

## KALIMER 노심개발을 위한 액체금속로 예비노심설계

김영인, 김영균, 송훈, 김의광, 김영철

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

국내개발 액체금속로 KALIMER 노심설계 개발의 일환으로 전기출력 333 MWe(열출력 840 MWth)의 노심설계를 수행하고, 이에 대한 핵·열수력 특성을 분석하였다. 설계노심은 2농축 U-Zr(14.0/18.9%) 이원 합금핵연료의 균질노심으로 구성하였다. 핵연료 재장전주기는 18개월, 평균증식비는 0.64로서 평형주기에서의 최대연소도는 125.2 MWD/kg이며, 특히 음의 소듐 void 반응도가를 가짐으로써 노심안전성 확보측면에서 매우 양호함을 보였다.

### 1. 서론

국내개발 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor) 설계기술을 개발하기 위하여 안전성 및 경제성 향상, 핵확산저항성 및 환경친화성 확보를 목표로 하는 설계개념연구가 꾸준히 수행되어 오고 있다. 금속핵연료노심은 과도시 양호한 음의 반응도 특성을 가지고 있어 고유안전성을 향상시킬 수 있다. 또한, 고연소도에 따른 경제성 향상 및 건식재처리를 사용한 핵확산저항성 등의 이점을 가지고 있어 국내설계 개발 목표에 부합하고 있다. KALIMER 노심설계에서 시동에 필요한 초기노심은 일반적으로 사용하고 있는 U-Pu-Zr 삼원합금핵연료 대신에 20%농축도 이하의 U-Zr이원합금 핵연료를 사용한다. 국내개발 액체금속로 KALIMER 노심설계기술 개발의 일환으로서, 설계개념연구를 통하여 설정된 최상위 설계요건안 및 노심설계요건안을 만족하도록 하는 전기출력 333 MWe(열출력 840 MWth)의 노심설계를 수행하고, 이에 대한 핵·열수력 특성을 분석하였다. 핵연료주기 분석에서는 우선 U시동노심으로 부터 처음 몇 주기 동안 생성되어지는 Pu 핵분열성 물질을 핵연료로 공급하지 않고 평형주기를 달성하도록하는 천연핵연료주기를 적용하였다. 먼저, 노심설계에 적용한 설계기준에 대하여 기술하고, 노심구성 및 노심제원에 대하여 설명하였으며, 노심의 핵·열수력 특성에 대한 분석 결과를 기술하였다.

### 2. 노심설계기준

노심내 피동적 안전성 확보 및 핵연료의 신뢰성 확보를 고려하여서 금속핵연료 데이터베이스를 기초로 노심설계기준과 제한조건을 설정하였다.

- 원자로 출력 : 840 MWt
- 나트륨 void 반응도가 : < 5 \$
- 핵연료 재장전기간  $\geq$  12 개월
- 선출력  $\leq$  400 W/m
- 최대연소도  $\leq$  150 MWD/kg
- 최대 고속중성자 fluence  $\leq 4.0 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup>
- 초기시동노심의 핵연료 형태는 이원합금 U-Zr로 한다. 후속 핵연료주기에서는 노심장전 핵연료 내의 U-235의 양을 점차적으로 재순환 Pu(마이너 액티나이드 포함)으로 대체공급하는 핵

연료장전방안도 고려할 수 있다.

### 3. 노심설계 및 특성 분석

액체금속로 노심설계 종합계산체제인 K-CORE 시스템[1]을 사용하여 노심설계 및 특성분석을 수행하였다. 노심설계의 기본노심구성 및 초기노심 핵연료 농축도는 그간의 노심설계연구[2-4] 및 Pu에 대한 UO<sub>2</sub>의 실험자료[5] 등에 기초하여 20%농축 이하의 U금속핵연료 2농축도영역의 균질노심으로 결정하였다. 한편, 본 KALIMER 금속핵연료 노심설계에 필요한 기본자료 및 설계제원은 AHC설계 개념연구[4] 결과를 기본으로 설정하였다.

