

액체금속로 KALIMER 개념설계 노심 열유체 설계특성 분석
Thermal Hydraulic Characteristics of
KALIMER Conceptual Design Cores

김영균, 김영일
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

임현진
아주대학교
경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5

요 약

국내개발 액체금속로 KALIMER의 개념설계 노심인 U금속연료 노심, 증식특성 노심 및 breakeven 평형노심과 초기/천이노심의 열유체 설계특성을 분석하고, 그 계산 결과에 대하여 기술하였다. KALIMER는 현재 전기출력을 150 MWe로 하고 열출력을 392 MWth로 하며 금속핵연료를 사용하는 소형 노심이다. 현재까지 설계된 KALIMER 노심은 모두 핵적 특성이 우수하게 나타났으며, 노심 안전성 확보 측면에서도 매우 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 열유체 특성 분석에 따르면, 반경방향 비균질 노심인 breakeven 노심은 역시 반경방향 비균질 노심인 증식특성 평형노심에 비하여 반경방향으로 평탄한 출력분포를 보이며, 노심 중앙부에서의 유량이 감소하여 노심에서의 압력손실이 그만큼 작아졌으나, 균질노심인 U금속연료 노심에 비해서는 증가하는 것으로 나타났다.

Abstract

Thermal hydraulic analyses of KALIMER cores: U metal fueled homogeneous core, breeder core and breakeven core, were performed. A present KALIMER core is a 150 MWe rated (392 MWth) heterogeneous breakeven core fueled with U-Pu-Zr ternary alloy fuel. The thermal hydraulic analyses of equilibrium cores were analyzed for the three KALIMER conceptual design cores, which have good neutronic characteristics to give good safety margin in the core design. In this paper, the thermal hydraulic analyses results of the startup/transition cores were also presented.

1. 서론

원자력 중장기과제의 일환으로 수행된 국내개발 액체금속로 KALIMER (Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 설계개념 타당성 연구 결과[1]에 따라, KALIMER의 노심 규모는 전기출력 150MWe (열출력 392MWth)로 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. 그 후에, KALIMER의 기본 설계개념에 증식특성을 고려한 노심 개발과 breakeven 설계노심을 포함하도록 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.[3,4,5]

일반적으로 삼각형 격자 형태로 장전되어 있는 핵연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 핵연료 집합체로 구성하고 있는 액체금속로 노심은, 덕트와 덕트 간에는 유량 교환이 전혀 없는 폐쇄회로를 형성하도록 설계가 된다. 따라서, 각 집합체에 흐르는 냉각재 유량을 적절하게 분배하여 이들 각각의 집합체에서 발생하는 열량을 효과적으로 추출하고, 그에 따른 온도분포 또한 적절하게 유지시키는 것이 액체금속로 열유체 설계의 기본 목표가 되는 것이다. 각 집합체에 필요한 유량은, 정격시와 과도상태시 모두 핵연료, 피복관 및 구조재의 건전성 확보, 냉각재 비등방지 조건 등을 고려하여 분배되어야 한다. 현재 개념설계 단계에 있는 KALIMER 노심 열유체 개념설계 및 분석 작업에서는 전반적으로 그림 1에 나타난 흐름도와 같은 방법을 따르고 있다.

개념설계 단계에서의 열유체 설계 및 특성 분석은 먼저 노심 열유체 설계목표에 따라 노심내 전체유량을 결정한 후, 각 집합체별로 열출력과 그 집합체에서의 핵연료봉 최고 선출력 밀도에 따라 집합체별 필요유량을 계산하고 이들을 몇 개의 유량그룹으로 나누고, 각 집합체의 최고온도 연료봉에 대하여 이 유량에 따른 냉각재 온도, 피복관 중심온도, 핵연료 중심온도 등을 계산하는 방식으로 수행된다. 이 때, 각 집합체에서의 핵연료 피복관 최고 중심온도가 같은 값을 갖도록 유량을 재조절하고, 이 유량에 의한 노심내 압력 손실값을 고려하여 유량분배 장치인 오리피스스를 결정하게 된다. 이렇게 계산된 모든 값들이 설계기준을 만족시키는 범위 내에 있도록 하여야 한다. 또한, 냉각재, 피복관 및 핵연료의 최고온도 등이 설계조건을 만족하는지를 확인하고 이에 따른 집합체별 최소유량을 결정하여 오리피스스 장치 설계시 반영하게 된다. 이러한 일련의 해석 절차는 노심 핵설계 및 안전성 분석과 연계되어 반복 수행하며, 최종적으로 핵 및 열유체 안전성 분석을 통하여 검증받게 된다.

