

액체금속로 KALIMER 개념설계 노심 및 집합체 열유체 특성 분석

임현진 · 김영균* · 김영일* · 오세기

아주대학교, *한국원자력연구소

E-mail : ex-hjlim@Kaeri.re.kr

Thermal-Hydraulic Performance Analysis of KALIMER Conceptual Design Cores and Subassemblies

Hyun-Jin Lim, Young-Gyun Kim*, Yeong-Il Kim* and Se-Kee Oh

Ajou University

*Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

액체금속로 노심 열유체 설계의 기본 목표는 노심을 구성하는 집합체에서 발생하는 열량을 효과적으로 추출하기 위해 각각의 집합체 냉각재 유량을 적절히 분배하고, 이에 따른 온도분포가 적절하게 유지되도록 하는 것이다. 노심 열유체 설계 및 특성 분석은 전체노심에 대한 각 집합체의 유량영역을 구분하고, 집합체별 온도분포를 계산하여, 최종적으로 집합체에 대한 상세 부수로 해석을 하는 과정으로 진행된다. 본 논문에서는 이러한 액체금속로의 노심 열유체 설계 방법론을 기술하고, 이를 바탕으로 KALIMER의 증식특성 노심과 breakeven 노심에 대한 열유체 설계와 특성분석을 수행하였다. KALIMER는 원자력 중장기 과제로 개념설계가 진행 중인 전기출력 150 MWe, 열출력 392 MWth의 금속핵연료를 사용하는 액체금속로이다.

Abstract — The main purpose of a liquid metal reactor core thermal-hydraulic design is to efficiently extract the core thermal power by distributing the appropriate sodium coolant flow according to the power distribution in the core. The thermal-hydraulic design procedure consists of the coolant flow distribution to the subassemblies, the coolant/fuel temperature calculations and detailed subchannel analysis. This paper describes the LMR core thermal-hydraulic design methodology and summarizes the major design and analysis results of KALIMER breeder and breakeven cores and subassemblies. KALIMER is a 150 MWe rated (392 MWth) heterogeneous core with U-TRU-Zr ternary alloy fuel and sodium coolant.

1. 서 론

KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor) 설계개념 타당성 연구 결과에 따라 노심 규모는 전기출력 150 MWe, 열출력 392 MWth로 설정되어 그에 대한 개념설계가 수행되었다^[1]. KALIMER의 노심으로 선정된 금속핵연료 노심은 과도상태시 양호한 음의 반응도 특성을 가지고 있어 고유안전성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 고연소도에 따른 경제성 향상 및 전식재처리를 통한 핵확산저항성 등의 이점을 가지고 있는 것으로 나타났다.

KALIMER 노심은 개념설계 과정에서 U-Zr의 이원합금 핵연료를 사용하는 금속연료 노심으로 출발하였다^[2]. 그 후, 증식비 1.18의 증식특성을 고려한 노심 개발과 핵확산 저항성을 고려한 증식비 1.05의 breakeven 노심을 개발하도록 하는 계획에 의해, 초기노심의 핵연료로 U-TRU-Zr 삼원합금 핵연료를 사용하는 비균질 노심으로 변경되었고, 이에 따라 핵-열유체 설계와 그에 대한 특성 분석이 수행되었다^[3].

액체금속로 노심은 일반적으로 삼각형 격자 형태로 장전되어 있는 연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 집합체로 구성되어 있으며, 덕트와 덕트 사이

에는 유량의 교환이 없는 폐쇄회로를 형성하고 있다. 따라서 이들 집합체에서 발생하는 열량을 효과적으로 추출하기 위해서는 각각의 집합체에 흐르는 냉각재 유량을 적절하게 분배하고, 그에 따른 온도분포를 적절하게 유지시키는 것이 열유체 설계의 기본 목표이다.

또한, 열유체 설계를 바탕으로 수행하게 되는 상세 부수로 해석에서 블랭킷 집합체와 핵연료 집합체로 구성되어 있는 비균질 노심에 대한 집합체간 열전달 현상은 집합체내에서의 정확한 온도 및 유량분포를 예측하는데 반드시 고려되어야 한다.

본 논문에서는 액체금속로의 노심 열유체 설계 방법론과 이를 바탕으로 수행한 KALIMER의 증식특성 노심과 breakeven 노심의 열유체 설계 특성을 분석하였으며, 부수로 해석코드 MATRA-LMR을 이용한 노심 집합체의 상세 온도 분포 해석 결과를 기술하였다.

2. 액체금속로 노심 열유체 설계 방법론

2-1. 노심 열유체 설계 방법론 개요

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로 노심의 핵연료

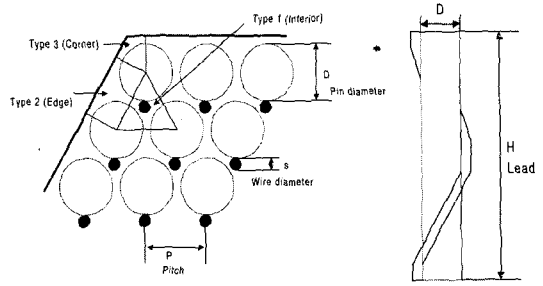


그림 1. 집합체의 부수로 형태 및 Wire-wrap 형상.

