

'98 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 98.03 설계 노심의 열수력특성 분석

김영균, 김원석, 김영일, 박창규
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

전기출력 150 MWe(열출력 392 MWth)의 U-Zr 이원합금핵연료 사용 소형노심인 액체금속로 KALIMER 98.03 설계 노심에 대하여 열수력 특성을 분석하고, 그 결과를 97.07 설계 노심의 열수력 설계특성과 비교·분석하였다. 분석을 위해서 냉각재 유량배분 계산에 ORFCE-F, 유량배분에 따른 온도계산에는 ORFCE-T를 사용하였는데, 이들은 현재 KALIMER 개발의 개념설계 초기 단계에서 사용하고 있는 모듈이다. 열수력 특성 분석은 먼저 각 집합체의 출력과 핵연료봉의 최고 선출력에 따라 유량그룹을 설정하고, 각 집합체의 최고 온도 연료봉에 대하여 냉각재 온도, 피복관 중심온도, 핵연료 중심온도 등을 계산하는 방식으로 수행한다. 열수력 특성분석 결과 98.03 설계 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 향상된 설계임을 알 수 있었다.

1. 서론

액체금속로 설계개념 연구과제에서 수행한 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 설계개념 타당성 연구 결과에 따라, KALIMER의 노심 규모는 전기출력 150 MWe(열출력 392 MWth)로, 시동에 필요한 초기노심 핵연료는 20%농축도 이하의 U-Zr의 이원합금핵연료를 설정하였으며, 이에 대한 개념설계의 세부사항은 KALIMER 설계 개념보고서[1]에 수록되어 있다. 금속핵연료 노심은 과도상태시 양호한 음의 반응도 특성을 가지고 있어 고유안전성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 고연소도에 따른 경제성 향상 및 건식재처리를 사용한 핵확산저항성 등의 이점을 가지고 있어, KALIMER의 설계개념과 잘 일치한다.

액체금속로 핵연료 집합체는 핵연료봉 다발이 삼각형 배열 형태로 장전되어 있는 덕트로 구성되어 있으며, 덕트간에는 유량의 흐름이 없는 폐쇄회로를 형성한다. 이들 각 집합체의 발열량을 냉각재 유량 배분에 의하여 효과적으로 추출하는 것이 열수력 설계의 목적이다. 각 집합체에 필요한 유량은, 정격시 뿐만 아니라 과도상태시에도 핵연료 및 구조재의 건전성 확보, 냉각재 비등방지 조건 등을 고려하여 정해진다. 전반적인 노심 열수력 개념설계 작업 흐름도[2]에 나타난 것처럼, 노심 핵설계에서 출력분포를 계산하면, 열수력학적

설계목표에 따라 노심내 전체유량을 결정하고, 노심내 출력분포에 따라 설계기준을 만족시키도록 각 집합체별 유량을 결정한다. 이렇게 하여 결정된 각 집합체의 유량을 몇 개의 동일 유량그룹으로 나누고, 집합체의 온도분포를 계산하여 각 유량그룹에서 핵연료 피복관 최고 중심온도가 같도록 하고, 압력강하를 고려하여 오리피스(orifice) 장치를 설계한다. 이 때 냉각재, 피복관 및 핵연료의 최고온도가 설계조건을 만족하는지를 확인하고 이에 따른 집합체별 최소유량을 결정하여 오리피스 장치 설계시 반영한다. 이러한 전체의 해석은 노심 핵설계와 연계되어 반복 수행하며, 핵열수력 안전성 분석을 통하여 최종 확인을 받게 된다.

본 논문에서는 현재 KALIMER 개발의 개념설계 초기 단계에서 사용하고 있는 모듈로서, 냉각재 유량배분 계산에 ORFCE-F, 유량배분에 따른 온도계산에는 ORFCE-T를 사용하였다[3]. 이러한 방법으로 수행한 98.03 설계 노심의 특성 분석 결과를 이미 수행하였던 97.07 설계 노심의 특성 분석 결과와 비교하였다.