본 논문에서는 그 동안 수행된 U 금속연료 노심, 증식특성 노심 및 비균질 breakeven 평형노심의 열유체 설계 특성과 그 분석 결과를 기술하였으며, 특히, breakeven 노심의 경우에는 BOC1과 EOC1 노심에 대한 계산 결과도 함께 기술하였다.

2. 본론

2.1 노심 구성 및 특성

개발 초기에는 U 금속연료 노심[3]으로부터 출발하였으나, 그 후에 다양한 노심 개념설계를 개발하고자 하는 요구에 의하여 증식비 1.18의 증식특성 노심[4] 및 증식비가 현재의 건식재처리를 사용하는 후행핵연료주기에서의 기술 수준[6]을 적용하여 자급자족할 수 있도록 1.05로 정한 breakeven 노심[5]에 대한 연구도 수행되었다. 특히, breakeven노심은 재순환 평형핵연료주기에서 fissile 핵연료 물질의 외부 공급이 필요 없이 자급자족할 수 있는 기능을 갖도록 하는 노심이다. 이들 각각의 노심 설계시에는 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.

U 금속연료 노심

그림 2와 표 1에는 U 금속연료 노심의 구성과 설계사양을 나타내었다. 이 노심은 392 MWth (150 MWe) 용량이며, 97.07 설계 노심에서 나타났던 출력평탄화 및 연소에 따른 여러 가지 문제점을 많은 부분 개선하여 설계된 노심이다.

노심출구의 냉각재 온도는 530 °C로 동일하게 유지하였으나, 노심입구의 냉각재 온도를 361.4 °C에서 386.2 °C로 증가시켜 노심의 온도차이가 168.6 °C에서 143.8 °C로 감소함에 따라, 필요한 냉각재 유량이 증가한 것이 커다란 특징이라고 할 수 있다. 또한, 핵설계의 최적화 과정에서 핵연료설계팀과의 설계연계 협의에 의해 핵연료봉의 외경을 7.4 mm에서 7.67 mm로 증가시켰으며, 저농축 핵연료 노심의 공급핵연료 농축도도 15.0 %에서 14.4 %로 낮추었다. 이에 따라 핵연료 노심영역에서의 평균 선출력과 최대 선출력 값이 낮아지게 되어, 전체적으로 노심의 출력이 평탄하게 되었다.

증식특성 노심

그림 4와 표 3에는 증식특성 노심 배치도와 설계사양을 나타내었다. 용량은 392 MWth (150 MWe)로서 U-Zr 이원합금 핵연료를 사용하여 증식특성을 고려하지 않은 균질노심인 U 금속연료 노심과 같으나, 증식특성 노심은 U-Pu-Zr 삼원합금 핵연료를 사용한 비균질 노심으로서 증식특성을 향상시킨 노심이다. 노심 입출구의 냉각재 온도는 동일

하다. 그러나, 노심 설계의 최적화 과정에서 핵연료설계 및 노심 핵계산 작업과의 설계연계 협의에 의해 핵연료봉의 외경을 7.67 mm에서 7.4 mm로 다시 감소시켰으며, 핵연료 노심의 공급핵연료 농축도도 저농축 핵연료와 고농축 핵연료가 각각 14.4%와 20.0%에서 하나의 농축도를 갖는 핵연료로서 28%로 높게 하였다. 이에 따라 노심 중앙 부분에서의 평균 선출력과 최대 선출력 값이 높아지게 되어, 전체적으로 노심의 출력이 중앙부분에서 높게 되었다.

Breakeven 노심

반경방향 비균질 노심형태의 증식특성노심 구성을 기본으로 하여 설계목표 및 설계기준을 만족하는 최적의 노심구성 및 설계제원을 설정한 것이다. 구동핵연료집합체 장전량수를 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 설계제원이 탐색되었다[5].