집합체는 그림 1과 같이 일반적으로 삼각형 격자 형태로 장전되어 있는 핵연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 형태로 구성되어 있다. 따라서, 덕트와 덕트 간에 열교환은 발생하지만 유량 교환은 이루어 지지않는 폐쇄회로를 형성하게 된다. 그러므로, 이들 각각의 집합체에 흐르는 냉각재 유량을 적절하게 분배하고, 그에 따른 온도분포를 적절하게 유지시키면서 발생하는 열량을 효과적으로 추출하도록 하는 것이 액체금속로 노심 열유체 설계의 기본 목표가 된다^[4].

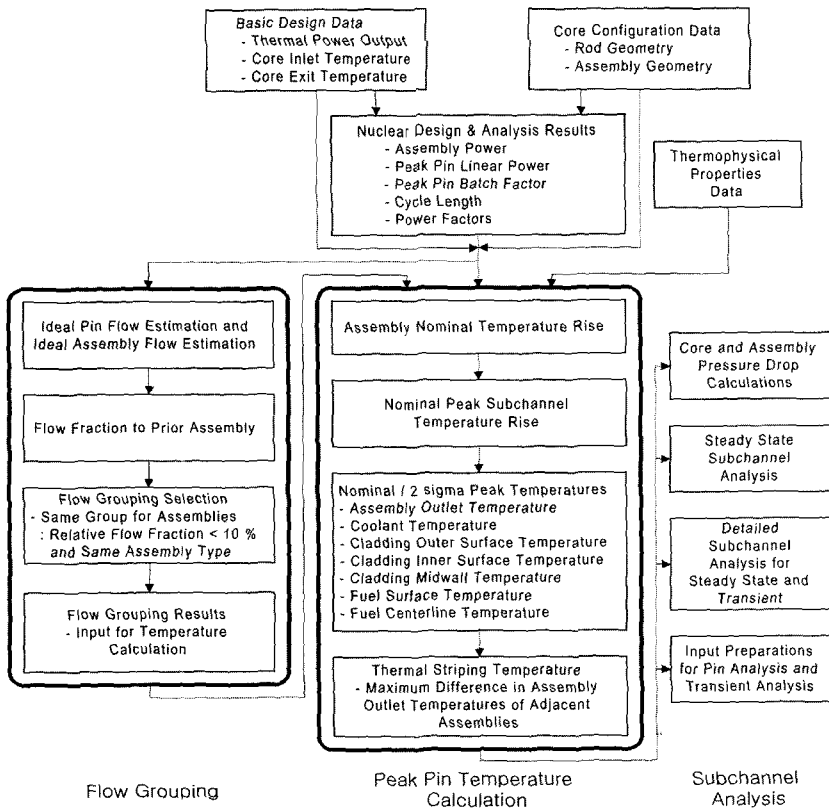


그림 2. 액체금속로 노심 열유체 개념 설계 및 분석 흐름도.

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 열유체 해석, 과도상태 열유체 해석, 안전해석 연계자료 제공의 흐름에 따라서 진행하게 된다. 그림 2는 이와 같은 노심 열유체 설계의 흐름도를 나타낸 것이다.

개념설계 단계에서 열유체 설계 및 특성 분석은 먼저 노심 열유체 설계 목표에 따라 노심내 전체유량을 계산한 후, 각 집합체별 열출력과 그 집합체에서의 핵연료봉 최고 선출력 밀도에 따라 각 집합체에 요구되는 유량을 계산하여, 이들을 몇 개의 유량그룹으로 나눈다. 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 동일하도록 유량을 재조정하며, 이 유량에 의한 노심내 압력손실을 비롯한 모든 계산 결과들이 설계조건을 만족하는지를 확인하고, 그에 따른 집합체별 유량을 결정하여 유량분배 장치인 오리피스를 구성하게 된다. 이러한 일련의 해석 절차는 노심 핵설계 및 안전성 분석과 연계되어 반복 수행하며, 최종적으로 핵열수력 안전성 분석을 통하여 검증하게 된다.

2-2. 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 유량 조절이 불가능하다. 또한, 기계적인 한계에 의해 미소한 유량을 정밀하게 조절할 수도 없다. 따라서, 각 집합체의 유량은 핵연료가 노내 장전기간 중에 생성하는 발열량의 최대값을 고려하여 분배되어야 한다.

유량분배는 경제성과 효율성을 고려하여 각 집합체의 필요 유량을 몇 개의 그룹으로 나누고 그 유량을 각 집합체에 분배하는 방법으로 수행한 후, 이 유량에 따라서 노심내의 온도분포를 계산하게 된다. 이를 위해서는, 핵설계 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 처리하는 방법을 사용한다. 그림 3은 노심 출력분포에 따른 집합체의 유량분배 개념을 설명한 것이다.

그러나, 집합체의 종류가 달라지면 비록 유량이 같아

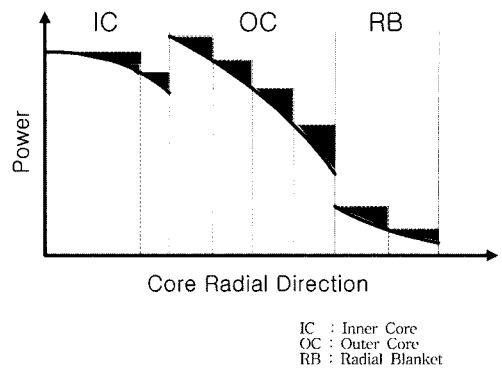


그림 3. 액체금속로 노심의 유량 분배 개념.

