

액체금속로 KALIMER-600 노심 개념설계 열유체 특성 분석
Thermal Hydraulic Characteristics of
KALIMER-600 Conceptual Design Core

김영균, 송훈, 김영일
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력 중장기과제의 일환으로 수행 중인 국내개발 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor)는 지금까지 우라늄 금속핵연료 노심, 증식특성 노심, breakeven 노심에 대하여 개념설계 작업과 함께, 그 설계 특성 분석 작업을 수행하였다. 그러나, 핵확산저항성을 갖춘 액체금속로 노심 개념의 필요성이 대두됨에 따라서 고순도 Pu의 생산을 원천적으로 봉쇄하기 위하여 블랭킷 집합체를 전혀 사용하지 않고도 임계증식비를 갖는 새로운 개념의 노심으로서 600 MWe급 노심 개념을 개발하였다. 본 논문에서는 블랭킷이 없는 600 MWe 노심의 개념설계에 대하여 열유체 설계특성을 분석하고, 그 계산 결과에 대하여 기술하였다.

Abstract

KALIMER cores of 150 MWe (392 MWth) such as Uranium metal fueled homogeneous core, breeder core and breakeven core have been designed and analyzed. But, there is a need to develop a new design concept core which has a good proliferation resistant characteristics. KALIMER-600 core is designed to have no blanket assemblies in the core in order not to produce pure Pu. KALIMER-600 core is a 600 MWe rated (1,500 MWth) homogeneous core fueled with U-Pu-Zr ternary alloy fuel. In this paper, KALIMER-600 core design was described and a steady state thermal hydraulic analysis of KALIMER-600 equilibrium core was performed.

1. 서론

액체금속로 설계개념 연구과제에서 원자력 중장기과제로 수행한 국내개발 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor) 설계개념 타당성 연구 결과에 의해, KALIMER의 노심 규모는 전기출력 150 MWe, 열출력 392 MWth로 설정된 바 있다. 또한, 시동에 필요한 초기노심 핵연료로는 20 %농축도 이하의 U-Zr의 이원합금 핵연료로 설정되었으며[1], 그에 따른 노심설계 분석작업 결과는 금속연료 노심 설계분석 보고서[2]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 설계 노심을 개발하도록 하는 변경된 요구가 있어, 초기노심의 핵연료로 U-Pu-Zr 삼원합금 핵연료를 사용하는 비균질 노심인 증식특성 노심과 breakeven 노심에 대한 노심 구성과 핵 및 열유체 특성 분석작업이 수행되었다. 각각의 설계 노심에 대한 세부사항 및 분석작업 결과는 설계분석 보고서[2,3,4]에 자세히 기술되어 있다.

그러나, 최근에는 핵확산저항성을 갖춘 액체금속로 노심 개념의 필요성이 대두됨에 따라서 고순도 Pu의 생산을 원천적으로 봉쇄하기 위하여 블랭킷 집합체를 제거하여 순 핵분열성 물질 재생산이 거의 없으면서 임계증식비를 갖는 새로운 개념의 노심으로서 600 MWe급 노심 개념을 개발하였다. 하지만 기존의 소듐 냉각 액체금속로는 체적당 출력밀도를 최대화하는데 중점을 두었으므로 노심내부 증식비를 1.0 이상으로 유지하기가 어려웠다. 따라서, 핵연료 반경을 증가시키고 냉각재 면적을 줄임으로써 재처리 과정에서 핵분열성 물질의 유실을 고려하여도 증식비가 1.0 이상인 노심을 개발한 것이다. 이 개념의 타당성이 입증될 경우 핵확산저항성 노심개념 연구분야에서 획기적 전환점을 맞이할 것으로 예상되며, 또한 선명한 핵확산저항성을 지니므로 국내에서 지속개발이 가능하여 앞으로 액체금속로 개발의 주력 설계 노심으로 자리매김할 것이다.