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. 탐색 결과 유효 노심높이는 100cm로서 증식특성 노심보다 20cm 감소하였으며, 평형핵연료주기 분석 결과, 공급핵연료의 TRU 농축도는 30.0%, 증식비는 1.05로 구하여졌다. 설정된 breakeven 평형노심 배치도는 그림 6과 같으며, 이 노심에 대한 주요 운전조건 및 설계사양은 표 5에 나타난 바와 같다. 주기초 fissile 장전량은 1123.4 kg이고 증식특성 노심에 비하여 농축도가 증가되었으며 구동핵연료집합체 장전 개수가 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].

2.2 노심 열유체 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 열유체 설계의 기본 목표가 된다. 각 집합

체에 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 연계자료로 하여 유량분배, 온도분포계산, 정상상태 열유체 해석, 과도상태 열유체 해석, 안전해석 연계자료 제공의 흐름에 따라서 진행하게 된다.

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 재조정하며, 이 유량에 의한 노심내 압력손실값을 비롯한 모든 계산값들이 설계조건을 만족하는지를 확인하고, 그에 따른 집합체별 필요 유량을 결정하여 유량분배 장치인 오리피스 구성하게 된다. 이러한 일련의 해석 절차는 노심 핵설계 및 안전성 분석과 연계되어 반복 수행하며, 최종적으로 핵 및 열유체 안전성 분석을 통하여 검증을 받게 된다.

노심내 유량 분배

액체금속로의 집합체는 덕트와 덕트간에 서로 유량의 교환이 없는 폐쇄회로를 형성하고 있기 때문에, 이들 각각의 집합체에서 발생하는 열량을 효과적으로 추출하기 위해서는 집합체 입구에서 냉각재 유량을 적절하게 분배해 주어야 한다. 각 집합체에 분배될 유량은 노심 입구 플레넘 부분에서의 노즐과 오리피스 장치의 조합에 의하여 조절된다. 이러한 장치들은 일단 설계·제작되어 장전되면 운전기간 중에는 유량을 변화시켜 가면서 조절할 수 없다. 또한, 기계적으로 한계가 있어 미세한 유량을 정밀하게 조절할 수가 없다. 따라서, 각 집합체 분배되는 유량은 핵연료가 노내 장전기간 중에 생성하는 발열량의 최대값을 고려한 유량이 되어야 한다. 유량분배는 경제성과 효율성을 고려하여 각 집합체의 필요 유량을 크기에 따라 몇 개의 그룹으로 나누고 그 유량을 각 집합체에 분배하는 방법을 이용하고 있다. 이렇게 분배된 유량에 따라서 노심내의 온도분포를 계산하게 된다. 한편, 집합체간의 갭과 제어봉, 반경방향 차폐체 등의 저발열부에서는, 현재의 개념설계 단계에서는 실제적인 계산을 수행하지 않는다.

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, 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 겹과 제어봉, 반경방향 차폐체 등의 저발열부에서는, 실제적인 계산을 수행하지 않으며, 일반적으로 총유량의 1.5% 정도를 할당하게 된다[7].

노심내 집합체별 온도분포

위와 같이 하여 노심내 집합체별로 분배된 유량에 따라 집합체별 피복관 중심 최고 온도를 계산하여, 그 온도가 설계제한값 내에 있는지 확인하는 반복 계산을 통하여 그룹별로 필요 유량이 결정된다. 핵연료 피복관이 손상될 확률이 모든 집합체에서 일정하도록 해주는 것이 중요하기 때문에, 온도계산시에는 일반적으로 각 집합체에서 최고 선출력을 갖는 연료봉의 피복관 중심온도를 같게 하는 제한조건을 적용하여 계산을 수행한다. 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 제한조건 만족 여부를 확인하게 된다. 각 부분에서의 온도를 계산할 때에는 각 단계마다 실제로 계산된 정규(nominal)값에 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 °C, 집합체 출구온도를 593°C, thermal striping 온도를 205 °C, 핵연료 표면온도를 704 °C, 그리고 연료봉 중심온도를 927 °C로 사용하고 있다[7].

2.3 열유체 설계 특성 및 비교·분석

각각의 설계 노심에 대한 유량배분 및 최고온도 계산 결과는 표 2, 그림 3에 U 금속연료 노심을, 표 4, 그림 5에 증식특성 노심을, 표 6, 그림 7에 breakeven 노심을 각각 나타내었다.