고 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 단계에서는 이들 집합체에 대한 유량분배 계산을 수행하지 않으며, 이들 집합체에 대하여는 추후에 상세 해석 단계에서 감마가열을 고려하여 유량분배를 실시하게 된다.

2-3. 노심 집합체별 온도분포

노심 전체에 요구되는 유량을 기준으로 각 집합체별로 분배될 유량이 결정되면, 이를 기준으로 집합체별 피복관 중심 최고 온도를 계산하여, 그 온도가 설계제한 값 내에 있는지 확인하는 반복 계산을 수행한 후 그룹별로 필요한 유량을 결정한다. 이 때, 핵연료 피복관의 손상 확률이 모든 집합체에서 일정하도록 해주는 것이 중요하기 때문에, 일반적으로 각 집합체에서 최고 선출력을 갖는 연료봉의 피복관 중심온도를 같게 하는 제한 조건을 적용한다. 그러므로, 계산된 유량에 대한 집합체별 냉각재 온도분포, 핵연료 피복관 중심 온도 및 최고 thermal striping 온도 등이 제한조건을 만족하는지 확인한다. 각 부분에서의 온도를 계산할 때에는 각 단계마다 실제로 계산된 정규값에 설계 및 계산에 의한 불확정성 인자들인 HCF(hot channel factor)를 고려하여 2σ 값을 구하게 된다. 일반적으로 이렇게 계산된 집합체별 온도는 최종적으로 확인하게 될 상세한 해석 결과 보다 매우 보수적인 값을 갖게 된다. 따라서, 노심의 집합체의 상세한 온도분포의 해석은 최종적으로 부수로 해석법을 사용한 결과로 확인하게 된다. 액체금속로 개념설계에서 일반적으로 사용하는 설계 제한값은 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^{[4][5]}.

3. 집합체별 상세 부수로 해석

3-1. 액체금속로 부수로 해석 코드 MATRA-LMR

MATRA-LMR은 COBRA-IV_i를 바탕으로 개발한 경수로 부수로 해석용 MATRA를 기본으로 소듐의 물성치, 열전달 상관식 및 압력강하 상관식 등을 추가, 보완하여 액체금속로 노심의 집합체 해석을 위해 개발한 코드이다^[6].

부수로 해석법은 냉각재의 축방향 유속이 반경방향 유속에 대해 지배적이라는 가정에서 그 모델을 수립한 것이다. 따라서, 이러한 조건 하에서 반경방향 운동량 방정식에 가정을 도입하여 계산식을 단순화시킬 수 있는 것이다. 그림 4와 그림 5는 부수로 해석에 사용된 control

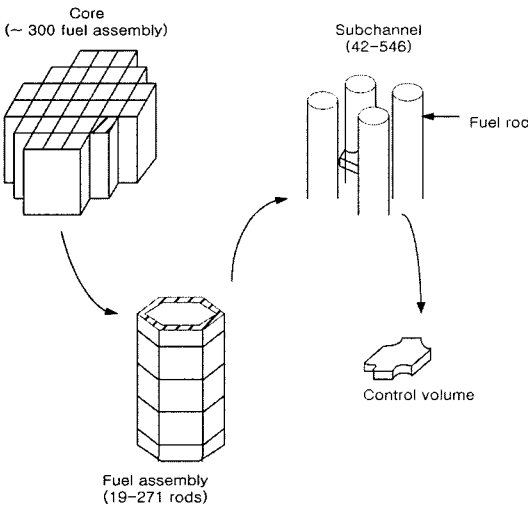


그림 4. 부수로 control volume.

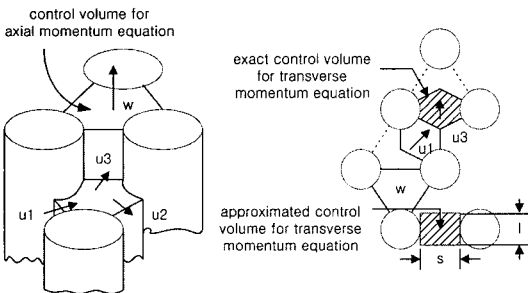


그림 5. 축/반경 방향 운동량을 위한 control volume.

volume에 대한 정의와 축방향 및 반경방향 운동량 방정식에 적용된 control volume의 예를 나타낸 것이다^[7].

3-2. 부수로 해석법을 이용한 집합체간 열전달 모델

MATRA-LMR 코드의 집합체간 열전달 모델은 열전도도가 큰 소듐 냉각재에 의한 집합체간 열전달 현상, 특히 주변 집합체가 열출력 차이가 큰 블랭킷 집합체와 핵연료집합체로 구성되어 중심 집합체의 내부 부수로 온도분포에 영향을 크게 줄 것으로 예상되는 비균질 노심 의 경우까지 해석이 가능하도록 개선한 것이다^{[8][9]}.

현재 MATRA-LMR코드에서 사용하고 있는 집합체간 열전달 모델 개념을 그림 6에 나타내었다. 이러한 집합체간 열전달 해석모델의 개념은 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- 해석 대상 집합체는 표준 집합체 1개와 6개의 주변 집합체들로 구성된다.
- 집합체 덕트 사이의 저유동 소듐은 열전도 현상으로 취급한다.
- 전 집합체에 동일한 축방향 node 개수를 사용한다.
- 반경방향 온도분포 및 wire-wrap 사용은 표준 집합체에서만 고려한다.