한편, 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 열유체 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 열유체 개념 설계 및 분석 작업은 노심구성과 그에 따른 핵설계 데이터를 연계 자료로 하여 유량분배, 온도분포계산, 정상상태 열유체 해석, 과도상태 열유체 해석, 안전

해석 연계자료 제공의 흐름에 따라서 진행하게 된다. KALIMER 노심 열유체 개념설계 및 분석 작업에서는 전반적으로 현재 개념설계 단계에서 사용하고 있는 흐름도를 따르고 있는데[4], 이에 대한 절차는 아래에 상세히 기술한 바와 같이, 노심 유량영역 구분과 노심내 집합체별 온도분포 계산의 두 작업으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 블랭킷이 없는 600 MWe 노심의 개념설계의 전반적인 특성에 대하여 기술하였으며, 노심의 열유체 설계특성을 분석하여 그 계산 결과에 대하여 기술하고, 이를 breakeven 노심의 설계 특성과 비교하였다.

2. 핵확산 저항성 노심 개념 설계

2.1 노심설계 목표 및 개념 개발

핵확산저항성 핵주기 체제 선정

핵확산저항성 개념을 정립하고 핵확산저항성 향상을 위하여 블랭킷 장전 최소화를 목표로 하고, 주기말에 생산된 잉여 TRU의 생성을 최소화하기 위하여 증식비 1.0의 노심을 선정하였다. 노심의 핵연료 주기는 노심에서 방출된 핵연료집합체는 노내 핵연료 저장조(IVS)에서 1 운전주기(18개월) 동안 냉각한 후 원자로 밖으로 방출되어, 각각 건식재처리(8개월), 재장전에 앞서의 저장(2개월)을 가정하여 노심 방출 후 재장전까지의 기간을 총 36개월로 가정하였다. 순환핵연료주기에서의 핵연료물질 수지분석에서는 현재의 금속핵연료 건식재처리(pyroprocessing) 기술 수준을 적용하여 재처리 과정에서 TRU의 99.9 %는 회수되고 나머지 0.1 %는 폐기물 분류로 이동한다고 가정하였다. 또한, 희토류(RE) 핵분열생성물(FP)의 경우에는, 5 %만 재순환 되며 나머지 모든 FP는 폐기물 분류로 이동한다고 가정하였다.[5]

핵설계 한계인자 설정

핵설계 한계인자 즉 설계 제한치들은 금속연료에 대해 이용 가능한 데이터베이스로부터 결정되며 최대 선출력, 최대고속중성자 플루언스, 최대국부연소도, 최대허용연소반응도 변화, 노심 높이 제한 등이 있다. 출력분포는 최대선출력을 낮게 유지시키기 위해 가능한 평탄화 해야 한다. 주기 최대 선출력은 연료봉 피복관의 크립 발생을 방지하기 위해 285 W/cm보다 적어야 한다. 이 값은 피복관 허용온도 650 °C을 만족하는 값이다. 또한 최대 허용 연소반응도 변화는 전주기에 걸쳐 가능한 낮추어야 한다. 이 값은 제어봉 시스템의 이용 가능한 노정지 값에 직접적인 영향을 주기 때문이다. 반응도 폭주 사고를 예방하고 자연적 안전성을 확보하기 위하여 주기초와 주기말의 최대 허용 연소반응도 변화는 1β (~370 pcm)보다 낮게 유지해야 한다. 노심 높이는 110 cm보다 낮아야 하는데 이것은 노심의 압력강하 한계치(<0.61 MPa)를 만족하고 또한 노심 축방향의 높이를 감소시

켜 안전성에 중요한 소듐기화 반응도를 감소하는 한 방안이다.[5]

2.2 핵확산저항성 노심 구성 및 핵설계 특성

평형주기 노심모형

노심설계 기준 및 요건은 이전의 breakeven 노심과 동일하게 금속핵연료 데이터베이스를 기초로 하여 노심 설계기준과 제한조건을 포함하는 노심 설계요건을 설정하였다. 본 연구에서 원자로 출력은 600 MWe, 발전소 성능인자는 85%, 핵연료 재장전 기간은 18 개월로 하였다. 침투선출력은 batch factor를 고려하여 최대 285 W/cm로, 최대연소도는 150 MWD/kg로 제한하였다. 또한 최대 고속중성자 플루언스는 4.0×10^{23} n/cm²을 넘지 않도록 하였다. 초기 시동노심의 핵연료 형태는 U-Pu-Zr 3원합금으로, 시동 노심은 PWR 사용후핵연료를 재처리한 TRU로 이루어진 핵연료로, 시동 노심 이후의 핵연료주기에서는 운전 중 생산되는 TRU를 재순환 공급하도록 하였다. 한편, 사용후핵연료 내 포함되어있는 마이나 액티나이드(MA)는 재순환 TRU와 함께 재순환 공급한다. 이러한 노심설계기준을 가지고 증식비는 1.0, 연소결손반응도가는 400 pcm 정도, 침투출력은 노심 외부에 되도록 배치하고 TRU농축도는 30 wt% 이하로 하였다.[5]