2. 노심 유량영역 구분

각 집합체의 유량조절은 노심 입구 플레넘 부분에서의 노즐과 오리피스 장치의 조합 및 집합체 하단에 설치된 입구 구멍(hole) 등에 의하여 이루어진다. 그러나 이들은 일단 설계·제작되어 장전 되고 나면 유량을 변화시켜 가면서 조절할 수 없기 때문에, 이를 고려하여 각 집합체에는 핵연료의 노내 장전기간 중의 최대 발열량에 대응한 유량이 배분되어야 한다. 또 조절의 정밀도에는 기계적으로 한계가 있어, 미소한 유량조절은 기대할 수가 없다. 그러므로 이를 위하여 각 집합체의 필요 유량을 크기에 따라 여러 그룹으로 구분하고, 그 유량을 각 집합체에 배분하는 것이 현재 이용하고 있는 설계방법이다. 이와같이 하여 배분된 유량에 따라서 노심내의 온도분포가 계산된다. 한편, 집합체간의 겹과 제어봉, 반경방향 차폐체 등의 저발열부에서는, 일반적으로 총유량의 5% 정도가 할당된다[3,5].

노심 핵계산의 결과로부터 구한 집합체의 출력 및 집합체별 최대 선출력의 비율에 따라 필요 유량을 계산하고, 이를 기본으로 하여 10% 정도 범위내의 유량을 갖는 집합체들을 묶어 한 그룹으로 설정한다. 그러나 유량이 같다고 할지라도 집합체 종류가 달라지면 다른 그룹으로 나눈다[3]. 제어봉과 USS(Ultimate Shutdown System)에는 출력은 없지만 thermal striping을 고려하여 최소 필요 유량을 공급한다. 한편, 반사체, 차폐체, 노내저장 집합체 등의 경우에는 출력이 매우 작아 필요한 유량도 작고, 전 주기 동안 출력변화도 작아 유량배분에 커다란 영향을 미치지 않으므로, 개념설계 초기 단계에서는 일반적으로 이들 집합체에 대한 유량배분 계산을 수행하지 않으며, 이들 집합체에 대하여는 추후에 감마가열을 고려하여 유량배분을 실시하게 된다. 또한 노심의 집합체와 집합체 사이로 흐르는 바이패스 유량은 보통 전체유량의 1.5%로 가정하고 계산을 수행한다[3].

그림 1과 표 1에는 98.03 설계 노심의 구성과 설계사양을, 그림 3과 표 3에는 97.07 설계 노심의 구성과 설계사양을 각각 나타내었다. 두 노심 모두 392 MWth(150 MWe) 로 같은 용량이나, 97.07 설계 노심에서 나타났던 출력평탄화 및 연소에 따른 여러 가지 문제점[2]이 98.03 설계 노심에서는 많은 부분 개선되었다.

두 설계 노심 모두, 노심출구의 냉각재 온도는 530 ℃로 동일하나, 노심입구의 냉각재 온도를 361.4 ℃에서 386.2 ℃로 증가시켜 노심의 온도차이가 168.6 ℃에서 143.8 ℃로 감소함에 따라, 필요한 냉각재 유량이 증가하였다. 또한 핵설계의 최적화 과정에서 핵연료설계팀과의 설계연계 협의에 의해 핵연료봉의 외경을 7.4 mm에서 7.67 mm로 증가시켰으며[4], 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.

각각의 설계 노심에 대한 유량배분 결과는 표 2, 그림 2 및 표 4, 그림 4에 각각 나타내었다. 표에서 보듯이 98.03 설계 노심은 저농축 핵연료 노심에 2개, 고농축 핵연료노심에 4개, 반경방향 불량셀에 3개의 유량그룹이 배분되어, 97.07 설계 노심의 각각 4개, 6개, 4개씩의 유량그룹에 비해 같은 출력임에도 유량그룹이 5개가 감소하였다. 따라서 전체적으로 97.07 설계 노심에서 16개 었던 유량그룹이 98.03 설계 노심에서는 11개의 유량그룹으로 대폭 감소되었다. 출력이 평탄화됨에 따라 반경방향 불량셀의 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 MPa (30.76 psi)에서 0.18 MPa (26.35 psi)로 낮아졌다.