- 단상유동(single phase) 모델에만 적용 가능하다.
 집합체내 가장자리 부수로와 덕트벽 사이에서의 대류 열전달은 난류유량 열전달 데이터로부터 구해지며, 주변에 접한 집합체의 사이에 있는 소듐에 의한 열전달은 열전도를 고려하여 얻어진다. 즉, 집합체 사이의 소듐 유동은 그 양이 집합체내 유량에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 벽 node에서의 축방향 대류 및 반경방향 유량혼합에 의한 항을 열전도 현상으로 단순화하여 모델링 한 것이다. 따라서, 집합체간 소듐 유동에 대해서도 덕트벽과 같이 열전도에 의한 저항값으로 보고 벽 node에서의 열전달은 이 세개의 열 저항값으로 구성되며, 마찬가지로 벽 node의 유효 열저항값도 두개의 덕트벽과 그 사이 소듐의 조합으로 구해진다. 또한, 집합체 모델은 계산시간을 고려하기 위해 중앙의 표준 집합체에 대해서만 실제 핵연료봉 개수와 이에 대한 부수로를 적용하여 계산을 수행하고, 주변 집합체에 대해서는 집합체의 출력에 비례하여 핵연료봉 개수를 줄인 lumped model로 취급하도록 하였다.

그림 6과 같은 덕트와 덕트 사이의 열전달 모델에 대한 에너지 방정식은 식(1)과 같다.

$$(\rho_w C_{pw} t_w) \frac{(T_w - T_w^0)}{\Delta t} = -U_i(T_w - T_i) - U_j(T_w - T_j) + q_w'' t_w \quad (1)$$

[총열량]=[부수로 i로부터 전달된 열량]
 +[부수로 j로부터 전달된 열량]+[덕트벽내 열발생량]

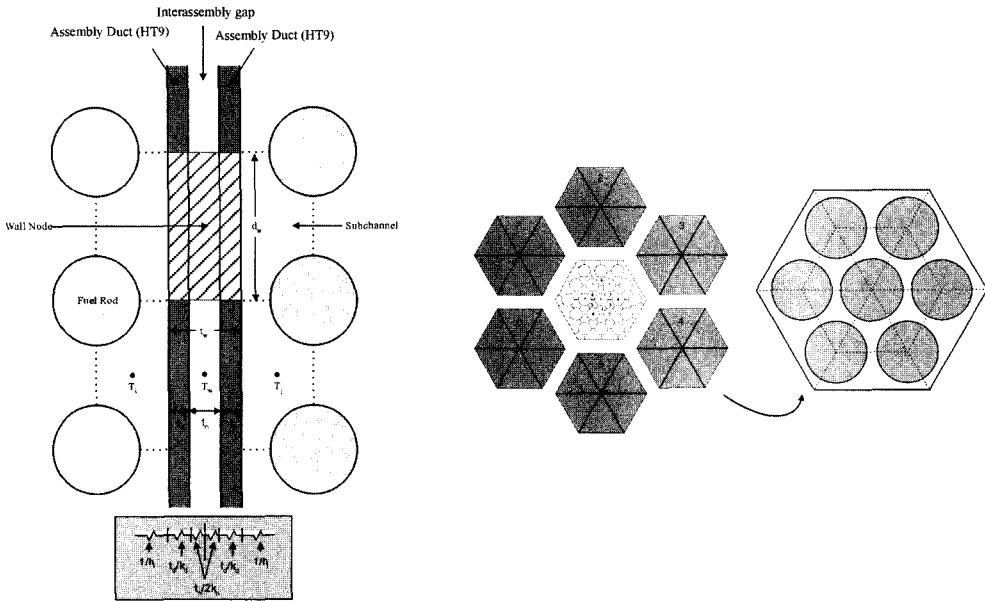


그림 6. MATRA-LMR 코드의 집합체간 열전달 모델 개념.

또한 부수로 i와 j에 대한 유효열전달계수 U_i 와 U_j 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{t_d}{k_d} + \frac{t_n}{2k_n} \quad (2)$$

$$\frac{1}{U_j} = \frac{1}{h_j} + \frac{t_d}{k_d} + \frac{t_n}{2k_n} \quad (3)$$

여기서,

h_i, h_j = 부수로 열전달 계수

k_d = 덕트의 열전도도

k_n = 소뿔의 열전도도

$1/(t_d/k_d)$ = 덕트벽 열전도

$1/(t_n/2k_n)$ = 집합체 사이 ($t_n/2$)에 있는 소뿔의 열전도

$(\rho_w C_{pw} t_w)$ = 덕트벽 유효열용량

t_w = 덕트벽 두께 ($2t_d + t_n$)

t'_w = 덕트벽 유효 열발생 두께 ($2t_d$)

4. 노심 및 집합체의 열유체 설계특성 분석

4-1. 노심 구성 및 특성

그림 7과 8 및 표 1과 2는 정상상태의 증식특성 노심과 breakeven 노심의 배치도와 설계사양을 나타낸 것이다. breakeven 노심은 증식특성 노심의 설계 제한을 기준으로 하여 증식특성 노심에서 breakeven 노심으로 설계가 변경된 영향을 최소화하기 위해, 노심 전체의 크

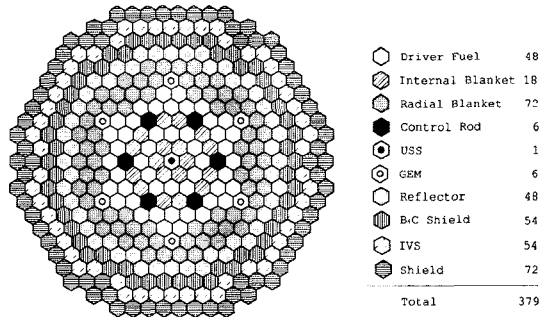


그림 7. 증식특성 노심 배치도.