노심내 유량분배 결과

표 2에서 보듯이 U 금속연료 노심은 저농축 핵연료 노심에 2개, 고농축 핵연료노심에 4개, 반경방향 블랑켈에 3개의 유량그룹이 배분되어, 97.07 설계 노심의 각각 4개, 6개, 4개씩의 유량그룹에 비해 같은 출력임에도 유량그룹이 5개가 감소하였다. 전체적으로

97.07 설계 노심에서 16개 었던 유량그룹이 U 금속연료 노심에서는 11개의 유량그룹으로 대폭 감소되었다. 출력이 평탄화됨에 따라 반경방향 블랑켈의 유량비율도 5.1 %에서 6.83 %로 증가하였다. 집합체 유량의 최고값은 26.2 kg/s에서 23.7 kg/s 로 낮아졌으며, 이에 따라 최고 유량을 갖는 집합체의 평균 유속은 4.26 m/s에서 4.05 m/s 로 낮아졌고, bundle 내 압력강하는 0.21 MPa에서 0.18 MPa로 낮아졌다.

표 4에 나타낸 바와 같이 증식특성 노심은 핵연료 집합체 부분에 3개, 내부 블랑켈 집합체 부분에 2개, 반경방향 블랑켈 부분에 7개 등 총 12개의 유량그룹으로 나뉘어, U 금속연료 노심에서와 거의 같은 그룹 개수로서 전체적으로 유량그룹 부분에서는 비슷한 양상을 보였다. 그러나, 노심 중앙부분에서의 출력이 높아짐에 따라 집합체 유량의 최고값은 21.6 kg/s에서 39.8 kg/s 로 매우 높아졌으며, 이에 따라 최고 유량을 갖는 집합체의 평균 유속은 4.05 m/s에서 6.42 m/s 로 높아졌고, bundle 내 압력강하는 0.18 MPa 에서 0.42 MPa 로 매우 증가하였다.

표 6에서 보듯이 breakeven 노심의 유량그룹이 핵연료집합체 부분에 3개, 내부 블랑켈 집합체 부분에 2개, 반경방향 블랑켈 부분에 4개 등 총 9개의 유량그룹으로 나뉘어, 증식 특성 노심에서와 비교하면 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 열유체 특성은 향상되었음을 알 수 있다.

노심내 온도분포 계산 결과

표 2에서 알 수 있듯이 피복관 중심에서의 2 σ 온도가 U 금속연료 노심에서는 628 °C로서 97.07 설계 노심에서의 654 °C보다 26 °C가 낮아졌으며, 이에 따라서 핵연료봉 내의 모든 온도들이 전체적으로 그 만큼 낮아졌다. 이 계산값들은 유량영역 중에서 가장 높은 출력을 갖는 연료봉의 2 σ 값에 해당하는 온도이다. 표에서 나타낸 계산값들은 유량영역 중에서 가장 높은 출력을 갖는 연료봉의 2 σ 값에 해당하는 온도이며, 각각 다음과 같은 의미를 갖기에 중요한 값들이다. 집합체 출구온도는 노심 상부구조의 열에 의한 노화에 영향을 주는 온도이며, thermal striping 온도는 노심 상부구조의 열피로에 영향을 주는 값이다. 피복관 표면온도는 공융(liquefaction)[7]에 그리고 핵연료 중심 온도는 핵연료의 용융에 영향을 미치는 값들이다.

표 4에 나타낸 바와 같이 증식특성 노심의 경우 피복관 중심에서의 2 σ 온도가 628 °C로서 U 금속연료 노심에서와 같게 조절이 가능하였다.

표 6에서 알 수 있듯이 breakeven 노심의 경우에도 피복관 중심에서의 2 σ 온도가 제한 값인 630°C 이하이지만 현재로는 온도의 여유가 거의 없는 수준이기 때문에, 추후 설계 최적화 작업을 수행할 경우에는 이 온도의 여유가 높아지도록 하는 방향으로 작업을 수

행하여야 할 것이다.

그림 3, 그림 5 및 그림 7은 노심내 집합체별 최종 유량분배 및 그에 따른 온도분포 계산결과를 집합체의 위치, 집합체의 종류, 유량그룹, 집합체 출력, 출구온도 값 등에 대하여 나타낸 것이다. 또한, 표 6 및 그림 8과 그림 9에는 breakeven 노심의 BOC1과 EOC1 노심에 대한 계산결과도 함께 나타내었다.