#### 가. 노심제원

금속핵연료노심은 핵연료재장전시 집합체 이동이 필요 없으며, 콤팩트한 노심을 구성할 수 있는 2농축도(U농축 20% 이하) 핵연료 영역의 반경방향 균질노심이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 노심은 150개의 핵연료구동집합체, 42개의 반경방향 블랑켄집합체, 9개의 제어봉집합체, 6개의 개스팽창모듈(GEMs), 3개의 USS(Ultimate Shutdown System), 54개의 노내핵연료저장조(IVS: Inner Vessel Storage), 그리고 126개의 차폐집합체(54개의 B<sub>4</sub>C 차폐체 포함)로 구성되어 있다. 축방향 블랑켄은 없으며, 노심의 유효높이는 100 cm, 반경방향 등가직경은 247 cm로서 높이 대 직경비(H/D)는 0.404이다. 노심구조재는 HT9로서, 이 페라이트계 스텔레스강은 낮은 조사팽창(swelling)특성을 가지고 있다.

표 1은 금속핵연료노심의 주요 제원과 운전조건을 수록하고 있다. 성능인자(capacity factor)로서 85%를 가정하였으며, 핵연료 재장전주기는 18개월이다. 매 재장전시 총 핵연료집합체와 블랑켄집합체의 1/3이 각각 교체되며, 노심내 장전된 핵연료구동집합체와 블랑켄집합체는 전 3회의 핵연료주기 동안 위치가 바뀌지 않는다. 한편, 우선 U시동노심으로 부터 처음의 몇 주기 동안에 생성되어지는 Pu 핵분열성 물질을 핵연료 공급분으로 사용하지 않으면서 평형주기를 달성하도록 하는 쉐이핵연료주기방안을 설정하였다.

#### 나. 노심 핵특성 분석

시동노심과 평형노심에 대한 주요 핵적 성능 파라미터들을 표 2에 비교·수록하였다. 핵연료 농축도는 시동노심의 경우 14.8/20.0%인 반면에, 평형노심의 경우에는 14.0/18.9%이다. 평균중식비는 시동노심의 경우 0.554, 평형노심의 경우 0.638로써, 결과적으로 주기당 핵분열성 물질의 순소비량은 610.9kg에서 145.1kg까지로 계산되었다. 여기에서 새핵연료공급분은 단지 U-Zr 이원합금핵연료로 가정하였다. 연소결손반응도(burnup reactivity swing)는 시동노심과 평형노심이 각각 1.298 %Δk/k<sub>BOC</sub> 및 0.842 %Δk/k<sub>BOC</sub> 로서 시동노심의 경우가 약간 크게 나타났다. 최대핵연료연소도의 경우, 시동노심은 44.7 MWD/kg(1주기만 해당), 125.24 MWD/kg으로써 설계제한치인 150 MWD/kg을 만족하고 있다.

양 노심의 출력특성을 보면, 우선 최대 선출력밀도는 각각 339.9 W/cm 및 329.1 W/cm로서 설계제한치인 400 W/cm 이하를 만족하고 있으며, 주기별 최대출력첨두인자는 각각 1.995, 1.860으로서 평형노심의 경우가 노심출력분포 특성이 상대적으로 양호함을 보였다. 최대고속중성자 fluence의 크기는 시동노심의 경우  $3.09 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup>, 평형노심의 경우  $3.45 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup> 로써, 양 노심이 모두 설계기준제한치  $4.0 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup> 를 만족하고 있다. 양 노심의 핵적 성능 파라미터를 비교하여 볼 때, 평형노심이 증식특성이나 출력특성 면에서 보다 양호함을 알 수 있다.

표 3은 시동노심에 대한 주요 반응도효과들을 보여준다. 소듐 void 반응도효과는 노심핵연료영역내에서 모두 음의 반응도 효과를 보이고 있어 Pu노심과 비교하여 노심안전성 확보측면에서 매우 양호함을 보여주고 있으며, 이는 기 연구 결과[6]와 일치하고 있다. 여기에서 소듐 void 반응도효과는 노심상부플레넘 영역의 소듐도 void하는 경우를 가정하여 구하였다. 총 노심제어봉 반응도가는 12,861 pcm으로 매우 충분하였으며,

GEM의 반응도가는 344 pcm으로, USS의 반응도가는 7,380 pcm으로 각각 구하여졌다.