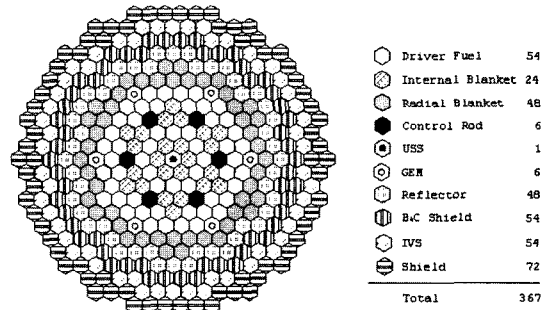


그림 8. Breakeven 노심 배치도.

기 및 집합체 덕트와 핵연료봉에 대한 열유체 측면의 기하학적 규모의 차이가 크지 않도록 설계되었다.

표 3. 증식특성 노심 유량영역 및 최고 온도(2σ 불확정성 인자 적용).

Assembly type	Flow group	No. of assy.	Assy. flow (kg/s)	Zone flow (%)	Assy outlet (°C)	Thermal striping (°C)	Claddwall (°C)	Fuel surface (°C)	Fuel center (°C)
Driver	1	12	39.80	65.3	544	174	624	576	828
	2	24	34.70		543	167	621	570	793
	3	12	27.00		548	87	627	578	754
Inner blanket	4	6	12.15	12.2	528	136	629	559	741
	5	12	12.50		527	145	627	556	741
Radial blanket	6	12	8.70	19.4	528	105	628	602	696
	7	6	5.30		528	89	627	601	659
	8	12	4.80		530	87	629	630	655
	9	12	2.90		526	31	622	623	630
	10	12	2.45		529	37	629	630	644
	11	6	1.80		526	40	623	624	635
		12	1.55		528	37	627	628	637

Total primary loop flow : 2143 kg/s.

Total bypass flow : 2.0%.

Max. bundle ΔP : 0.426 MPa.

표 4. 증식특성 노심 집합체의 기하학적 제원과 운전조건.

기하학적 제원 및 운전조건	DR 0302 (271 Pin)	RB 0602 (127 Pin)
Active core height, mm	1260.0	1260.0
Fuel pin pitch, mm	8.95	13.07
Wire wrap lead, mm	206.2	301.9
Duct inside flat to flat distance, mm	150.4	150.4
Duct wall thickness, mm	3.72	3.72
Fuel pin outer diameter, mm	7.45	12.08
Wire wrap diameter, mm	1.41	0.96
Cladding thickness, mm	0.55	0.54
Nominal linear pin power, W/m	7420.8	3074.9
Assembly nominal flow rate, kg/sec	39.8	8.7
Assembly coolant inlet temperature, °C	386.2	386.2
Peak coolant outlet temperature, °C	566.2	557.9
Coolant average velocity, m/s	6.426	2.090
Bundle Pressure drop, MPa	0.426	0.059

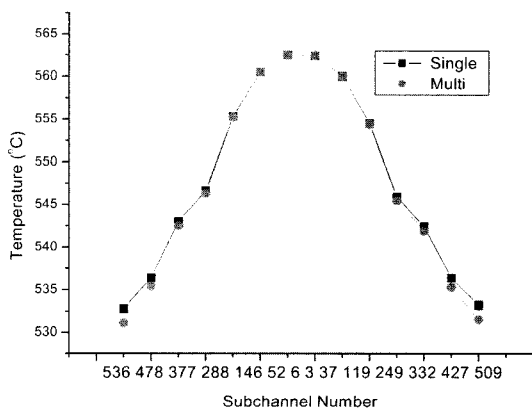


그림 10. 증식특성 노심의 DR 0302 집합체 출구온도 분포.

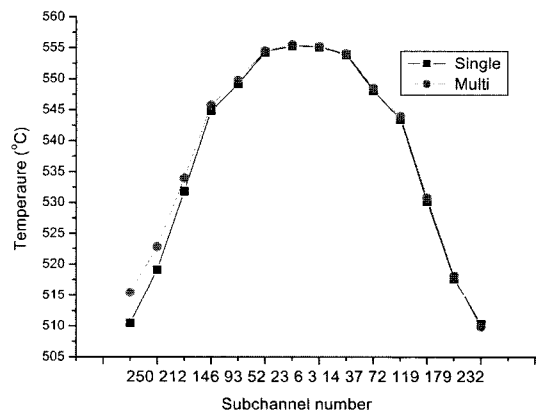


그림 11. 증식특성 노심의 RB 0602 집합체 출구온도 분포.

Pin 집합체이며, 블랭킷 집합체인 IB 0602 집합체는 열출력이 각각 1.44 MWth, 냉각재 유량이 8.7 kg/s인 127 Pin 집합체이다.

그림 10과 11은 부수로 상세 해석 결과인 DR 0302와 RB 0602 집합체의 부수로의 냉각재 출구 온도분포를 나타낸 것이다. 증식특성 노심의 구동 핵연료 집합체인 DR 0302의 중심 부수로의 최고 출구 온도는 562.5°C로 계산되었으며, 블랭킷인 IB 0602 집합체 중심 부수로의 최고 온도는 555.3°C로 계산되었다.

