

## KALIMER 개념설계 노심 핵연료 집합체의 부수로 온도 분포 해석 Temperature Profiles in Subassemblies of KALIMER Conceptual Design Cores

임현진, 오세기

아주대학교

경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5

김영균

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

부수로 해석 코드인 MATRA-LMR을 이용하여 KALIMER 150MWe breakeven 노심과 현재 개념설계의 최적화 작업이 진행중인 600 MWe 핵확산 저항성 신개념 노심의 집합체 온도분포 해석을 수행하였다. 계산결과 150 MWe breakeven 노심의 최고 출구온도는 564.3 °C로 예측되었다. 또한, 주변집합체를 고려하여 계산한 결과, 주변집합체와 열출력 차이가 큰 1주기초기 노심(BOC1)의 각 집합체 최외각 부수로 온도는 단일집합체 경우보다 약 15~28°C 범위로 높게 나타났다. 600 MWe 신개념 노심은 최고 출구 온도를 갖는 세개의 집합체가 거의 동일한 온도분포를 나타내었으며, 최고 출구온도는 약 568.6 °C ~ 569 °C 범위로 계산되었다.

### Abstract

Temperature profiles of KALIMER breakeven core subassemblies were calculated with single subassembly and inter-subassembly model by MATRA-LMR Code. Calculation references were 150 MWe breakeven core and 600 MWe proliferation resistant core which is under conceptual design optimization study. As calculation results, the peak outlet temperature of 150 MWe breakeven core was predicted about 564.3 °C. In case of BOC1 core, inter-subassembly calculation results showed that the edge subchannel temperatures were predicted higher than single subassembly by 15~28°C range. And subassemblies peak outlet temperatures of 600 MWe core was predicted by the range of 568.6 °C ~ 569 °C.

## 1. 서론

액체금속로의 냉각재인 소듐은 열전도도가 물의 약 100배 정도이며, 비등점 또한 대기압 상태에서 약 900 ℃로 매우 높다. 따라서 소듐을 냉각제로 사용하는 액체금속로는 정상운전 시 노심 냉각제온도에 약 300 ℃ 이상의 여유가 있다. 이러한 특성에 의해 액체금속로의 경우는 가압경수로와는 달리 피복재 온도나 핵연료의 최대온도에 설계 제한조건을 두게 된다. 이러한 설계기준을 만족시키고, 냉각제의 효율을 높이기 위하여 액체금속로 노심 온도분포는 정확히 예측되어야 한다. 이러한 목적에 의해, 현재 액체금속로 노심의 부수로 상세 해석은 개념설계 과정에서 개발, 보완 중인 MATRA-LMR 코드를 사용하고 있다.

원자력중장기 과제로 국내 개발 중인 액체금속로 KALIMER는 초기에 전기출력 150 MWe (열출력 392 MWth)의 증식특성 노심으로 시작하여, 변경 요구에 의해 breakeven노심으로 개념설계가 진행되었으며, 선행연구 결과 breakeven 노심은 증식특성 노심에 비하여 노심 중앙의 출력이 낮아짐에 따라 최고 유량 집합체의 평균 유속 및 압력강하가 낮아지는 결과 이외엔 큰 차이가 없으므로 열유체 특성은 향상된 것으로 확인되었다.[1]

현재 KALIMER 는 전기출력 600MWe의 핵확산 저항성을 갖는 신개념 노심 설계를 목표로 진행 중이다. 신개념 노심은 핵확산저항성 향상을 위하여 블랭킷 장진 최소화를 목표로 개념 설계가 진행 중이다. 따라서, 노심은 블랭킷이 없는 핵연료 집합체로만 구성되었으며, 주기 말에 생산된 잉여 TRU 생성의 최소화를 위해 1.0의 증식비를 갖는 노심이다.

본 논문에서는 현재 액체금속로 노심 집합체의 부수로 상세 해석을 위해 개발한 MATRA-LMR 코드를 이용하여 현재까지 개념설계가 진행된 KALIMER의 150 MWe급 breakeven 노심의 평형, 1주기 초 및 1주기 말의 집합체와 현재 평형 노심 개념설계가 진행 중인 600 MWe급 핵확산 저항성 신개념 노심 집합체의 온도분포 해석 및 비교를 수행하였다.

