

액체금속로 KALIMER 노심설계 및 특성 분석

김영인, 김영균, 송훈, 김의광, 김영철

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내개발 액체금속로 KALIMER(전기출력 150 MWe)의 노심설계를 수행하고, 이에 대한 핵·열수력 특성을 분석하였다. 2농축U-Zr(15.0/20.0 %) 이원합금핵연료의 균질노심으로서, 핵연료 재장전주기는 12개월, 평균중식비는 0.68이다. 평형주기에서의 최대연소도는 47.3 MWD/kg이며, 음의 소듐 void 반응도가를 가진다. 동일한 설계기준으로 설계한 전기출력 333 MWe의 중형노심과 노심 특성을 비교·분석한 결과, 소형노심(전기출력 155 MWe)이 상대적으로 짧은 핵연료 재장전주기와 낮은 노심출력밀도를 갖고 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

국내개발 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 설계개념연구에서 수행한 설계개념 타당성 연구[1] 결과에 따라, KALIMER의 노심 규모는 전기출력 150 MWe(열출력 392 MWth)로, 시동에 필요한 초기노심 핵연료로는 20%농축도 이하의 U-Zr의 이원합금핵연료를 설정하였다[2]. 금속핵연료노심은 과도시 양호한 음의 반응도 특성을 가지고 있어 고유안전성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 고연소도에 따른 경제성 향상 및 건식재처리를 사용한 핵확산저항성 등의 이점을 가지고 있다. 여기에서는 국내개발 액체금속로 KALIMER 노심설계기술 개발의 일환으로서 수행한 전기출력 333 MWe(열출력 840 MWth)의 노심설계[3] 기술을 이용하여, 설계개념연구를 통하여 설정된 최상위 설계요건 및 노심설계요건을 만족하는 KALIMER 노심설계를 수행하고, 이에 대한 핵·열수력 특성을 분석하였다. 또한, 이러한 노심특성 분석 결과는 전기출력 333MWe의 중형노심설계의 경우와도 비교·분석하였다.

먼저 중형 노심설계를 기준으로 본 소형 노심설계에 적용한 설계기준 및 노심설계방법 등을 기술하고, 노심의 핵·열수력 특성에 대한 분석 결과를 중형노심특성 분석 결과와 비교·분석하여 기술하였다.

2. 소형노심설계 및 특성 분석

가. 노심설계기준 및 제원

본 소형노심설계에 적용한 노심설계기준 및 설계방법, 설계절차 및 계산체제는 전기출력 333 MWe의 노심설계[4]의 경우와 거의 동일하다. 설계기준에서는 노심의 소형화를 고려하여 핵연료주기를 12개월로 단축하였다. 노심설계 사양에서는 노심내 냉각재 출/입구 온도를 361.4/530.0°C로 하여 노심 출·입구간 온도차를 증가시켰으며, 소형화에 따른 노내핵연료저장집합체(IVS) 영역에 대한 차폐 강화를 위하여 B₄C차폐체의

봉소 농축도를 증가시켰다. 그림 1은 소형노심모델의 노심구성을 보여준다. 용량 감소에 따라 노심 핵연료 영역을 감소시켰으며, 반사체 영역을 추가배치하였다.