#### 다. 노심 열수력 특성 분석

해특성 분석으로부터 구한 결과를 바탕으로 노심에 대한 열수력 특성을 분석하였다. 우선 평형노심 출력분포를 이용하여, 핵연료노심만을 대상으로 하여 필요한 유량을 계산하고 그 필요한 유량의 범위가  $\pm 5\%$  이내인 값을 갖는 집합체들을 종류별로 묶어 유량그룹화하였다. 유량배분계산에서 제어봉과 USS에는 최소 필요유량인 25,000 lbm/hr만을 배분하였으며, 노심의 집합체와 집합체 사이로 흐르는 바이패스 유량은 전체 유량의 1.5%로 가정하였다[7,8]. 유량배분계산 결과, 표 4에서와 같이 저농축 핵연료노심에 2개, 고농축 핵연료노심에 8개 등 총 12개의 유량그룹을 설정하였다. 배분된 유량을 기초로 하여 집합체의 온도 분포를 계산하였다. 이들 유량그룹내의 집합체별 최고온도를 유량영역별로 중요한 인자와 함께 표 5에 나타내었다. 이 표에서의 계산값들은 유량영역별로 가장 높은 출력을 갖는 연료봉에 대한 값들로서, 노심상부구조의 열적 건전성이나 핵연료의 건전성 등에 영향을 미치는 주요 인자들이다. 이 계산에서는 피복관의 CDF 값이 균일하도록 하기 위해 피복관 중심온도를 같게 하는 제한조건을 사용하였다.

그림 2는 이 결과를 집합체의 위치, 집합체의 종류, 유량그룹, 집합체 출력 및 출구온도 값들을 중심으로 1/3노심에 대하여 보여준다. 또한, 계산결과와 관련하여 출력분포를 보다 평탄하게 하고, 노심핵연료에 대한 변경방향 불량률의 선출력을 높히는 노심구성 및 핵계산 작업이 필요할 것으로 보인다[8,9].

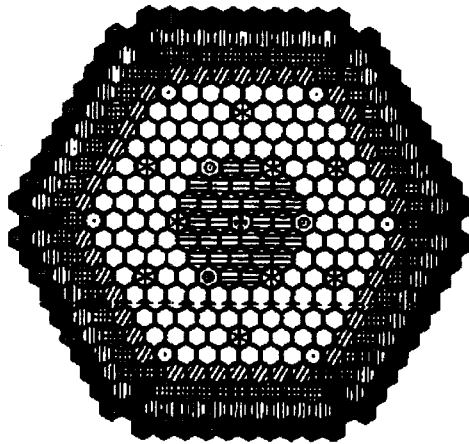
#### 4. 결론

국내개발 액체금속로 KALIMER 노심설계 개발의 일환으로 전기출력 333 MWe(열출력 840 MWth)의 노심설계를 수행하고, 이에 대한 핵·열수력 특성을 분석하였다. 금속핵연료노심의 일반적 특성에 따라, 대부분의 노심성능 파라미터들은 주어진 설계기준을 만족하였다. 평균중식비가 0.64로서 핵분열성 물질을 소비하는 특성을 가지며, 특히 Pu금속핵연료노심이 양의 소듐 void 반응도가를 갖는 것에 비하여 이 노심은 음의 소듐 void 반응도가를 가짐으로써 노심안전성 확보측면에서 매우 양호함을 보였다. 이에 대하여는 안전성 측면에서의 보다 상세한 분석이 요구된다.

본 노심설계는 전기출력 300MWe 급의 노심설계안으로 제안되어질 수 있으며, 또한 노심용량에 따른 설계특성 기본자료로 향후 국내개발 KALIMER 노심설계개념 정립 및 개발에 활용될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] 김영철, 김영인 외, “액체금속로 요소기술 개발,” KAERI/RR-1713/96 (1997).
- [2] 소동섭, 김영철, 김영인 외, “고속중식로 기본기술 개발연구,” KAERI/RR-1132/92 (1992).
- [3] 김영철, 김영인 외, “액체금속로 요소기술 개발,” KAERI/RR-1396/93 (1994)
- [4] Y. I. Kim, “Axially Heterogeneous Core Design Concept for Metallic Fueled LMRs,” GENE (1995).
- [5] A. Kotchetkov, IPPE (Private communication) (1995).
- [6] D. H. Hahn, Y. I. Kim, et al., “Safety Features and Core Performance of KALIMER,” IAEA-TCM (1995).
- [7] Y. G. Kim, et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995).
- [8] 김영균, 김영인, 김영철, “액체금속로 노심유량구분 연구,” ‘96 춘계학술발표회 논문집(2), KNS (1996).
- [9] T. Yokoo, et al., Design Study on Metal Fuel FBR Cores, T91013, CRIEPI (1991).