3. 노심내 온도 계산

위에서 배분된 유량에 의한 집합체별 최고 온도를 계산하여, 그 온도가 설계제한값 내에 있는지 확인하고 조절하여 그룹별로 필요한 유량을 최종 결정하게 된다. 이 결정된 유량에 따라서 집합체별 최고 출구온도, 핵연료 피복재 최고온도 및 최고 thermal striping 온도(임의의 집합체에서 냉각재 출구 온도와 주변 6개 집합체의 냉각재 출구 온도와의 차이 중 최고값) 등을 구한다. 각 부분의 온도는 그에 따른 온도증가에 해당하는 값을 집합체 입구 냉각재 온도에 더하여 계산된다. 또한 각 부분에서의 온도증가는 에너지 증가, 열전도도 및 열전달 계수로부터 계산된다. 이 때 각 단계마다 이렇게 계산된 정규(nominal)값에 설계 및 계산에 의한 불확정성 인자들인 HCF(hot channel factor)를 고려하여 2 σ 값을 계산한다. 온도계산은 일반적으로 각 집합체에서 최고 선출력을 갖는 연료봉의 피복관 중심온도를 같게 하는 제한조건을 적용하여 계산을 수행하는데, 이는 핵연료 피복관이 손상될 확률이 모든 집합체에서 일정하도록 해주기 위한 것이다. 이렇게 하여 계산된 온도는 최종 보수로해석 계산 결과 보다 매우 보수적인 값이 된다. 계산에서 사용하는 일반적인 설계 제한값으로는 집합체 출구온도를 593℃, thermal striping 온도를 188 ℃, 핵연료 표면온도를 704 ℃, 그리고 연료봉 중심온도를 927 ℃로 사용하고 있다[1,3].

유량그룹별 최고온도 계산결과는 표 2와 표 4에 수록하였다. 표에서 알 수 있듯이 피복관 중심에서의 2 σ 온도가 98.03 설계 노심에서는 628 ℃로서 97.07 설계 노심에서의 654 ℃보다 26 ℃가 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. 표에 나타낸 값들은 각각 다음과 같은 의미를 갖는다. 집합체 출구온도는 노심 상부구조의 열에 의한 노화에 영향을 주기 때문에 제한값을 주며, thermal striping 온도는 노심 상부구조의 열피로에 영향을 주기 때문에 중요한 값이다. 한편, 피복관 표면의 온도 및 연료봉 중심의 최고온도는 연료의 용융에 영향을 미치는 값이다. 그림 2와 그림 4는 노심별 최종 유량배분과 그에 따른 온도분포 계산결과를 집합체의 위치, 집합체의 종류, 유량그룹, 집합체 출력, 출구온도 값등에 대하여 나타낸 것이다.

4. 결론

전기출력 150 MWe(열출력 392 MWth)의 U-Zr 이원합금핵연료 사용 소형노심인 액체금속로 KALIMER 98.03 설계 노심에 대하여 열수력 특성을 분석하였으며, 그 결과를 97.07 설계 노심과 비교·검토하였다.

두 개의 설계 노심 모두 핵적 특성은 우수하게 나타났으며, 특히 음의 소듐 void 반응도가를 가짐으로써 노심안전성 확보 측면에서 매우 양호함을 보였다[8]. 그러나 열수력 특성분석 결과 98.03 설계 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 $^{\circ}$ C에서 628 $^{\circ}$ C로 낮아지는 등 매우 향상되었다. 97.07 설계 노심에서 종합적으로 지적되었던 노심내의 출력 평탄화와, 반경방향 블랑켈 영역의 출력분율의 증대가 현재의 98.03 설계 노심에서는 대부분 해결되었다.