나. 노심 핵특성 분석

표 1은 소형핵연료 노심의 주요 제원과 운전조건을 수록하고 있다. 표 2와 3에서는 시동노심과 평형노심에 대하여 출력특성 및 반응도 효과 등 주요 핵적 성능 파라미터들을 상세히 비교·수록하였다. 시동노심으로 부터 평형주기로의 천이주기방안으로서는 U시동노심의 초기 농축도와 동일한 핵연료를 공급핵연료로 사용하면서 평형주기로 전환하는 방안을 채택하였다. 양 노심의 평균증식비는 약 0.68이며, 주기당 핵분열성 물질의 순소비량은 326.6 kg에서 297.0 kg까지로 계산되었다. 연소결손반응도(burnup reactivity swing)는 시동노심과 평형노심이 각각 0.264 % $\Delta k/k_{BOC}$ 및 0.273 % $\Delta k/k_{BOC}$ 로서 양 노심 거의 동일하며, 최대 연소도는 각각 18.5 MWD/kg(1주기만 해당), 47.3 MWD/kg이다. 양 노심의 최대 선출력밀도는 각각 231.1 W/cm 및 234.6 W/cm이며, 최대 고속중성자 fluence는 시동노심이 1.42×10^{23} n/cm², 평형노심이 1.43×10^{23} n/cm²로 거의 동일하며, 양 노심 모두 설계기준제한치 4.0×10^{23} n/cm² 이하를 만족하고 있다. 양 노심의 핵적 성능 파라미터의 크기가 거의 비슷하여 양 노심특성에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 표 3에서 보는 것과 같이, 소듐 void 반응도 효과는 노심핵연료영역내에서 거의 음의 반응도 효과를 보이고 있어 노심안전성 확보측면에서 매우 양호함을 보여준다. 여기에서 소듐 void 반응도효과는 유효노심영역의 소듐만이 void하는 경우를 가정하여 구하였다.

다. 노심 열수력 특성 분석

핵특성 분석 결과를 바탕으로 노심에 대한 열수력 특성을 분석하였다. 평형노심 출력분포를 이용하여 필요한 유량을 계산하고 집합체들을 종류별로 묶어 유량그룹화하였다. 유량배분계산 결과, 표 4에서와 같이 저농축 핵연료노심에 4개, 고농축 핵연료노심에 6개, 반경방향블랑켈 4개 등 총 16개의 유량그룹을 설정하였다. 노심핵연료영역의 선출력이 반경방향 블랑켈에 비하여 상대적으로 매우 높기 때문에 노심핵연료영역에서의 유량그룹을 보다 세분화하였다. 배분된 유량을 기초로 하여 집합체의 온도 분포를 계산하였다. 이들 유량그룹내의 집합체별 최고온도를 유량영역별로 중요한 인자와 함께 표 5에 나타내었다. 이 표에서의 계산 값들은 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 반경방향 블랑켈의 선출력을 높히는 노심구성 및 핵계산 작업이 필요할 것으로 보인다.

3. 소형노심과 중형노심의 특성 비교·분석

소형(전기출력 150 MWe)노심과 중형(전기출력 333 MWe)노심의 핵특성을 비교하여 보면 다음과 같다. 보다 큰 핵연료 재장전주기를 갖는 중형노심이 연소결손반응도가 크며, 또한 연소도도 상대적으로 크다. 공급핵연료의 농축도에는 약간의 차이가 있으나, 초기 핵분열성물질의 장전량이나 주기당 공급핵연료량은 노심 크기에 좌우된다. 소형노심은 12개월의 핵연료주기를 달성하기 위하여 상대적으로 노심의 크기를 증가 시킴에 따라 핵연료 출력밀도나 선출력밀도가 상대적으로 낮으며, 출력첨두인자의 값은 평균 약 1.75 정도이다. 최대 증성자속이나 최대 고속중성자 fluence는 중형노심에서 모두 크게 나타났는데, 이는 핵연료 재장

전주기 및 노심출력밀도의 크기가 상대적으로 큰 것에 기인한다. 소듐 void 반응도가는 중·소형 노심 모두 음의 값으로 안전성 확보측면에서 매우 양호함을 알 수 있다.

시동노심으로부터 평형노심으로의 핵연료재장전모델을 양 노심에서 서로 다르게 적용함에 따라 시동 및 평형노심에 대한 공급핵연료의 농축도가 다르고, 평균 전환비도 큰 차이를 보이고 있으며, 결과적으로 핵연료 물질수지에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 향후 시동노심으로부터 평형노심으로의 전환에 따른 노심특성의 영향을 최소화하기 위한 전환핵연료 재장전모델이 수립되어야 할 것이다.