노심 구성 및 설계 제원

증식비 1.0을 유지하는 노심을 구성하기 위하여 내부 블랭킷, 외부 블랭킷, 구동핵연료 집합체로 구성된 40개의 다양한 후보 노심을 선정하여 연소결손반응도와 구동핵연료 집합체 선출력 밀도의 관점에서 계산 후 비교 및 평가를 통하여 노심을 구성하였다. 점진적으로 블랭킷 집합체의 개수를 감소시킨 결과 최종적으로 고순도 Pu의 생산을 원천적으로 봉쇄하여 핵확산저항성이 향상된 블랭킷을 제거한 노심의 설계가 가능하게 되었다. 블랭킷 삭제로 인한 증가된 출력 peaking factor를 낮추기 위해 노심 연료 영역을 3영역으로 나누어서 각 영역에 대하여 여러 가지로 농축도를 변경하여 출력 peaking factor가 최대한 낮추어진 노심을 최종적으로 선택하였다.

노심 영역은 출력 평탄화를 고려하여 내부(inner)구동연료 영역에 90개의 구동핵연료 집합체, 중간(middle)구동연료 영역에 108개의 구동핵연료 집합체, 외부(outer) 구동핵연료 영역에 120개의 구동핵연료 집합체, 12개의 제어봉 집합체, 1개의 USS(Ultimate Shutdown System)로 구성되어 있다. 이와 같은 KALIMER-600 설계 노심의 배치도를 그림 1에 나타내었으며, 표 1에는 주요 설계 사양과 운전조건을 보여주고 있다.

이전 노심에서 적용되었던 6개의 가스 팽창 모듈은 대형 노심에서 중성자누출이 감소하기 때문에 이번 노심에서는 제거하였다. 축방향 블랭킷은 없으며, 노심의 유효높이는 100 cm이다. 노심 외곽으로 66개의 반사체 집합체, 114개의 노내 핵연료 저장조(IVS: In-Vessel Storage), 그리고 168개의 차폐 집합체(72개의 B₄C 차폐체 포함)로 구성되어

있다. 노심영역의 반경방향 등가직경은 307cm이다. 노심구조재는 HT9으로서, 이 페라이트계 스텐레스강은 낮은 조사 팽윤 특성을 가지고 있다. 구동핵연료집합체에는 271개의 핵연료핀이 장전되어있다. 핵연료 재장전주기는 18개월이다. 매 재장전시 총 핵연료집합체의 1/3이 교체되며, 노심내 장전된 핵연료집합체는 전 핵연료주기 동안 위치가 바뀌지 않는다. 노심으로부터 추출된 핵연료는 붕괴열을 냉각시키기 위해서 노내핵연료저장조(IVS) 내에 1주기 동안 저장한 후 최종적으로 노용기 외부로 이동된다.[5]

3. 노심 열유체 설계 방법론 및 특성분석

3.1 노심 열유체 설계 방법론

개념설계 단계에서의 열유체 설계 및 특성 분석은 먼저 노심 열유체 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 갖도록 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 핵 및 열유체 안전성 분석을 통하여 검증을 받게 된다.[1,6]

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 온도 분포를 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 비

록 유량이 같다고 할지라도 다른 그룹으로 분리한다. 이 때, 제어봉과 USS(Ultimate Shutdown System)에서는 발생하는 출력이 없지만 thermal striping 온도 (임의의 집합체에서의 냉각재 출구 온도가 주변 6개 집합체의 냉각재 출구 온도와 갖는 차이값 중에서 최고인 값) 등을 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, 일반적으로 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.[1,6]

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 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 2 σ 값을 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 [6].