주변집합체를 고려한 계산결과는 주변집합체가 중심 집합체 외곽면에 대해 거의 동일한 열출력 규모를 갖는 집합체들로 대칭을 이루고 있으므로 중심부수로 온도는 거의 차이가 없으며, 최외곽 부수로에서도 큰 온도차를 반영하지 않는 것으로 나타났다.

4-3. Breakeven 노심 및 집합체의 열유체 설계특성 분석

그림 12, 13 및 14는 breakeven 노심의 평형, 1주기 초(BOC1), 1주기 말(EOC1) 노심에 대한 집합체별 최종 유량분배 및 그에 따른 온도분포 계산 결과를 집합체 위치, 종류, 유량그룹, 집합체 출력, 출구온도 값 등에 대하여 나타낸 것이다. 또한, 표 5는 각 주기별 노심에 대한 유량 그룹 및 최고 온도 계산 결과를 정리한 것이다.

표 5에서 보듯이 breakeven 노심의 유량그룹은 핵연료집합체 부분에 3개, 내부 블랭킷 집합체 부분에 2개, 반경방향 블랭킷 부분에 4개 등 총 9개의 유량그룹으로

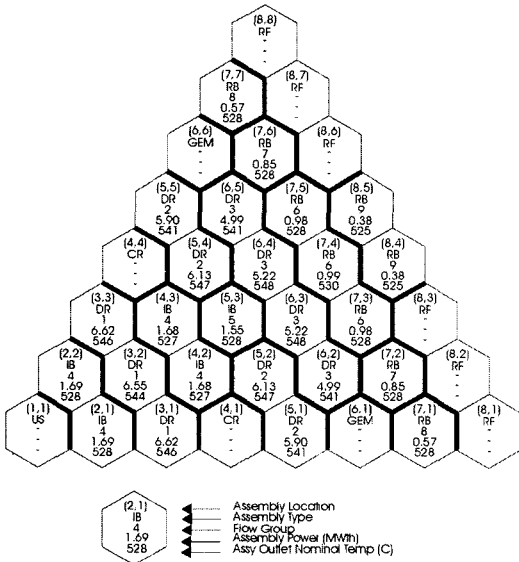


그림 12. Breakeven 평형노심(1/6) 유량영역 구분 결과.

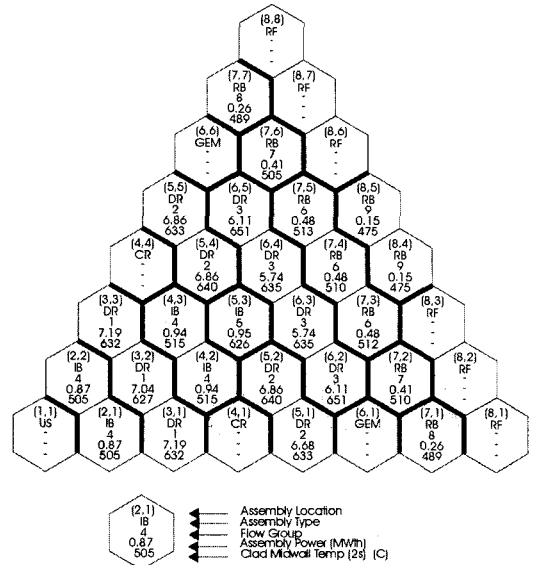


그림 13. Breakeven BOC1 노심(1/6) 유량영역 구분 결과.

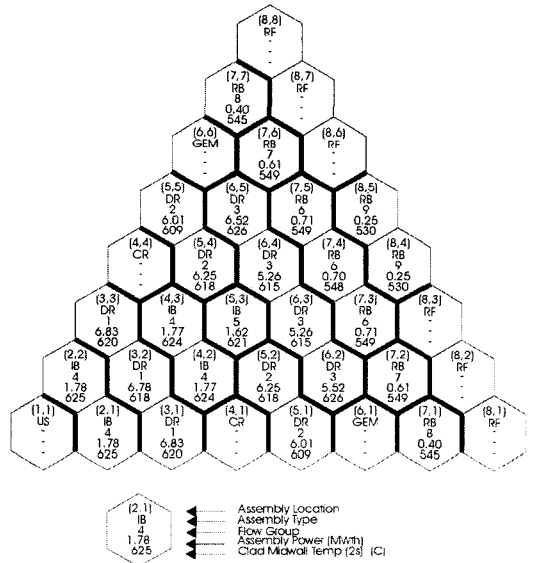


그림 14. Breakeven EOC1 노심(1/6) 유량영역 구분 결과.

나뉘어져 있다. breakeven 노심은 증식 특성 노심에 비해 노심 중앙부분의 출력이 낮아짐에 따라 집합체 유량의 최고값은 39.8 kg/s에서 35.0 kg/s로 매우 낮아졌다. 이에 따라 최고 유량을 갖는 집합체의 평균 유속은 6.42 m/s에서 5.65 m/s로 낮아졌고, 집합체 압력강하는 0.42 MPa에서 0.30 MPa로 매우 감소되었으므로 증식특성 노심에

표 5. Breakeven 노심 유량영역 및 최고온도(2σ 불확정성 인자 적용).