열수력 특성을 비교하여 보면, 위의 두 노심 모두 반경방향 불량켈의 선출력이 노심핵연료영역에 비해 너무 낮아 (보통의 경우 5%이나, 현재의 설계에서는 1% 정도), 중형노심의 경우 노심핵연료영역만 12개, 소형노심의 경우에는 노심핵연료와 반경방향 불량켈에 16개의 유량그룹을 설정하였는데, 경제성 제고를 위하여는 유량그룹수를 현재의 2/3정도로 줄일 수 있도록 출력분포를 조절하는 작업이 필요할 것이다. 유량그룹별 그룹내의 집합체별 최고온도 분석 결과에 의하면, 핵연료 피복관 중심온도를 더 낮출 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 온도계산에서는 피복관의 CDF 값이 균일하도록 하기 위해 피복관 중심온도를 같게 하는 제한조건을 사용하였다. 이는 앞으로의 작업에서 전체적으로 좀 더 정확한 계산을 다시 수행하여야 할 것이다. 종합적으로는 출력분포를 보다 평탄하게 하고, 반경방향 불량켈 영역의 출력분포를 증대시킬 수 있도록 하는 노심구성 및 핵계산 작업이 필요할 것이다.

4. 결론 및 건의사항

국내개발 액체금속로 KALIMER 노심으로서 전기출력 150 MWe(열출력 392 MWth)의 U-Zr이원합금핵연료사용 소형노심을 설계하고, 이에 대한 핵·열수력 특성을 분석하였다. 특성 분석결과, 대부분의 노심성능 파라미터들은 주어진 설계기준을 만족하였다. Pu금속핵연료노심의 일반적인 특성과 비교하여 평균중식비가 0.68로서 중식기능을 갖지 못하나, 음의 소듐 void 반응도가를 가짐으로써 노심안전성 확보 측면에서 매우 양호함을 보였다. 한편, 소형노심의 특성분석 결과를 앞서 수행한 전기출력 333MWe(열출력 840MWth)의 중형노심설계 특성과 비교·분석하였다. 중·소형 노심 모두 금속핵연료노심의 특성을 공통적으로 보이고 있으며, 양 노심의 특성 차이는 종합적으로 소형노심이 상대적으로 짧은 핵연료 재장전주기와 낮은 노심출력밀도를 갖고 있다는 것이다.

본 소형노심설계(전기출력 150MWe)는 국내개발 KALIMER 노심의 노심설계안으로 제안될 수 있으며, 이를 기초로 하여 본 노심설계작업에서 제기된 핵연료주기방안 수립, 안전성 분석 및 노심설계 최적화 작업 등을 통하여 KALIMER 노심설계개념을 최종적으로 확립하여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 박창규 외, “액체금속로 설계개념 연구,” KAERI/RR-1719/96 (1997).
- [2] C. K. Park, et al., “KALIMER Design Concept Report,” KAERI/TR-888/97 (1997).
- [3] 김영철, 김영인 외, “액체금속로 요소기술 개발,” KAERI/RR-1713/96 (1997).
- [4] 김영인 외, 액체금속로 KALIMER 예비노심설계 및 특성 분석, '97 추계학술발표회 논문집, KNS (1997).