3.2 노심 열유체 설계 특성 분석

노심 유량영역 구분 결과

노심입구의 냉각재 온도는 386.2 ℃, 노심출구의 냉각재 온도는 530 ℃로서 노심에서의 온도 증가는 143.8 ℃이다. 노심 구성 및 설계 제원은 앞에서 설명한 것처럼 breakeven 노심과 동일한 자료를 기초로 하여 설정된 것이다.

Breakeven 노심 설계의 최적화 과정에서 핵연료설계 및 핵계산 작업과의 설계연계 협

의에 의해 결정된 핵연료봉의 외경은 7.4 mm였으나, 핵확산저항성을 높이기 위해 블랭킷을 제거한 KALIMER-600 노심의 경우에는 출력 보정을 위해 핵연료봉의 외경을 7.57 mm로 증가시켰다.

KALIMER-600 설계 노심에 대한 유량영역 구분 결과와 그에 따른 온도계산 결과표를 표 2에 나타내었으며, 그림 2에는 이 결과를 1/6노심에 대하여 그림으로 나타내었다. 표에서 보듯이 KALIMER-600 설계 노심의 경우에는 내부 핵연료집합체 부분은 모두를 하나의 유량그룹으로 묶을 수 있었으며, 중간 핵연료집합체 부분은 2개, 외부 핵연료집합체 부분은 6개의 유량그룹으로 선정되었다. 이는 현재까지 설계되었던 우라늄 금속핵연료 노심, 증식특성 노심, breakeven 노심의 경우와 크게 다르지 않은 특성을 보이는 것이다. 그러나, 평형노심 해석에서는 90개의 내부 핵연료 집합체가 하나의 유량그룹으로 나뉘었지만 추후 최적화 작업과 초기/천이 노심 해석을 통하여 2~3개의 유량그룹으로 적절하게 분배되는 것이 좋을 것으로 보인다.

노심 중앙부분에서의 출력이 낮아지고 출력의 평탄화가 이루어 졌으며, 최고온도 집합체가 외부 핵연료 집합체인 (9, 1) 집합체에서 나타나게 되었다. 이 집합체에서의 유량은 29.6 kg/s로서 이전의 설계 노심은 물론 breakeven 노심의 35.0 kg/s에 비해서도 대폭 낮아진 값을 갖는다. 그러나, 핵연료봉 외경이 7.4 mm에서 7.67 mm로 증가하여 집합체 내부에서의 유로면적이 축소되었기 때문에 이 집합체에서의 평균 유속은 상대적으로 감소폭이 적어서 5.6 m/s에서 5.0 m/s로 감소하였으며, 핵연료 번들 부분에서의 압력강하는 0.300 MPa에서 0.263 MPa로 감소하였다.

노심내 집합체별 온도분포 계산결과

KALIMER-600 설계 노심의 유량그룹별 온도 계산 결과는 표 2와 그림 2에 나타낸 것과 같다. 표에서 알 수 있듯이 피복관 중심에서의 2 σ 온도가 제한값인 630°C 이하이지만 현재로는 온도의 여유가 거의 없는 수준이기 때문에, 추후 설계 최적화 작업을 수행할 경우에는 이 온도의 여유가 높아지도록 하는 방향으로 작업을 수행하여야 할 것이다. 표에 나타낸 계산값들은 유량영역 중에서 가장 높은 출력을 갖는 연료봉의 2 σ 값에 해당하는 온도이다. 그림 2는 노심내 집합체별 최종 유량분배 및 그에 따른 온도분포 계산결과를 집합체의 위치, 집합체의 종류, 유량그룹, 집합체 출력, 출구온도 값 등을 1/6노심에 대하여 나타낸 것이다.

현재 KALIMER-600 설계 노심의 유량그룹간 유량의 차이가 많지 않기 때문에 평형노심의 최적화 작업과 함께 초기/ 천이 노심의 해석 작업을 통하여 적절하게 유량이 분배되도록 설계하는 작업, 즉 유량분배와 온도계산을 반복적으로 수행하여 열유체 설계를 최적화시키는 작업이 필요할 것이다.