## 2. 액체금속로 노심 열유체 해석 개요

### 2.1 노심 열유체 설계방법론

액체금속로 노심은 일반적으로 삼각형 격자 형태로 장진되어 있는 연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 집합체로 구성되어 있으며, 덕트와 덕트 사이에는 유량의 교환이 없는 폐쇄회로를 형성하고 있다. 따라서 이들 집합체에서 발생하는 열량을 효과적으로 추출하기 위해서는 각각의 집합체에 흐르는 냉각제 유량을 적절하게 분배하고, 그에 따른 온도분포를 적절하게 유지시키는 것이 열유체 설계의 기본 목표이다.

전반적인 액체금속로 노심 열유체 개념 설계 및 분석 작업은 노심 구성과 그에 따른 핵 설계 데이터를 연계자료로 하여 유량분배, 온도분포계산, 정상상태 열유체 해석, 과도상태 열유체 해석, 안전해석 연계자료 제공의 흐름에 따라서 진행하게 된다.

노심 전체에 대한 냉각제 유량분배 개념은 전출력에 대해 요구되는 유량을 결정한 후,

노심 집합체별 출력 분포에 따라 각 집합체별로 유량을 결정하는 것이다. 이러한 각 집합체의 유량을 몇 개의 동일 유량 그룹으로 구성한 후, 집합체의 온도 분포를 계산하여 각 그룹의 피복관 최고 중심 온도가 동일하도록 하고, 이때의 압력강하를 고려하여 집합체 하부에 오리피스를 구성하게 된다.[5] 이러한 일련의 해석 절차는 노심 핵설계 및 안전성 분석과 연계되어 반복 수행하며, 최종적으로 핵열유체 안전성 분석을 통하여 검증은 받게 된다.

## 2.2 액체금속로 부수로 해석 코드 MATRA-LMR

MATRA-LMR은 COBRA-IV-i를 근간으로 개발한 경수로 부수로 해석용 MATRA를 기본으로 하여 냉각재인 소듐의 물성치, 열전달 상관식 및 압력강하 상관식 등을 추가, 보완하여 액체금속로 노심의 집합체 해석을 위해 개발한 코드이다. MATRA-LMR은 열전도도가 큰 소듐 냉각재에 의한 집합체간 열전달 현상, 특히 열출력 차이가 큰 블랭킷 집합체와 핵연료 집합체로 구성되어 주변에 접한 집합체에 의해 대상 집합체의 온도분포에 영향을 크게 줄 것으로 예상되는 비균질 노심의 경우까지 해석이 가능하도록 개선한 것이다.[2,3]

집합체간 열전달 현상을 고려한 부수로 온도분포 해석 방법은 질량, 에너지, 그리고 운동량에 대한 지배방정식을 이용하여 온도 및 유량분포를 계산하는 것으로, 단일 집합체의 계산과 근본적인 차이는 없다.

두 집합체 사이의 열전달 모델은 단일 node로 구성된 벽 영역을 설정하여 나타내었다. 단, 계산범위를 주변집합체 영향까지 고려하도록 확장하면서 관심대상의 표준 집합체만 단일 집합체와 같은 수준의 계산을 수행하고 주변 집합체에 대해서는 Lumped Model로 취급하여 보다 정확한 온도분포를 예측하고자 하는 것이다.

$$\left( \mathbf{r}_w C_{pw} t_w \right) \frac{(T_w - T_w^n)}{\Delta t} = - U_i (T_w - T_i) - U_j (T_w - T_j) + q_w'' t_w \quad (1)$$

$$[ \quad ] = \left[ \begin{array}{c} i \\ \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} j \\ \end{array} \right] + \left[ \quad \right]$$

이러한 집합체간 열전달 해석 모델의 개념은 그림 1과 같으며, 가정은 다음과 같다.