설계특성 및 비교·분석

모든 설계에서 핵적 특성은 우수하게 나타났으며, 특히 음의 소듐 void 반응도가를 가짐으로써 노심안전성 확보 측면에서 매우 양호함을 보였다[3,4,5]. 그러나 열유체 특성분석 결과 U 금속연료 노심이 97.07 설계 노심에 비해 노심내 출력분포가 더욱 평탄화 되어, 노심 유량영역은 16개에서 11개로 감소되었고, 그에 따른 온도계산에서도 피복관 중심에서의 2 σ 온도가 654 °C에서 628 °C로 낮아지는 등 매우 향상되었다. 97.07 설계 노심에서 종합적으로 지적되었던 노심내의 출력 평탄화와, 반경방향 블랑켈 영역의 출력분율의 증대가 U 금속연료 노심에서는 대부분 해결되었다.

증식특성 노심에서는 12개의 유량그룹으로, U 금속연료 노심에서는 11개의 유량그룹이 분배되어 비슷한 그룹으로 분배되었다. 또한, 피복관 중심 온도도 비슷한 값으로 설계제한값 내에서 일정하게 유지할 수 있었다. 이것은 핵연료 및 노심 핵계산 작업과의 연계를 통해서 노심 설계를 최적화시키는 작업을 지속적으로 수행해 온 결과로서 이전의 설계 노심에 비해 많은 향상을 가져온 것으로 볼 수 있다. 특히, 증식특성 노심의 최적화 작업을 위하여 많은 핵연료 및 핵계산 작업과의 연계 계산을 수행하였는데, 그에 대한 상세한 기술은 증식특성 노심 개념설계의 세부사항과 함께 증식특성노심 설계분석 보고서[4]에 자세히 기술되어 있다.

열유체 특성분석 결과 반경방향 비균질 노심인 증식특성 평형노심이 균질노심인 U 금속연료 노심에 비해 노심 중앙부에서 더 많은 유량이 필요하게 되어 노심에서의 압력손실이 그만큼 증가하는 것 외에는 큰 차이를 보이지 않았다.

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, 이 부분에서의 출력평탄화가 많이 이루어진 것을 알 수 있다. 또한, 피복관 중심 온도를 제한치인 630°C이하로 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.

열유체 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 bundle 내 압력강하가 매우 감소한 것 외에는 큰 차이를 보이지 않아 열유체 특성이 향상되었음을 알 수 있다.

3. 결론

전기출력 150 MWe(열출력 392 MWth)의 U-Pu-10%Zr 삼원합금 핵연료 사용 소형노심인 액체금속로 KALIMER 증식특성 노심 및 breakeven 노심, 그리고 U-Zr 이원합금 핵연료 사용 U 금속연료 노심에 대하여 정상상태 열유체 설계 특성과 그 분석 결과를 기술하였다. 특히, breakeven 노심의 경우에는 BOC1과 EOC1 노심에 대한 계산 결과도 함께 기술하였다.

모두 핵적 특성은 우수하게 나타났으며[4], 특히 U 금속연료 노심은 음의 소듐 void 반응도가를 가짐으로써 노심안전성 확보 측면에서 매우 양호함을 보였다[3]. 열유체 특성 분석 결과 반경방향 비균질 노심인 증식특성 평형노심이 균질노심인 U 금속연료 노심에 비해 노심 중앙부에서 더 많은 유량이 필요하게 되어 노심에서의 압력손실이 그만큼 증가하는 것 외에는 큰 차이를 보이지 않았다.