각 영역별 핵연료 집합체의 출력을 평형노심 초기와 말기에 대한 변화를 비교해 보면 그림 3, 4 및 5와 같다. 즉, 그림 3에서와 같이 내부 핵연료집합체에서의 집합체 출력 변

화에 비하여 그림 4의 중간 핵연료집합체와 특히 그림 5의 외부 핵연료집합체에서는 그 변화가 더욱 커짐은 물론 각각의 집합체들이 갖는 출력편차가 매우 커지는 것을 확인할 수가 있다. 그림에서 보는 바와 같이 내부 핵연료집합체에서는 주기말로 갈수록 출력이 증가하고, 외부 핵연료 집합체에서는 감소하는데 비해, 중간 핵연료집합체의 경우에는 출력이 증가하는 집합체와 감소하는 집합체가 함께 있음을 알 수 있다. 이는 블랭킷이 없는 노심의 설계 특성으로서, 반경방향 블랭킷 집합체가 장착되어 있는 지금까지의 설계 노심에서와 반대의 경향을 보이는 것이다.

KALIMER-600 노심의 설계 특성

KALIMER-600 설계 노심의 유량그룹이 내부 핵연료집합체 부분에 1개, 중간 핵연료집합체 부분에 2개, 외부 핵연료집합체 부분에 6개 등 총 9개의 유량그룹으로 선정되어, breakeven 노심의 핵연료집합체 부분에 3개, 내부 블랭킷집합체 부분에 2개, 반경방향 블랭킷집합체 부분에 4개 등 총 유량그룹은 9개로 동일하다. 참고로, 증식특성 노심에서는 3개, 2개, 7개로서 총 12개의 유량그룹으로 선정되었다. 따라서 KALIMER-600 설계 노심의 경우에도 현재까지 설계되었던 우라늄 금속핵연료 노심, 증식특성 노심, breakeven 노심의 경우와 크게 다르지 않은 특성을 보이고 있다. 그러나, 내부 핵연료집합체 9개 모두가 하나의 유량그룹으로 선정되었다는 것이 커다란 특성이라고 할 수 있다. 이것은 추후 최적화 작업과 초기/천이 노심 해석을 통하여 2~3개의 유량그룹으로 적절하게 분배되도록 설계가 개선될 수 있을 것으로 보인다. 설계 특성 비교를 위하여 breakeven 노심 설계의 배치도를 그림 6에, 설계사양과 운전조건을 표 3에 나타내었으며, 이에 대한 유량영역 구분 결과와 그에 따른 온도계산 결과를 표 4와 그림 7에 각각 나타내었다.

또한, 최고온도 집합체가 외부 핵연료 집합체인 (9, 1) 집합체에서 나타나게 되었는데, 이는 노심 중앙부분에서의 출력이 낮아지고 출력의 평탄화가 이루어 졌으며 블랭킷이 없는 노심을 구성하였기 때문에, 앞에서 그림 3, 4 및 5에서 각 영역별 핵연료 집합체의 출력을 평형노심 초기와 말기에 대한 변화를 비교해 본 바와 같은 현상으로 인하여 나타난 특성이라고 할 수 있다.

집합체 유량이 이전의 설계 노심은 물론 breakeven 노심의 35.0 kg/s에 비해서도 대폭 낮아진 값을 갖는데, 핵연료봉 외경이 7.4 mm에서 7.67 mm로 증가하여 집합체 내부에서의 유로면적이 축소되었기 때문에 이 집합체에서의 평균 유속은 상대적으로 감소폭이 적은 5.0 m/s이며, 핵연료 번들 부분에서의 압력강하는 0.263 MPa의 값을 갖게 되었다.

그러나, KALIMER-600 설계 노심은 열출력 1,500 MWth, 전기출력 600 MWe로서, 열출력 392 MWth, 전기출력 150 MWe인 소형 노심과는 다른 특성을 갖고 있기 때문에 이는 앞으로의 최적화 작업을 통하여 더욱 자세한 연구가 이루어 질 것이다.