Low Enrichment Fuel	30
High Enrichment Fuel	120
Radial Blanket	42
Control	9
Source	1
Ultimate Shutdown	3
Gas Expansion Module	6
B4C Shield	54
M5	54
Shield	72
<b>Total</b>	<b>391</b>

그림 1 U 금속핵연료 노심 (333 MWe) 배치 단면도

표 1 노심설계 사양

<u>Operating Conditions</u>	
Core Thermal Power(MWth)	840
Core Electric Power(MWe)	333
Plant Thermal Efficiency(%)	39.64
Core Mixed Mean Inlet Temp.(°C)	375
Core Mixed Mean Outlet Temp.(°C)	530
Coolant Temperature Rise(°C)	155
Plant Capacity Factor(%)	85
Core Configuration	Radial Homogeneous
Number of Core Enrichment Zones	2
Feed Fuel Enrichments(%) (IC/OC)	14.00/18.91
Refueling Interval(months)	18
Effective Full Power Day(EFPD)	460.0
Number of Batches for Driver Fuel	
Low Enrichment Driver Fuel	3
High Enrichment Driver Fuel	3
Number of Reload Assemblies per Cycle	
Low Enrichment Driver Fuel	10
High Enrichment Driver Fuel	40
Total	50
<u>Design Parameters</u>	
Active Core Height(cm)	100.0
Core Diameter(cm)	350.8
Duct Pitch(cm)	161.4
Duct Gap(mm)	4.32
Duct Wall Thickness(mm)	3.94
Pins per Fuel Assembly(Driver/R. Blanket)	271/217
Pin Outer Diameter(Driver/R. Blanket)(mm)	7.44/12.01
Pin P/D Ratio(Driver/R. Blanket)	1.197/1.083
Upper Fission-Gas Plenum Length/(Na Filled)(cm)	150/30
Core Structural Material	HT9
<u>Volume Fractions(%)</u>	
<u>Inner/Outer Driver Fuel</u>	
Fuel Slug	28.30
Coolant (including Bond)	46.02
Structural Material	25.68
<u>Radial Blanket</u>	
Fuel Slug	44.61
Coolant (including Bond)	34.42
Structural Material	20.97
<u>Control Rod</u>	
Pin Material (80%B <sub>4</sub> C)	44.61
Coolant	34.42
Structural Material	20.97
<u>Radial Shield(with B<sub>4</sub>C Shield)</u>	
Pin Material(Smeared)	74.80/57.80
Coolant	15.94/18.11
Structural Material	9.26/24.09

표 2 시동노심과 평형노심의 핵적 성능 파라미터 비교

	Startup	Equilibrium
Average Breeding(Conversion) Ratio	0.554	0.638
Refueling Interval (months)	18	18
Burnup Reactivity Swing(% $\Delta k / k_{BOEC}$ )	1.298	0.842
Average Fuel Burnup (MWD/kg)		
Driver Fuel (Inner)	31.17	93.69
Driver Fuel (Outer)	25.86	74.55
Radial Blanket	0.69	2.97
Peak Fuel Burnup (MWD/kg)		
Driver Fuel (Inner)	38.71	116.57
Driver Fuel (Outer)	44.68	125.24
Radial Blanket	1.08	4.92
Feed Fuel Enrichment (Inner/Outer) (%)	15.00/20.00	14.00/18.91
Fissile Inventory at BOC (kg)	2596.24	2113.83
Supplied Fissile U (kg/cycle)	1368.36	806.75
Total Fissile Gain (kg/cycle)	-610.90	-145.09
Average Power Density (W/cc) at BOC		
Driver Fuel (Inner)	253.6	263.4
Driver Fuel (Outer)	211.5	210.0
Radial Blanket	8.8	12.6
Average Linear Power for Driver Fuel (W/cm)		
BOC	184.8	185.4
EOC	183.9	184.6
Peak Linear Power (W/cm)		
Inner Fuel	281.9	297.9
Outer Fuel	339.9	329.1
Radial Blanket	63.4	85.0
Power Peaking Factor for Driver Fuel		
BOC	1.995	1.860
EOC	1.871	1.737
Peak Neutron Flux ( $10^{11}$ n/cm <sup>2</sup> s)		
Driver Fuel (Inner)	3.833	4.656
Driver Fuel (Outer)	3.716	4.308
Radial Blanket	1.381	1.500
Peak Fast Fluence ( $10^{21}$ n/cm <sup>2</sup> ) (MOEC)		
Driver Fuel (Inner)	3.091	3.452
Driver Fuel (Outer)	3.063	3.327
Radial Blanket	1.048	1.133