- 노심은 표준 집합체 1개와 나머지 주변 집합체들로 구성된다.
- 집합체 덕트 사이의 저유동 소듐은 열전도 현상으로 취급한다.
- 전 집합체에 동일한 축방향 node 수를 사용하고, 덕트 두께는 균일하다.
- 반경방향 온도분포 및 wire-wrap 사용은 표준 집합체에서만 고려한다.
- 단상유동 (single phase) 모델에만 적용 가능하다.

그림 1에서와 같이, 집합체내 가장자리 부수로와 덕트벽 사이에서의 대류 열전달은 완전한 난류유량 열전달 데이터로부터 구해지며, (Lyon-Martielli (1951) 상관식) 이웃한 집합체와의 사이에 있는 소듐에 의한 열전달은 열전도를 고려하여 얻어진다.

그러나, 집합체 사이에 소듐의 유동은 그 양이 집합체내 유량에 비해 상대적으로 매우 작기때문에 벽 node에서의 축방향 대류 및 반경방향 유량혼합에 의한 항을 열전도 모델로 단순화하여 모델링 한 것이다. 즉, 집합체 사이 소듐에 대해서도 덩트벽과 같이 열전도에 의한 저항값으로 보고 벽 node에서의 열전달은 이 세 저항값의 합으로 구성하였다.

### 3. 노심 열유체 설계 특성

#### 3.1 Breakeven 노심(150 MWe) 열유체 설계 특성

그림 2는 전기출력 150MWe의 Breakeven 노심의 배치도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 breakeven 노심은 비균질 노심이며 유량그룹은 핵연료 집합체 부분에 3개, 내부 블랭킷 집합체 부분에 2개, 반경방향 블랭킷 집합체 부분에 3개 등 총 9개의 유량그룹으로 구성되었다.

표 1은 계산 대상이 되는 집합체의 기하학적 규모와 운전조건을 나타낸 것이다. DR0302 집합체는 열출력 6.55 MWth, 냉각재 유량이 35 Kg/Sec인 271 Pin 핵연료 집합체이며, IB0503 및 RB0704 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 온도분포는 평형, 1주기 초기 및 말기에 대해 단일 집합체 및 주변 집합체의 경우로 각각 비교하여 수행하였다.

#### 3.2 핵확산 저항성 신개념 노심(600 MWe) 설계 특성

그림 3은 현재 개념설계가 진행중인 전기출력 600 MWe의 핵확산 저항성 신개념 노심의 구성을 나타낸 것이다. 신개념 노심은 271 pin의 핵연료(Driver) 집합체로만 구성되어 Inner, Middle, Outer 영역으로 구분된 노심이며, 총 6개의 유량 그룹으로 구성되어 있다.

표 2는 계산에 적용한 600 MWe 노심 집합체의 기하학적 규모와 운전조건을 나타낸 것이다. 노심이 핵연료(Driver)집합체로만 구성됨에 따라 집합체간의 열출력 차이가 없으므로, 집합체간 열전달 현상은 매우 미비할 것으로 예상된다. 따라서, 계산 대상이 된 집합체는 평형주기에서 출구 온도가 가장 높을 것으로 예상되는 Inner Driver(ID0402), Middle Driver(MD0704), Outer Driver(OD0901) 집합체를 선정하였으며, 주변집합체의 열전달 영향은 고려하지 않고 계산을 수행하였다.

### 4. 계산결과 및 해석

#### 4.1 Breakeven 노심 집합체 계산 결과

150 MWe Breakeven 노심의 집합체 계산 결과, 평형노심과 1주기말 노심의 경우에는 단일집합체 계산과 다집합체 계산 결과가 대체로 비슷하게 나타남을 확인하였다. 반면에, 1주

기 초 노심에서의 계산결과는 해당 집합체 자체의 출력이 아직은 낮은 상태에 있기 때문에 전반적으로 낮은 온도값으로 계산되었고, 집합체간 열전달을 고려한 계산의 경우에도 주변 집합체와의 출력 차이로 인해 주변 부수로의 온도가 큰 폭으로 증가함을 알 수 있었다.

결론적으로, 평형 노심의 최고 출구온도는 564.3 °C로 예측되었으며, 주변집합체를 고려하여 비교한 결과, 집합체간 열출력 차이가 가장 큰 1주기 초기 노심에서 최외곽 부수로 온도는 단일집합체 경우보다 약 15~28°C 범위로 높게 예측하는 결과를 확인하였다.