또한, 현재는 KALIMER-600 설계 노심의 피복관 중심에서의 2 σ 온도가 제한값인 630 °C를 온도의 여유가 거의 없이 어렵게 만족시키고 있기 때문에, 추후 설계 최적화 작업을

통하여 온도의 여유가 높아지도록 하는 방향으로 노심을 재구성하는 작업이 수행될 것이며, 이를 위하여 많은 설계연계 작업이 필요할 것이다.

4. 결론 및 연구방향

열출력 1,500 MWth, 전기출력 600 MWe인 U-Pu-10%Zr 삼원합금 핵연료 사용 노심인 액체금속로 KALIMER-600 평형노심에 대하여 정상상태 열유체 설계 특성을 분석하고, 그 결과를 breakeven 평형노심의 열유체 설계 특성과 비교 검토하였다.

지금까지의 KALIMER 설계 노심은 우라늄 금속핵연료 노심, 증식특성 노심, breakeven 노심으로서 열출력 392 MWth, 전기출력 150 MWe인 소형 노심이었다. 그러나, 핵확산저항성을 갖춘 액체금속로 노심 개념의 필요성이 대두됨에 따라서 고순도 Pu의 생산을 원천적으로 봉쇄하기 위하여 블랭킷 집합체를 전혀 사용하지 않고도 임계증식비를 갖는 새로운 개념의 노심으로서 600 MWe급 노심 개념을 개발한 것이다. 본 논문에서는 블랭킷이 없는 600 MWe 노심의 개념설계에 대하여 기술하였으며, 열유체 설계특성을 분석하고 계산 결과에 대하여 기술하였다.

유량배분 계산 결과 유량그룹은 현재까지 설계되었던 우라늄 금속핵연료 노심, 증식특성 노심, breakeven 노심의 경우와 크게 다르지 않으나, 내부 핵연료집합체 90개 모두가 하나의 유량그룹으로 선정되었는데, 이것은 추후 최적화 작업과 초기/천이 노심 해석을 통하여 2~3개의 유량그룹으로 적절하게 분배되도록 설계 개선이 이루어질 것이다.

또한, KALIMER-600 설계 노심의 피복관 중심에서의 2 σ 온도값도 설계 최적화 작업을 통하여 온도의 여유가 높아지도록 하는 작업이 수행될 것이며, 이를 위하여 타분야와의 많은 설계연계와 검토 작업이 필요할 것이다.

본 논문에서 계산 및 분석을 위해서 사용된 코드는, 현재 KALIMER 노심설계 기술개발의 개념설계 초기 단계에서 사용하고 있는 냉각재 유량분배 계산 모듈 ORFCE와 그에 따른 노심 집합체내 온도분포 계산 코드 SLTHEN[7]이다. 개념설계 초기 단계에서 계산된 집합체의 유량분포나 온도분포는, 현재 개발하고 있는 상세 부수로 해석코드인 MATRA-LMR[8,9]을 사용하여 더욱 자세한 계산을 수행할 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박창규 외, KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97 (1997)
- [2] 김영인 외, KALIMER Uranium Metallic Fueled Equilibrium Core Design and Analysis, LMR/CD100-ER-01 Rev. 0/98, Internal Document, KAERI (1998)
- [3] 김영인 외, KALIMER Breeder Equilibrium Core Conceptual Design and Analysis, LMR/CD120-ER-01 Rev. 0/99, Internal Document, KAERI (1999)
- [4] 김영인 외, "Nuclear and Thermal-hydraulic Characteristics for KALIMER Breakeven Equilibrium Core," LMR/CD112-ER-01 Rev. 0/2000, Internal Document, KAERI (2000)
- [5] 송훈, "KALIMER-600 노심의 핵특성 분석보고서", 내부 작업 보고서 (2003)
- [6] D. H. Hahn, et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995)
- [7] 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)
- [8] W. S. Kim et al., "Inter-Assembly Heat Transfer Modeling for the Development of LMR Core Subchannel Code", NTHAS2, KNS/AESJ (2000)
- [9] W. S. Kim et al., "A Subchannel Analysis Code MATRA-LMR for Wire-Wrapped Liquid Metal Cooled Reactor Subassembly, Annals of Nuclear Energy", No.2, Vol. 29 (2002)