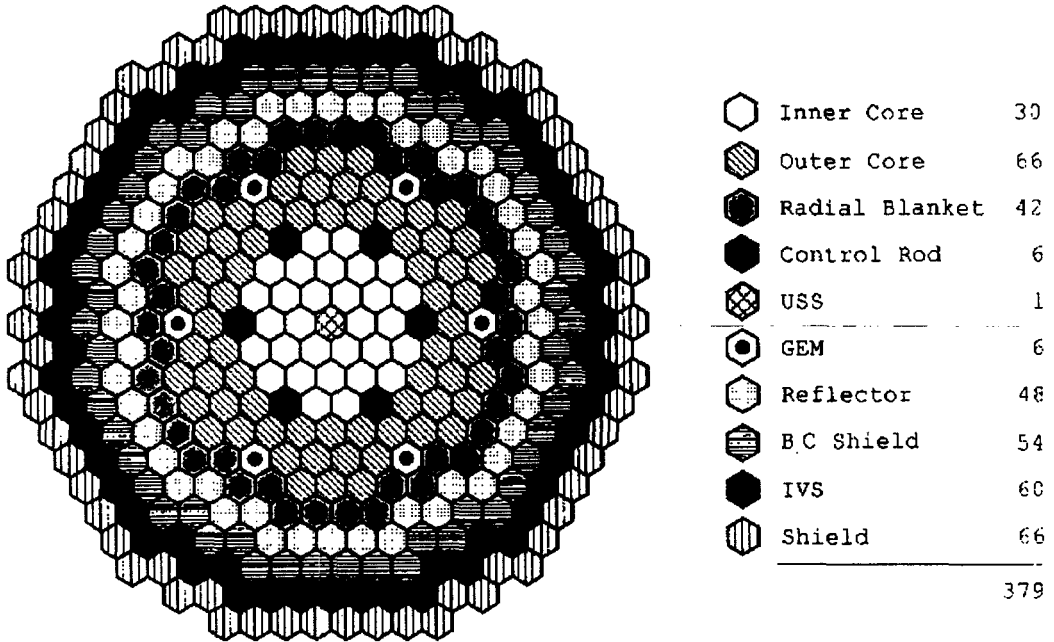


그림 1 소형노심(150 MWe) 배치 단면도

표 1 소형노심설계 (150MWe) 사양

Core Thermal Output (MWth)	392.0
Core Mixed Inlet/Outlet Temperature (°C)	361.4/530.0
Total Flow Rate (kg/s)	1823.7
Core Configuration	Homogeneous
Active Core Height (cm)	100.0
Core Diameter (cm)	344.3
Axial Blanket Thickness (cm)	0.0
Fuel Form	U-10%Zr Binary Alloy
Number of Core Enrichment Zones	2
Fuel Enrichment:	
Inner Core (w/o %)	15.0
Outer Core (w/o %)	20.0
Number of Assemblies in Core	
Low Enrichment Driver Fuel	30
High Enrichment Driver Fuel	66
Radial Blanket	42
GEM	6
Control Rod	6
SASS	1
Reflector	48
B4C/Radial Shield	120
IVS	60
Total	379
Refueling Interval (months)	12
Refueling Batches:	
Driver Fuel	3
Radial Blanket	3
Breeding Ratio (MOEC)	0.676
Burnup Reactivity Swing (% delta k / k _{BOEC})	0.273
Sodium Void Reactivity (pcm)	-1,527
Average Fuel Burnup (MWD/kg)	28.0
Peak Fuel Burnup (MWD/kg)	47.3
Average Linear Power for Driver Fuel(BOEC) (W/cm)	151.9
Peak Linear Power (W/cm)	234.6
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) (x 10 ²³ n/cm ²)	1.434
Cladding Material	HT9

표 2 소형노심(150 MWe)의 시동노심과
평형노심에서의 핵적 성능 파라미터 비교

	Startup	Equilibrium
Average Breeding(Conversion) Ratio	0.662	0.676
Refueling Interval (months)	12	12
Burnup Reactivity Swing(% delta k /k _{BOEC})	0.264	0.273
Average Fuel Burnup (MWD/kg)		
Driver Fuel (Inner)	13.16	27.98
Driver Fuel (Outer)	11.52	21.58
Radial Blanket	0.42	0.96
Peak Fuel Burnup (MWD/kg)		
Driver Fuel (Inner)	16.16	47.30
Driver Fuel (Outer)	18.48	38.41
Radial Blanket	0.75	1.77
Feed Fuel Enrichment (Inner/Outer) (%)	15.00/20.00	15.00/20.00
Fissile Inventory at BOC (kg)	1749.07	1711.28
Supplied Fissile U (kg/cycle)	967.69	917.22
Total Fissile Gain (kg/cycle)	-326.63	-297.05
Average Power Density (W/cc) at BOC		
Driver Fuel (Inner)	175.1	174.2
Driver Fuel (Outer)	151.5	150.5
Radial Blanket	8.6	10.8
Average Linear Power for Driver Fuel (W/cm)		
BOC	152.7	151.9
EOC	152.3	151.6
Peak Linear Power (W/cm)		
Inner Fuel	214.7	217.8
Outer Fuel	231.1	234.6
Radial Blanket	58.7	59.2
Power Peaking Factor for Driver Fuel		
BOC	1.749	1.787
EOC	1.729	1.765
Peak Neutron Flux (10 x 10 ¹⁵ n/cm ² s)		
Driver Fuel (Inner)	2.722	2.758
Driver Fuel (Outer)	2.350	2.378
Radial Blanket	1.212	1.226
Peak Fast Fluence (10 ²³ n/cm ²) (MOEC)		
Driver Fuel (Inner)	1.417	1.434
Driver Fuel (Outer)	1.295	1.307
Radial Blanket	0.626	0.632