계산 방법은 GE와의 공동작업으로 수행하였던 840 MWth의 이중탱크 풀형인 MDP 노심 분석의 경우와 같은 방법으로서[7], 현재 KALIMER 개발의 개념설계 초기 단계에서 사용하고 있는 냉각재 유량배분 계산 모듈 ORFCE-F, 유량배분에 따른 온도계산 모듈 ORFCE-T를 각각 사용하였다. 개념설계 초기 단계에서 계산된 집합체의 유량분포나 온도분포는, 다음 단계 계산에서 SLTHEN 코드[8] 및 현재 개발중에 있는 부수로 해석용 코드 MATRA-LMR[9,10,11]을 사용하여 좀 더 상세한 계산을 수행하게 된다. SLTHEN 코드는 에너지 방정식을 이용하여 집합체의 온도분포를 계산하는 SUPERENERGY-2 코드를 기초로 하여 작성되었으며, MATRA-LMR 코드는 COBRA-VI-I를 기본으로 하여 경수로 해석을 위해 개발하고 있는 MATRA 코드를 액체금속로 전용으로 개량·개발하고 있는 부수로 해석코드이다. 이 코드들을 이용하여 노심 전체에 대한 온도분포 계산과 단일 집합체에 대한 상세한 부수로 해석을 수행할 예정이다.

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 Equilibrium 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] OECD, “Physics of Plutonium Recycling, Volume V, Plutonium Recycling in Fast Reactors,” p. 14, OECD (1996).
- [7] D. H. Hahn, et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995).
- [8] 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).
- [9] W. S. Kim et al., “Development of a Subchannel Code for LMR Core Thermal Hydraulic Analysis”, ICON-8, April 2-6 2000, Baltimore (2000).
- [10] W. S. Kim et al., “Inter-Assembly Heat Transfer Modeling for the Development of LMR Core Subchannel Code”, NTHAS2, KNS/AESJ (2000)
- [11] 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)