계산 방법은 GE와의 공동작업으로 수행하였던 840 MWth의 이중탱크 풀형인 MDP 노심 분석의 경우와 같은 방법으로서, 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[6] 및 현재 개발중에 있는 부수로 해석용 코드 MATRA-LMR[7]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.

본 KALIMER 98.03 설계 노심(전기출력 150 MWe)은 KALIMER 우라늄 노심 설계안으로 제안될 수 있으며, 이를 기초로 한 더욱 상세한 노심해석 작업에 의하여 최종적으로 KALIMER 노심설계 개념을 확립할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] C. K. Park, et al., KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97 (1997).
- [2] 김영균 외, "액체금속로 노심 열수력설계 및 특성 비교.분석", '97 추계학술발표회 논문집, KNS (1997).
- [3] Y. G. Kim, et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995).
- [4] 액체금속로 업무처리전, 1998. 1. 12, 2. 12 (1998).
- [5] T. Yokoo, et al., "Design Study on Metal Fuel FBR Cores", T91013, CRIEPI (1991).
- [6] 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).
- [7] 김원석 외, "액체금속로 노심열수력 해석을 위한 부수로 해석코드 개발", '98 춘계학술발표회 논문집, KNS (1998).
- [8] 김영인 외, "액체금속로 KALIMER 예비노심설계 및 특성 분석", '97 추계학술발표회 논문집, KNS (1997).

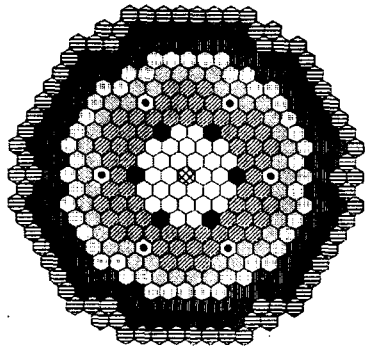


그림 1 노심 배치도 - 98.03 설계 노심

- Inner Core 30
- ◐ Outer Core 66
- ◑ Radial Blanket 42
- Control Rod 6
- ⊗ USS 1
- ⊙ GEN 6
- ⊖ Reflector 48
- ⊕ B C Shield 54
- ⊖ IVS 54
- ⊕ Shield 72

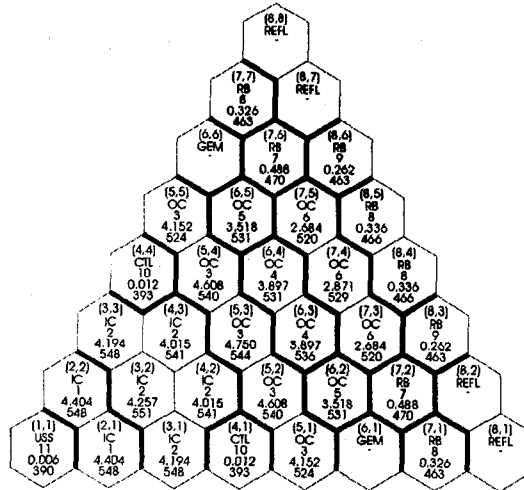
표 1 노심 설계사양 - 98.03 설계 노심

Core Thermal Output (MWh)	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)	344.73
Core Configuration	Radial Homogeneous
Number of Core Enrichment Zones	2
Feed Fuel Enrichments (w/o%) (IC/OC)	14.41/20.00
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)	149.8
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 (E>0.1 MeV) (x10 ²¹ n/cm ²)	1.399
Cladding Material	HT9