표 3 소형노심(150MWe)의 주요 반응도 효과

	DC (Tdk/dT)	Rho (pcm)
Power Defect (cold to hot)		1,767
Doppler Effect		
Inner Driver Fuel	-0.00326	-336
Outer Driver Fuel	-0.00259	-267
Radial Blanket	-0.00005	-5
Total	-0.00588	-608
Total Expansion Effect		-1,128
Sodium Void Effect		
Inner Driver Fuel		1
Outer Driver Fuel		-1,228
Radial Blanket		-216
Total		-1,527
Control Rod Worth		
One Cluster (3 Rods)		-8166
Total (6 Rods)		-18,135
Interaction Factor		1.108
GEM		-905
USS		-3,656

표 4 소형노심 (150 MWe) 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	6	149893	899359	13562731(92.3%)
2	inner fuel	6	144757	868541	
3	inner fuel	6	140277	841660	
4	inner fuel	12	133101	1597214	
5	outer fuel	18	208169	3747036	
6	outer fuel	6	141282	847690	
7	outer fuel	12	131214	1574572	
8	outer fuel	12	118600	1423201	
9	outer fuel	6	101504	609025	
10	outer fuel	12	96203	1154433	
11	radial blanket	12	16730	200764	
12	radial blanket	6	19633	117798	
13	radial blanket	12	18749	224989	
14	radial blanket	12	17355	208257	
15	control rod	6	11250	67500	
16	USS	1	11250	11250	
total primary loop flow including bypass flow (lbm/hr) :					14694512
total bypass flow					2.0%

표 5 소형노심 (150 MWe)의 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	1099	374	1209	1226	1342
2	inner fuel	1097	91	1209	1224	1324
3	inner fuel	1095	341	1209	1224	1316
4	inner fuel	1089	336	1209	1222	1300
5	outer fuel	1000	240	1209	1226	1354
6	outer fuel	1084	330	1209	1226	1351
7	outer fuel	1075	144	1209	1222	1311
8	outer fuel	1070	208	1209	1222	1293
9	outer fuel	1041	213	1209	1220	1249
10	outer fuel	1034	212	1209	1220	1243
11	radial blanket	1004	208	1210	1210	1155
12	radial blanket	932	134	1210	1210	1157
13	radial blanket	920	213	1210	1210	1155
14	radial blanket	908	212	1210	1210	1153
15	control rod	769	341	-	-	-
16	USS	725	374	-	-	-

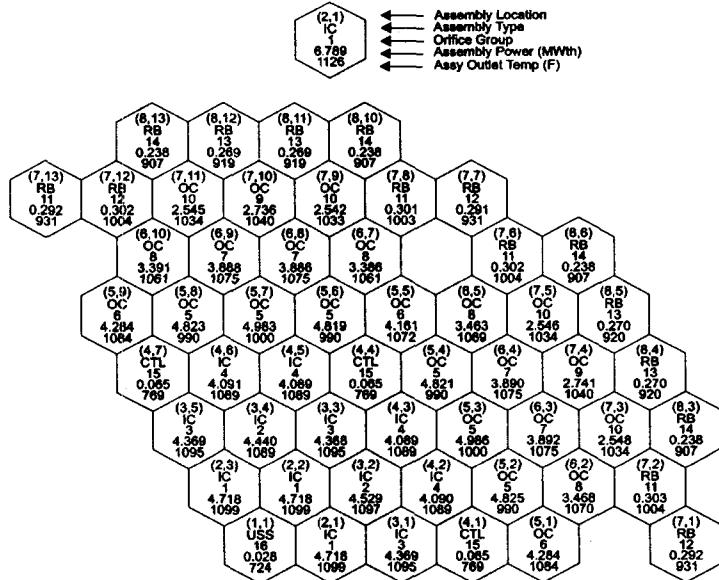


그림 2 소형노심 (150 MWe) 유량영역 구분결과 (1/3 노심)