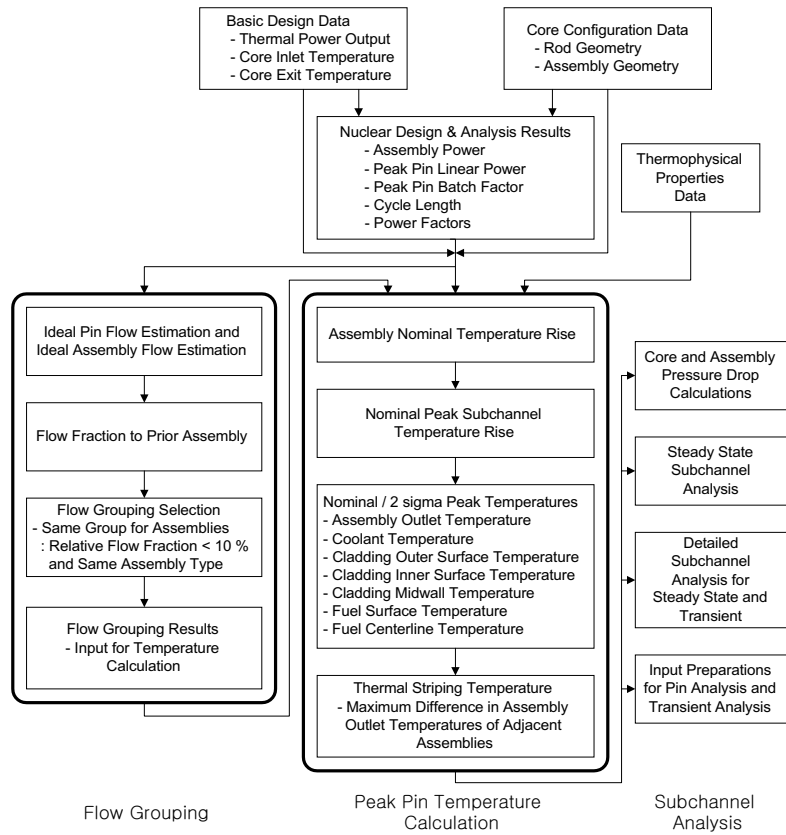


그림 1 액체금속로 노심 열유체 개념설계 및 특성분석 작업 흐름도

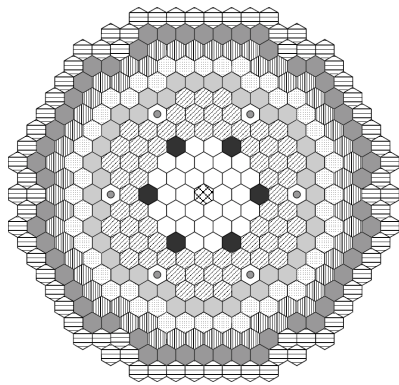


그림 2 U 금속연료 노심 배치도

표 1 U 금속연료 노심 설계사양

Inner Core	30	Core Thermal Output (MWth)	392.2
Outer Core	66	Core Electric Power(MWe)	150.0
Radial Blanket	42	Net Plant Thermal Efficiency(%)	38.2
Control Rod	6	Core Inlet/Out Temperature(°C)	386.2/530.0
USS	1	Total Flow Rate (kg/s)	2143
GEM	6	Active Core Height (cm)	100.0
Reflector	48	Core Diameter (cm)	344.73
BC Shield	54	Core Configuration	Radial Homogeneous
IVS	54	Number of Core Enrichment Zones	2
Shield	72	Feed Fuel Enrichments (w/o%) (IC/OC)	14.41/20.00
	379	Fuel Form	U-10%Zr Binary Alloy
		Refueling Interval (months)	12
		Refueling Batches (Driver/R. Blanket)	3/6
		Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	1498
		Pins per Fuel Assembly (Driver/R. Blanket)	271/217
		Pin Outer Diameter (Driver/R. Blanket) (mm)	7.67/12.0
		Pin P/D Ratio (Driver/R. Blanket)	1.167/1.083
		Average/Peak Fuel Burnup (MWD/kg)	25.35/42.67
		Avg/Peak Linear Power for Driver (BOEC)(W/cm)	160.2/208.5
		Peak Fast Neutron Fluence (>0.1 MeV) (x10 ²⁰ n/cm ²)	1.399
		Cladding Material	HT9

표 2 노심 유량영역 및 최고온도 (2σ) :
U 금속연료 노심

Orifice Group	Assy Type	No. of Assy	Assy Flow (kg/s)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (°C)	Thermal Striping (°C)	Cladding Midwall (°C)
1	IC	6	21.6		575	160	628
2	IC	24	20.4		578	158	628
3	OC	24	23.7		571	148	628
4	OC	12	20.6		561	31	628
5	OC	12	19.2		556	78	628
6	OC	18	15.8	90.7	554	79	628
7	RB	12	4.6		508	78	628
8	RB	18	3.3		501	79	628
9	RB	12	2.7	6.83	498	71	628
10	CTL	6	1.4		397	158	-
11	USS	1	1.4	0.5	393	160	-

Total primary loop flow : 2153 kg/s
Total bypass flow : 2.0 %

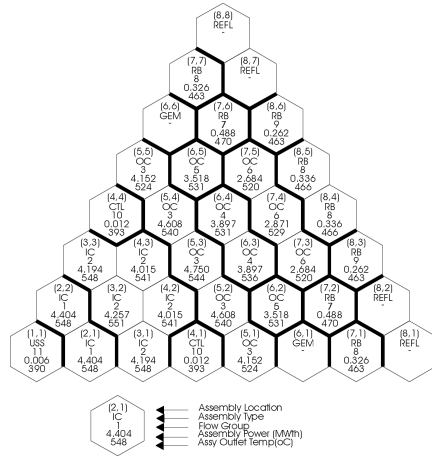


그림 3 유량영역 구분 결과
(1/6 노심) : U 금속연료 노심

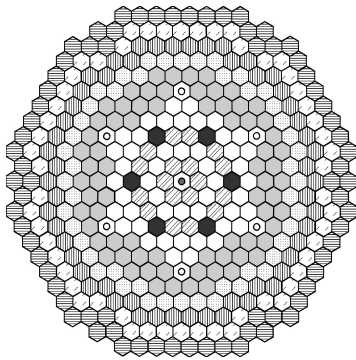


그림 4 증식특성 노심 배치도

표 3 증식특성 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)	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 ²¹ n/cm ²)	2.43
Cladding Material	HT9