#### **DR0302 핵연료집합체**

DR0302 집합체는 중심 부수로의 최고 출구 온도는 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. 그림 4는 DR0302 핵연료집합체와 그 주변 집합체를 나타낸 것이고, 그림 5는 DR0302 집합체의 부수로의 온도분포 계산 값을 정리한 것이다.

#### **IB0503/RB0704 블랭킷 집합체**

IB0503 및 RB0704 집합체 중심 부수로의 최고 온도는 각각 555.6 °C 및 559.6 °C로 계산되었다. IB0503 집합체의 외곽 부수로 온도는 중심집합체의 외곽면에 대해 열출력이 1.69 MWth인 IB0403 집합체와 5.22MWth인 DR0603 집합체가 대칭이 된 부수로를 대상으로 비교한 결과, 단일 집합체 계산 결과에 비해 집합체 간 열전달 효과에 의해 최외곽 부수로 온도가 약 3°C 및 7.4°C 정도로 높게 계산되었다.

RB0704 집합체의 최외곽 부수로의 경우는 중심집합체의 반대편 외곽면에 대해 열출력 5.22 MWth인 DR0604 집합체와 0.38MWth인 DR0704 집합체가 비교적 큰 차이로 대칭 되었으므로, DR0604 집합체와 접한 최외곽 부수로 온도가 단일 집합체 계산에 비해 약 6.7 °C 정도가 높게 나타났다. 그림 6과 그림 7은 각각 IB0503 블랭킷 집합체와 온도계산 결과를, 그림 8과 그림 9는 각각 RB0704 블랭킷 집합체와 온도계산 결과를 나타낸 것이다.

#### **4.2 핵확산 저항성 신개념 노심 집합체 해석 결과**

600 MWe 신개념 노심의 계산 결과, 예상한 바와 같이 노심의 최고 출구 온도를 갖는 세 개의 집합체가 거의 동일한 온도분포를 유지하였다. 최고 출구온도는 150 MWe 노심의 경우보다 4°C 정도 높은 약 568.6 °C ~ 569 °C 범위이며, 평균온도는 약 546 °C로 나타났다. 그림 10은 ID0401, MD0704 및 OD0901 집합체의 온도계산 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

### **5. 결론 및 토의**

KALIMER 증식특성 노심 설계 후, 변경 요구에 의해 개념설계 단계가 완료된 breakeven 노심과 현재 개념 설계가 진행중인 핵확산 저항성 신개념 노심의 부수로 상세 온도분포 해

석을 MATRA-LMR 코드를 이용하여 수행하였다. 해석결과, 150 MWe 노심의 최고 출구온도는 564.3 °C로 예측되었으며, 주변집합체를 고려하여 비교한 결과, 집합체간 열출력 차이가 가장 큰 1주기 초기 노심에서 최외각 부수로 온도는 단일집합체 경우보다 약 15~28°C 범위로 높게 예측하는 결과를 확인하였다. 600 MWe 핵확산 저항성 신개념 노심은 최고 출구 온도를 갖는 세계의 집합체가 거의 동일한 온도분포이며, 중심 부수로 최고 출구온도는 약 568.6 °C ~569 °C 범위로 나타났다.

600 MWe 핵확산 저항성 신개념 노심은 평형주기에서 열출력이 유사한 핵연료(Driver) 집합체로 노심이 구성됨에 따라, 집합체간 열전달의 영향은 매우 미비할 것으로 예상되며, 추후 핵-열유체 설계가 진행, 보완에 따라 보다 상세한 열유체 해석 및 기존 노심과의 특성 비교가 계속 진행될 것이다.