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

Total primary loop flow : 2143 kg/s.
 Total bypass flow : 2.0%.
 Max. bundle ΔP : 0.30 MPa.

표 6. Breakeven 평형노심 집합체의 기하학적 제원과 운전조건.

기하학적 제원 및 운전조건	DR 0302 (271 Pin)	IB 0503 (127 Pin)	RB 0704 (127 Pin)
Active Core height, mm	1050.0	1050.0	1050.0
Fuel pin pitch, mm	8.95	13.07	13.07
Wire wrap lead, mm	206.2	301.9	301.9
Duct inside flat to flat distance, mm	150.4	150.4	150.4
Duct wall thickness, mm	3.72	3.72	3.72
Fuel pin outer diameter, mm	7.45	12.08	12.08
Wire wrap diameter, mm	1.41	0.96	0.96
Cladding thickness, mm	0.55	0.54	0.54
Nominal linear pin power, W/m	7337.9	3698.6	2366.3
Assembly nominal flow rate, kg/sec	35.00	9.40	5.90
Assembly coolant inlet temperature, °C	386.2	386.2	386.2
Peak coolant outlet temperature, °C	566.8	559.3	562.6
Coolant average velocity, m/s	5.651	2.258	1.417
Bundle pressure drop, MPa	0.300	0.06	0.027

비해 열유체 특성은 다소 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

표 6은 상세 부수로 해석을 위한 집합체의 기하학적 제원과 운전조건을 나타낸 것이다. DR 0302 집합체는 열출력 6.55 MWth, 냉각재 유량이 35 kg/Sec인 271 Pin 핵연료 집합체이며, IB 0503 및 RB 0704 집합체는 열출력 및 유량이 각각 1.55/0.99 MWth, 냉각재 유량이 9.40/5.90 kg/Sec인 127 Pin 블랭킷 집합체이다.

이와 같은 Breakeven 노심 집합체의 부수로 온도분포 해석은 평형, 1주기 초기 및 말기에 대해 단일 집합체 및 주변 집합체의 경우 각각 비교하여 수행하였다. 계산 결과를 종합하면, 집합체 부수로의 최고 출구온도는 노심 출력이 가장 큰 평형 노심의 구동 핵연료 집합체에서 564.3°C로 예측되었으며, 주변집합체를 고려하여 비교한 결과, 집합체간 열출력 차이가 가장 큰 1주기 초기 노심에서 최외곽 부수로 온도는 단일집합체 경우보

다 약 15~28°C 범위로 높게 예측하는 결과를 확인하였다. 1주기 초기 노심에서의 계산결과는 집합체 자체의 출력이 낮은 상태에 있기 때문에 전반적으로 낮은 온도로 예측되었고, 집합체간 열전달을 고려한 계산의 경우에도 주변 집합체와의 큰 출력 차이로 인해 주변 부수로의 온도가 큰 폭으로 증가함을 알 수 있었다^[10].

Breakeven 노심의 구동핵연료 집합체인 DR 0302는 중심 부수로의 최고 출구 온도가 약 564.3°C로 계산되었다. 주변집합체를 고려한 경우에도 주변집합체가 중심집합체 외곽면에 대해 거의 동일한 열출력 규모를 갖는 집합체들로 대칭을 이루고 있으므로 최외곽 부수로는 큰 온도차를 나타내지 않았다.

블랭킷 집합체인 IB 0503과 RB 0704 집합체 중심 부수로의 최고 온도는 각각 555.6°C 및 559.6°C로 계산되었다. IB 0503 집합체의 외곽 부수로 온도는 중심집합

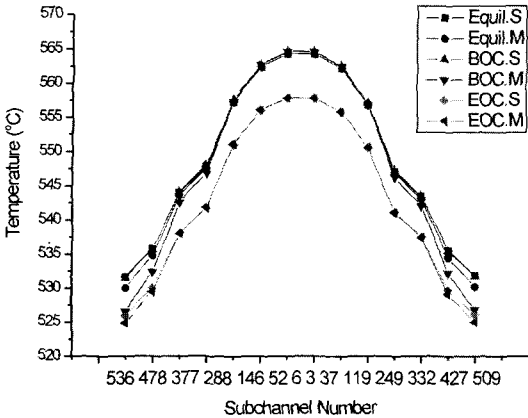


그림 15. Breakeven 노심의 DR 0302 집합체 출구 온도 분포.

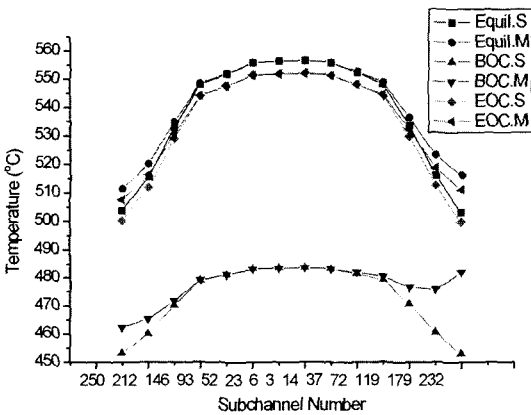


그림 16. Breakeven 노심의 IB 0503 집합체 출구 온도 분포.