표 3 주요 반응도 효과

	DC (Δk/dT)	Rho (pcm)
Power Defect (cold to hot)		-2,515
Doppler Effect		
Inner Driver Fuel	-0.00215	-204
Outer Driver Fuel	-0.00324	-308
Radial Blanket	-0.00008	-8
Total	-0.00548	-521
Total Expansion Effect		
Radial Expansion		-411
Axial Expansion		-1,883
Total		-1,940
Sodium Void Effect		
Inner Driver Fuel		-171
Outer Driver Fuel		-2,132
Radial Blanket		-283
Total		-2,738
Control Rod Worth		
First Row (3 Rods)		-6,137
Second Row (3 Rods)		-2,532
Second Row (8 Rods)		-5,495
Total (9 Rods)		-12,861
Interaction Factor		1.106
GEM		-344
USS		-7,380

표 4 노심 유량영역 구분

Orifice Group	Assembly Type	Assembly Count	Assembly Flow (lbm/hr)	Orifice Group Flow (lbm/hr)	Enrichment Zone Flow (lbm/hr)
1	inner fuel	12	220837	2650039	
2	inner fuel	18	216561	3898098	
3	outer fuel	24	307711	7385061	
4	outer fuel	24	218186	5236460	
5	outer fuel	6	208869	1253214	
6	outer fuel	12	196115	2353380	
7	outer fuel	12	190206	2282469	
8	outer fuel	18	193201	3477616	
9	outer fuel	12	183214	2198564	
10	outer fuel	12	181617	2179408	32914308(96.99%)
11	control rod	10	25000	250000	
12	USS	3	25000	75000	325000(0.96%)
total primary loop flow including bypass flow (lbm/hr) :					33935189
total bypass flow					2.05%

표 5 노심 유량영역별 최고온도 (2σ, °F)

Orifice Group	Assembly Type	Assembly Outlet (°F)	Thermal Striping (°F)	Cladding Midwall (°F)	Fuel Surface (°F)	Fuel Center (°F)
1	inner fuel	1126	400	1239	1258	1398
2	inner fuel	1118	358	1240	1257	1387
3	outer fuel	1023	267	1239	1260	1433
4	outer fuel	1099	353	1239	1259	1414
5	outer fuel	1067	143	1239	1257	1387
6	outer fuel	1055	311	1239	1256	1363
7	outer fuel	1036	156	1240	1255	1348
8	outer fuel	975	220	1240	1253	1313
9	outer fuel	954	147	1240	1252	1289
10	outer fuel	919	156	1240	1250	1264
11	control rod	765	400	-	-	-
12	USS	769	354	-	-	-

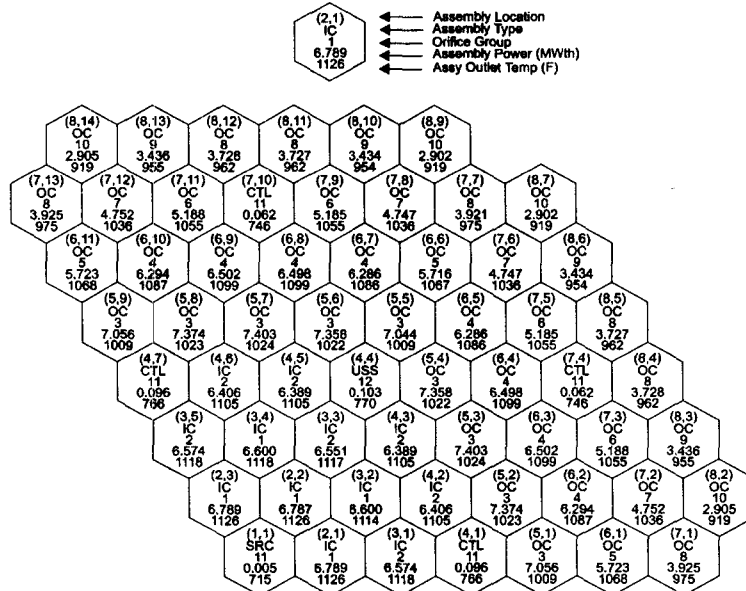


그림 2 노심 유량영역 구분결과 (1/3 노심)