### 감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] 김영균, "KALIMER Breakeven 평형노심 열수력 설계 및 특성 분석", 추계 한국원자력학회 학술발표회, 2001
- [2] 김원석, "집합체간 열전달 및 전체노심 해석을 위한 MATRA-LMR 코드 개선" KALIMER/CD/234-CV-03/1999
- [3] W. S. Kim et al., "Development of a Subchannel Code for LMR Core Thermal Hydraulic Analysis", ICONE-8, April 2-6 2000, Baltimore (2000).
- [4] Wheeler C. L., et. al, "COBRA-IV-i : An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores", BNWL-1662, 1976
- [5] 임현진 외, KALIMER 노심 개념설계를 위한 노심 압력강하 계산모듈 개발, 2001추계 학술발표회, KNS (2001)

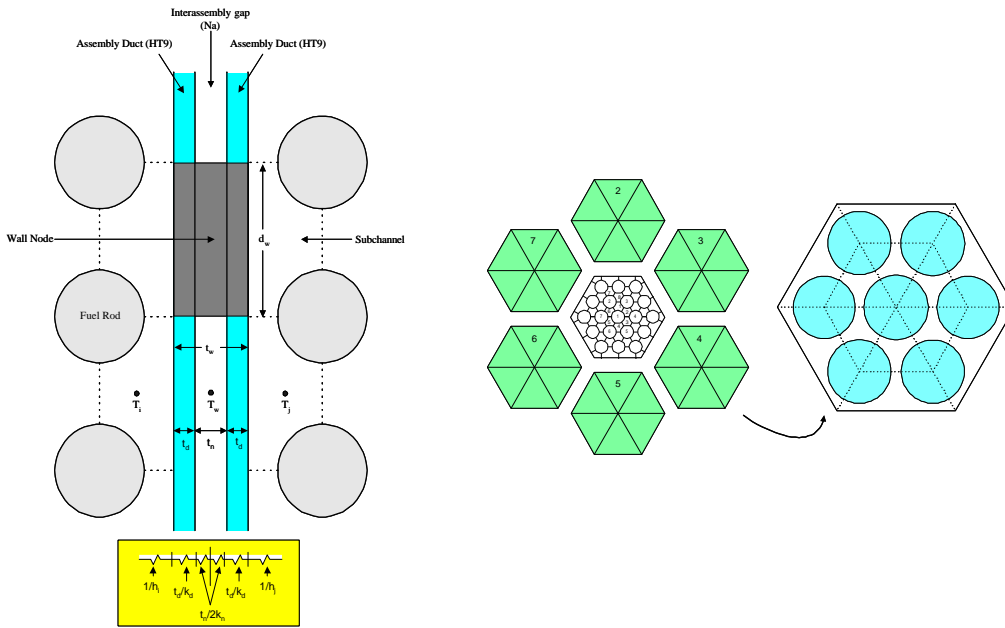


그림 1 MATRA-LMR 코드의 집합체간 열전달 모델 개념

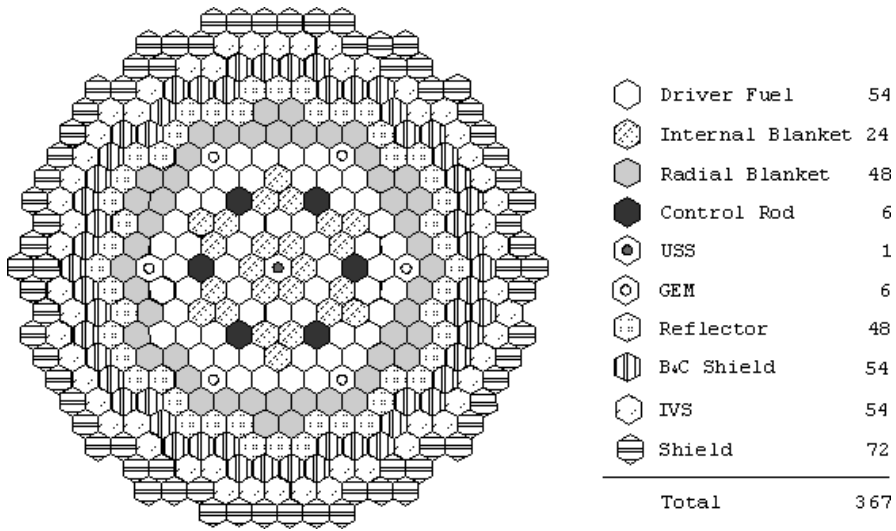


그림 2 150 MWe Breakeven 노심 배치도

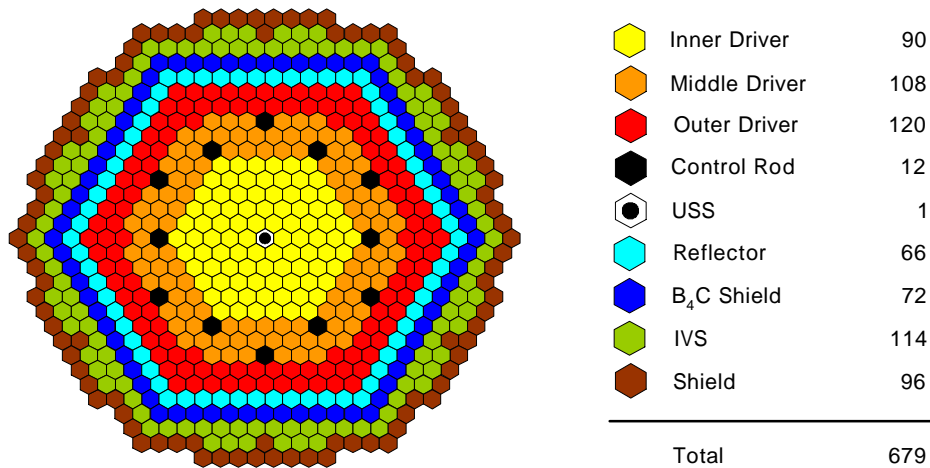


그림 3 600 MWe 핵확산 저항성 신개념 노심 배치도

표 1 150 MWe Breakeven 평형노심 집합체의 기하학적 규모와 운전조건

기하학적 규모 및 운전조건	DR 0302 (271 Pin)	IB 0503 (127 Pin)	RB 0704 (127 Pin)
