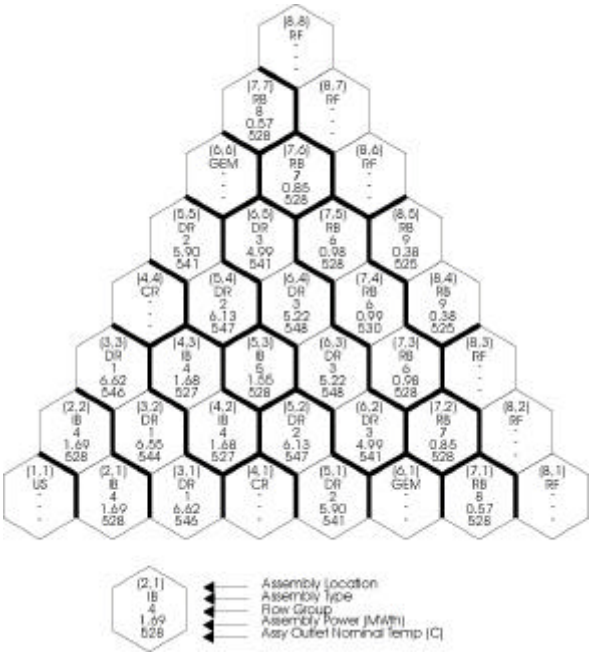

그림 2 Breakeven 노심 유량영역 구분 (1/6노심)

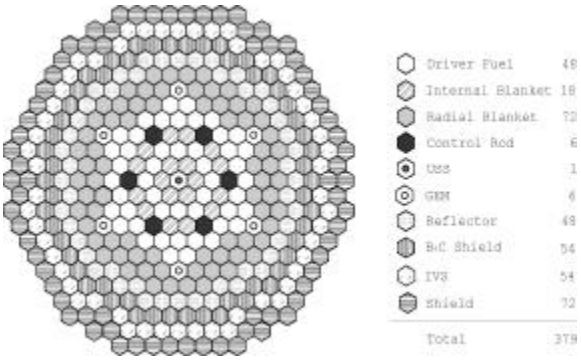

그림 3 증식특성 노심 배치도

표 3 증식특성 노심 운전조검 및 설계사양

Core Thermal Output (MWth)	392.2
Core Electric Power(MWe)	150.0
Net Plant Thermal Efficiency(%)	38.2
Core Inlet/Out Temperature(℃)	386.2/530.0
Total Flow Rate (kg/s)	2143
Active Core Height (cm)	120.0
Core Diameter (cm)	344.30
Core Configuration	Heterogeneous
Number of Core Enrichment Zones	1
Feed Fuel Enrichments (w/o%)	28.00
Fuel Type	U-Pu-10%Zr
Refueling Interval (months)	18
Refueling Batches (Driver/IB/RB)	3/3/6
Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	149.60
Pins per Fuel Assembly (Driver/Blanket)	271/127
Pin Outer Diameter (Driver/Blanket) (mm)	7.40/12.0
Pin P/D Ratio (Driver/Blanket)	1.203/1.083
Average/Peak Fuel Burnup for Driver (MWD/kg)	79.8/116.9
Avg/Peak Linear Power for Driver (BOEC)(W/cm)	184.8/278.3
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) ($x10^{23}$ n/cm^2)	2.43
Cladding Material	HT9

표 4 증식특성 노심 유량영역 및 최고 온도 (2σ)

Orifice Group	Assembly Type	No. of Assy	Assy Flow (kg/s)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (℃)	Thermal Striping (℃)	Cladding Midwall (℃)
1	Driver Fuel	12	39.80		544	174	624
2	Driver Fuel	24	34.70		543	167	621
3	Driver Fuel	12	27.00	65.3	548	87	627
4	Internal Blanket	6	12.15		528	136	629
5	Internal Blanket	12	12.50	12.2	527	145	627
6	Raidal Balnekt	12	8.70		528	105	628
7	Raidal Balnekt	6	5.30		528	89	627
8	Raidal Balnekt	12	4.80		530	87	629
9	Raidal Balnekt	12	2.90		526	31	622
10	Raidal Balnekt	12	2.45		529	37	629
11	Raidal Balnekt	6	1.80		526	40	623
12	Raidal Balnekt	12	1.55	19.4	528	37	627

Total primary loop flow : 2143 kg/s
Total bypass flow : 2.0 %

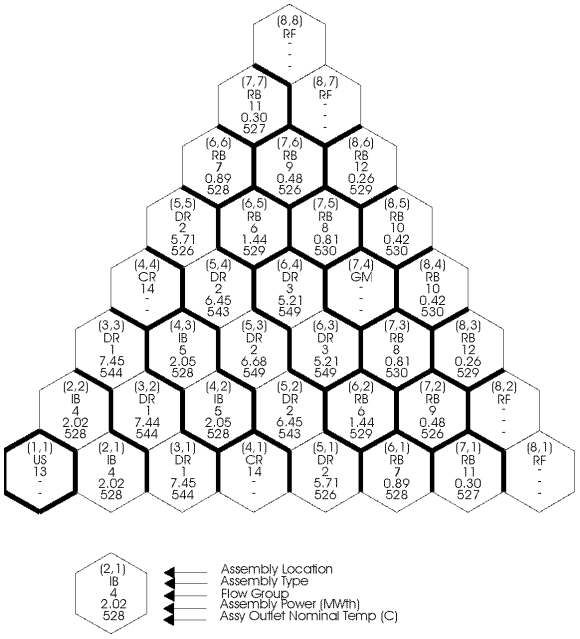

그림 4 증식특성 노심 유량영역 구분 (1/6노심)