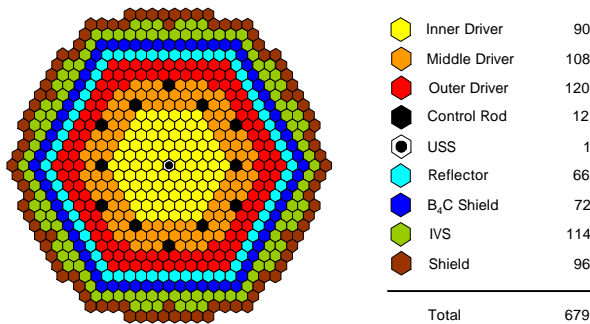


그림 1. KALIMER-600 노심 배치도

표 1. KALIMER-600 노심 설계사양

Core Thermal Output (MWth)	1,500
Core Electric Power(MWe)	600.0
Plant Thermal Efficiency(%)	40.0
Core Inlet/Out Temperature(°C)	386.2/530.0
Total Flow Rate (kg/s)	8,196
Active Core Height (cm)	100.0
Core Diameter (cm)	307
Core Configuration	Homogeneous
Number of Core Enrichment Zones	1
Feed Fuel Enrichments (w/o%)	15.50
Fuel Type	U-Pu-10%Zr
Refueling Interval (months)	18
Refueling Batches (ID/MD/OD)	3/3/3
Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	149.60
Pins per Fuel Assembly	271
Pin Outer Diameter (mm)	7.57
Pin P/D Ratio	1.176
Average/Peak Fuel Burnup for Driver (MWD/kg)	75.9/98.0
Avg/Peak Linear Power for Driver (BOEC)(W/cm)	171.3/250.8
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) (x10 ¹⁹ n/cm ²)	3.27
Cladding Material	HT9

표 2. KALIMER-600 노심 유량영역 및 온도 (2σ)

Flow Group No.	Assembly Type	No. of Assy	Assy Flow (kg/s)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (°C)	Cladding Midwall (°C)
1	Inner Driver	90	25.7	28.7	547	629
2	Middle Driver	72	27.4		546	630
3	Middle Driver	36	25.4	35.8	547	629
4	Outer Driver	6	29.6		546	630
5	Outer Driver	48	27.9		547	629
6	Outer Driver	6	23.2		548	630
7	Outer Driver	42	21.4		549	630
8	Outer Driver	12	18.3		549	629
9	Outer Driver	6	14.7	35.5	551	629

Total primary loop flow : 8,196 kg/s
 Total bypass flow : 1.1 %

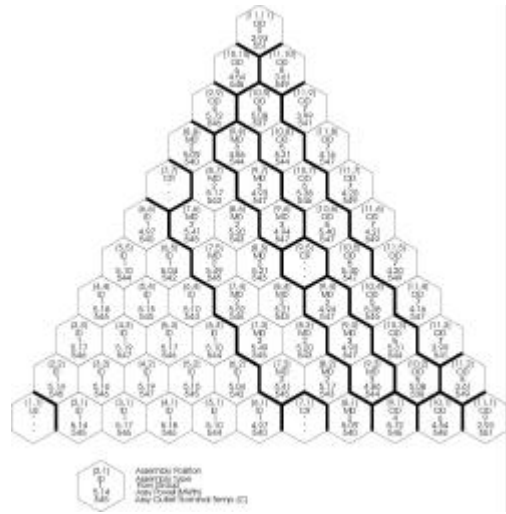


그림 2. KALIMER-600 노심 유량영역 구분 (1/6 노심)