Axial height, mm	3534.0	3534.0	3534.0
Fuel pin pitch, mm	8.95	13.07	13.07
Wire wrap lead, mm	206.2	301.9	301.9
Duct inside f-to-f 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

표 2. 600 MWe 핵확산 저항성 노심 집합체의 기하학적 규모와 운전조건

기하학적 규모 및 운전조건	ID 0402 (271 Pin)	MD 0704 (271 Pin)	OD 0901 (271 Pin)
Axial height, mm	3534.0	3534.0	3534.0
Fuel pin pitch, mm	8.95	8.95	8.95
Wire wrap lead, mm	206.2	206.2	206.2
Duct inside f-to-f distance, mm	150.4	150.4	150.4
Duct wall thickness, mm	3.72	3.72	3.72
Fuel pin outer diameter, mm	7.57	7.57	7.57
Wire wrap diameter, mm	1.38	1.38	1.38
Cladding thickness, mm	0.55	0.55	0.55
Nominal linear pin power, W/m	5459.6	5811.1	6274.5
Assembly nominal flow rate, kg/sec	25.70	27.40	29.60
Assembly coolant inlet Temperature, °C	386.2	386.2	386.2
Peak coolant outlet temperature, °C	571.4	571.1	571.1
Coolant average velocity, m/s	4.378	4.667	5.042
Bundle Pressure drop, MPa	0.204	0.229	0.204