표 4 노심 유량영역 및 최고온도 (2σ) :
증식특성 노심

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

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

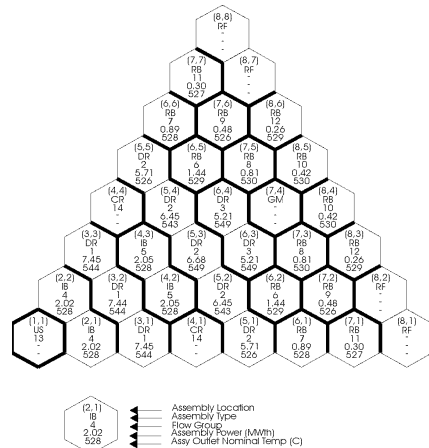


그림 5 유량영역 구분 결과
(1/6 노심) : 증식특성 노심

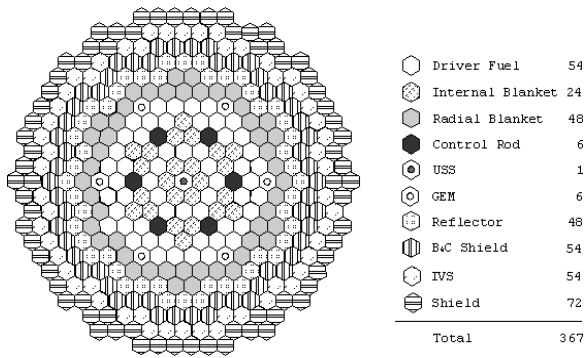


그림 6 Breakeven 노심 배치도

표 5 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 ¹⁹ n/cm ²)	2.41
Cladding Material	HT9

표 6 노심 유량영역 및 최고온도 (2σ) : Breakeven 노심

Flow Group No.	Assy Type	No. of Assy	Assy Flow (kg/s)	Group Flow (kg/s)	Zone Flow (%)	Assy Outlet Average (°C)			Cladding Midwall (2σ) (°C)		
						Equil	BOC1	EOC1	Equil	BOC1	EOC1
1	DR	12	35.0	477	77.0	546	547	540	629	632	620
2	DR	18	32.2	833		547	553	539	629	640	618
3	DR	24	27.2	324		548	561	545	629	651	626
4	IB	18	10.2	72	11.0	527	467	525	629	515	625
5	IB	6	9.4	150		528	475	524	628	526	621
6	RB	18	5.9	104		530	475	485	629	513	549
7	RB	12	5.1	32	10.0	528	455	484	627	510	549
8	RB	6	3.4	57		528	446	479	627	489	545
9	RB	12	2.3	35		525	438	472	620	475	530

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

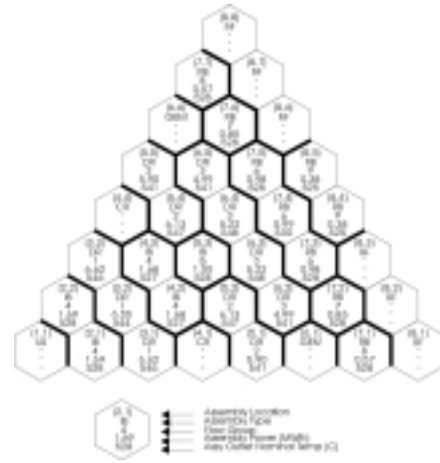


그림 7 유량영역 구분 결과 (1/6 노심) : BRK 평형노심

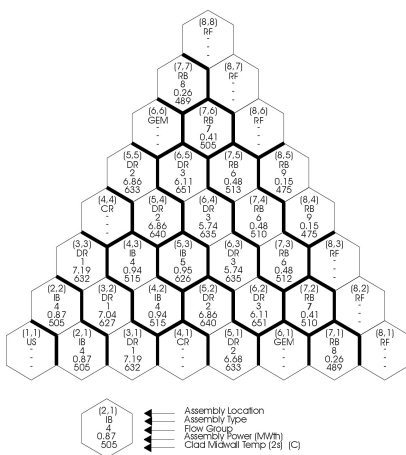


그림 8 유량영역 구분 결과 (1/6 노심) : BRK BOC1 노심

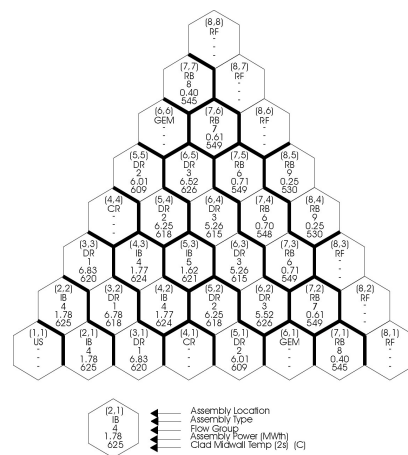


그림 9 유량영역 구분 결과 (1/6 노심) : BRK EOC1 노심