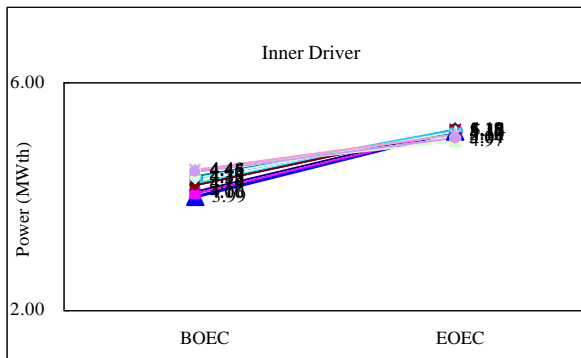


그림 3. 내부 핵연료집합체의 출력 변화

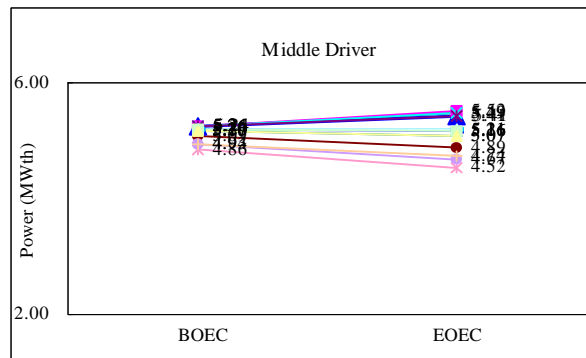


그림 4. 중간 핵연료집합체의 출력 변화

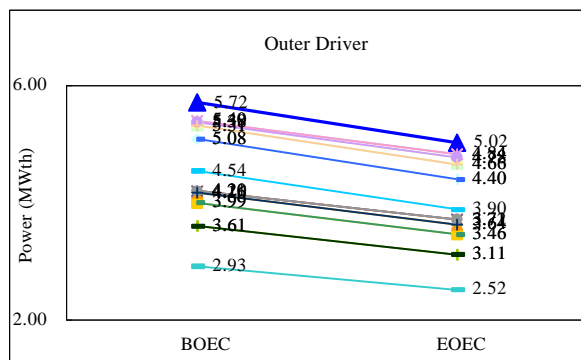


그림 5. 외부 핵연료집합체의 출력 변화

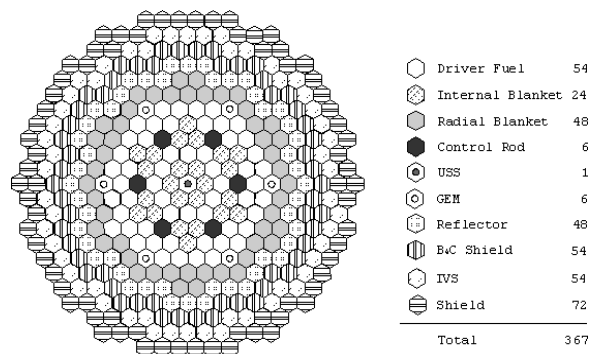


그림 6. Breakeven 노심 배치도

표 3. Breakeven 노심 설계사양

Core Thermal Output (MWth)	392.2
Core Electric Power(MWe)	150.0
Net Plant Thermal Efficiency(%)	38.2
Core Inlet/Out Temperature(°C)	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 ²⁰ n/cm ²)	2.41
Cladding Material	HT9

표 4. Breakeven 노심 유량영역 및 온도(2σ)

Flow Group No.	Assy Type	No. of Assy	Assy Flow (kg/s)	Zone Flow (%)	Assy Outlet Average (°C)	Cladding Midwall (2σ) (°C)
1	DR	12	35.0		546	629
2	DR	18	32.2		547	629
3	DR	24	27.2	77.0	548	629
4	IB	18	10.2		527	629
5	IB	6	9.4	11.0	528	628
6	RB	18	5.9		530	629
7	RB	12	5.1		528	627
8	RB	6	3.4		528	627
9	RB	12	2.3	10.0	525	620

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

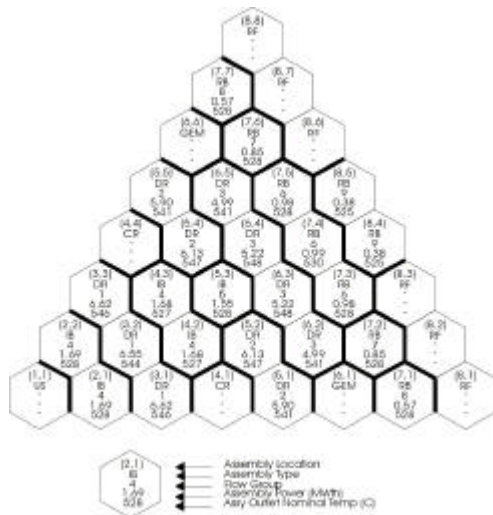


그림 7. Breakeven 노심 유량영역 구분 (1/6 노심)