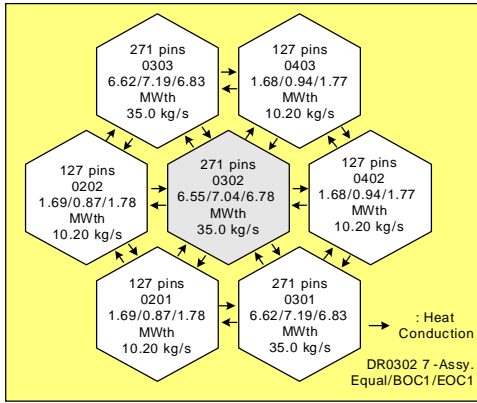


그림 4. DR0302 핵연료집합체

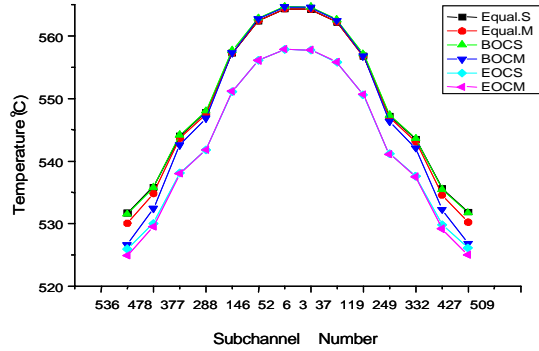


그림 5. DR0302 핵연료집합체 온도분포

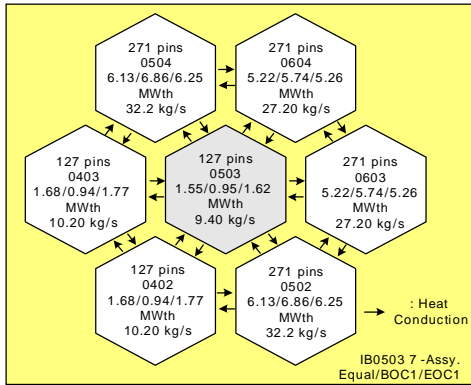


그림 6. IB0503 블랭킷 연료 집합체

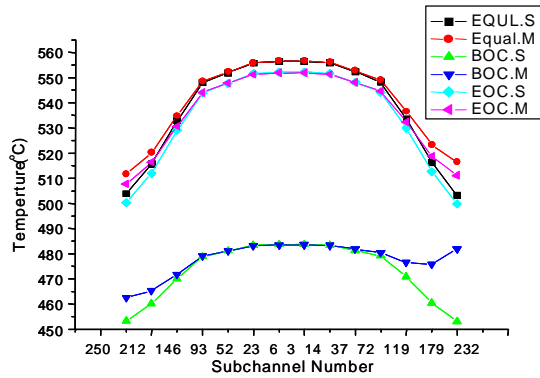


그림 7. IB0503 블랭킷 집합체 온도분포

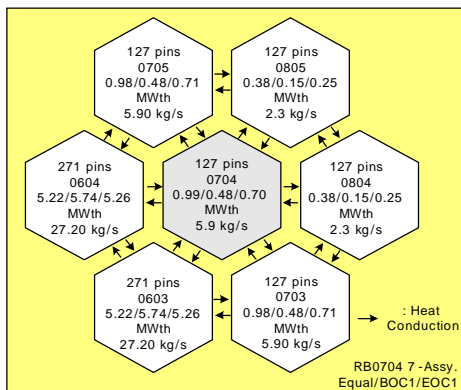


그림 8. RB0704 블랭킷 집합체

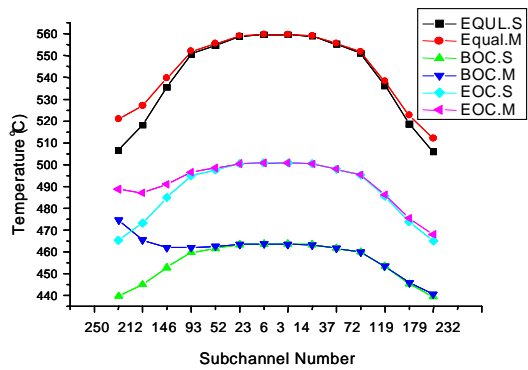


그림 9. RB0704 블랭킷 집합체 온도분포

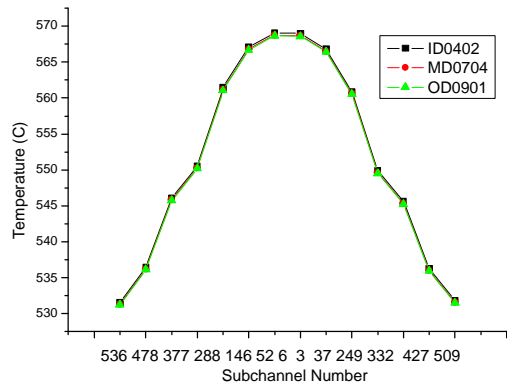


그림 10. 600MWe 노심 핵연료 집합체 온도분포