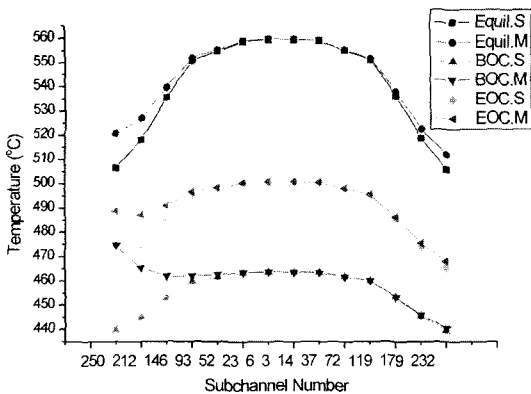


그림 17. Breakeven 노심의 RB 0704 집합체 출구 온도 분포.

체의 외곽면에 대해 열출력이 1.69 MWth인 IB 0403 집합체와 5.22 MWth인 DR 0603 집합체가 대칭이 된 부수로를 대상으로 비교한 결과, 단일 집합체 계산 결과에 비해 집합체 사이의 열전달 효과에 의해 최외곽 부수로 온도가 약 3°C 및 7.4°C 정도로 높게 예측되었다.

RB 0704 집합체의 최외곽 부수로의 경우는 중심집합체의 반대편 외곽면에 대해 열출력 5.22 MWth인 DR 0604 집합체와 0.38 MWth인 DR 0704 집합체가 비교적 큰 차이로 대칭 되었으므로, DR 0604 집합체와 접한 최외곽 부수로 온도가 단일 집합체 계산에 비해 약 6.7°C 정도가 높게 나타났다. 그림 15, 16 및 17은 breakeven 노심의 각 주기별 집합체 부수로 출구 온도분포 계산 결과를 나타낸 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 액체금속로 노심의 열유체 설계 및 해석 방법론을 설명하고, 이를 바탕으로 수행한 KALIMER의 증식특성 노심과 breakeven 노심의 열유체 설계 특성을 분석하였으며, MATRA-LMR 코드를 이용한 부수로 상세 온도 분포 해석 결과를 기술하였다.

개념설계 노심인 증식특성 노심과 breakeven 노심에 대한 열유체 설계 특성을 비교한 결과, breakeven 노심이 증식특성 노심에 비하여 노심 중앙의 출력이 낮아짐에 따라 최고 유량 집합체의 평균 유속 및 압력강하가 낮아짐으로 열유체 특성이 다소 향상된 것으로 나타났다.

MATRA-LMR 코드를 이용하여 부수로 상세 온도분포 해석을 수행한 결과, 부수로 최고 출구 온도는 breakeven 노심의 구동 핵연료 집합체에서 564.3°C로 예측되므로 두 노심은 개념설계의 열유체 설계 제한조건을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 집합체간 열전달 모델을 이용하여 계산한 결과, 집합체간 열출력 차이가 가장 큰 1주기 초기 노심에서 최외각 부수로 온도는 단일집합체 경우보다 약 15~28°C 범위로 높게 예측되었다. 이러한 결과는 주변 집합체간 열출력 차이가 큰 블랭킷 집합체와 핵연료집합체로 구성된 비균질 노심의 경우, 소듐의 높은 열전도도에 의해 중심 집합체의 내부 부수로 온도분포에 집합체간 열전달 영향이 반영되는 것이다.

추후 KALIMER 노심의 열유체 설계는 피복관 온도의 열적 여유도를 높이는 방향으로 진행 될 것이며, 노심 열유체 해석체제는 현재까지 개발이 수행된 부수로 해석코드 MATR-LMR을 다공성 매질 해석 코드와 연계하여 노심 상, 하부 구조물 및 집합체 사이의 냉각재 유동까지 고려할 수 있는 보다 상세한 노심 열유체 해석 체제로 구축될 것이다¹⁴⁾.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박창규 외: “액체금속로 설계개념 연구”, KAERI/RR-1719/96 (1996).
2. 김영인 외: “KALIMER Breeder Equilibrium Core Conceptual Design and Analysis”, LMR/CD120-ER-01 Rev. 0/99, Internal Document, KAERI (1999).
3. 김영인 외: “Nuclear and Thermal-hydraulic Characteristics for KALIMER Breakeven Equilibrium Core”, LMR/CD112-ER-01 Rev. 0/2000, Internal Document, KAERI (2000).
4. Kim, Y.G. *et al.*: “Thermal Hydraulic Conceptual Design of KALIMER Breeder Core with Its Configuration Development”, NTHAS2, KNS/AESJ (2000).
5. Yang, W.S.: “An LMR Core Thermal-Hydraulics Code Based on the ENERGY Model”, Journal of KNS, 29(5), 406 (1997).
6. Kim, W.S. *et al.*: “A Subchannel Analysis Code MATRA-LMR for Wire-Wrapped Liquid Metal Cooled Reactor Subassembly, Annals of Nuclear Energy”, 29(2) (2002).
7. William T. Sha: “An Overview of Rod-Bundle Thermal-Hydraulic Analysis”, ANL-79-10, ANL (1980).
8. Kim, W.S. *et al.*: “Inter-Assembly Heat Transfer Modeling for the Development of LMR Core Subchannel Code”, NTHAS2, KNS/AESJ (2000).
9. George, T.L. *et al.*: COBRA-WC: A Version of COBRA for Single-Phase Multisubassembly Thermal Hydraulic Transient Analysis, PNL-3259, PNL (1980).
10. 임현진 외: “KALIMER Breakeven 노심의 핵연료 집합체 온도분포 해석”, 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (2002).
11. 김영균 외: “액체금속로 전노심 열유체 해석체제 구축방안 연구”, 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (2003).