표 2 노심 유량영역 및 최고온도 (2σ) - 98.03 설계 노심

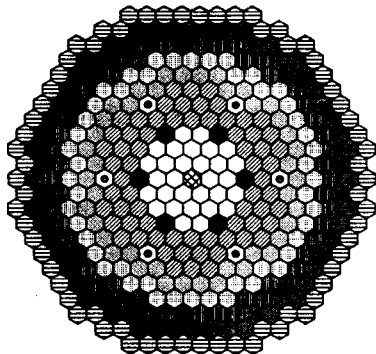
Orifice Group	Assy Type	Assy Ct.	Assy Flow (kg/s)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (°C)	Thermal Stripping (°C)	Cladding Midwall (°C)	Fuel Surface (°C)	Fuel Center (°C)
1	IC	6	21.6		575	160	628	635	680
2	IC	24	20.4		578	158	628	635	674
3	OC	24	23.7		571	148	628	636	691
4	OC	12	20.6		561	31	628	635	675
5	OC	12	19.2		556	78	628	634	667
6	OC	18	15.8	90.7	554	79	628	633	650
7	RB	12	4.6		508	78	628	630	632
8	RB	18	3.3		501	79	628	629	621
9	RB	12	2.7	6.83	498	71	628	629	616
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 %



- ← Assembly location
- ← Assembly type
- ← Flow Group
- ← Assembly Power (MWh)
- ← Assy Outlet Temp(°C)

그림 2 유량영역구분 결과 (1/6 노심)
 - 98.03 설계 노심



- Inner Core 30
- ◐ Outer Core 66
- ◑ Radial Blanket 42
- Control Rod 6
- ⊗ USS 1
- ⊙ GEM 6
- ◐ Reflector 48
- ◑ B.C Shield 54
- ◑ IVS 60
- ◑ Shield 66

표 3 노심 설계사양 - 97.07 설계 노심

Core Thermal Output (MWth)	392.0
Core Electric Power(MWe)	150.0
Net Plant Thermal Efficiency(%)	38.3
Core Inlet/Out Temperature(°C)	361.4/530.0
Total Flow Rate (kg/s)	1824
Active Core Height (cm)	100.0
Core Diameter (cm)	344.3
Core Configuration	Radial Homogeneous
Number of Core Enrichment Zones	2
Feed Fuel Enrichments (w/o%) (IC/OC)	U-10%Zr 15.0/20.0
Fuel Form	Binary Alloy
Refueling Interval (months)	12
Refueling Batches (Driver/R. Blanket)	3/3
Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	149.0
Pins per Fuel Assembly (Driver/R. Blanket)	271/217
Pin Outer Diameter (Driver/R. Blanket) (mm)	7.4/12.0
Pin P/D Ratio (Driver/R. Blanket)	1.189/1.083
Average/Peak Fuel Burnup (MWD/kg)	28.0/47.3
Avg/Peak Linear Power for Driver (BOEC)(W/cm)	151.9/234.6
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) (x10 ¹⁹ n/cm ²)	1.434
Cladding Material	HT9

그림 3 노심 배치도 - 97.07 설계 노심

표 4 노심 유량영역 및 최고온도 (20) - 97.07 설계 노심

Orifice Group	Assy Type	Assy Ct.	Assy Flow (kg/s)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (°C)	Thermal Striping (°C)	Cladding Midwall (°C)	Fuel Surface (°C)	Fuel Center (°C)
1	IC	6	18.9		593	190	654	663	728
2	IC	6	18.2		592	33	654	663	718
3	IC	6	17.7		591	172	654	662	713
4	IC	12	16.8		587	169	654	661	704
5	OC	18	26.2		538	116	654	663	734
6	OC	6	17.8		584	166	654	663	733
7	OC	12	16.5		579	62	654	661	711
8	OC	12	14.9		577	98	654	661	701
9	OC	6	12.8		561	101	654	660	676
10	OC	12	12.1	92.3	557	100	654	660	673
11	RB	12	2.1		540	98	654	654	624
12	RB	6	2.5		500	57	654	654	625
13	RB	12	2.4		493	101	654	654	624
14	RB	12	2.2	5.1	487	100	654	654	623
15	CTL	6	1.4		409	172	-	-	-
16	USS	1	1.4	0.5	385	190	-	-	-

Total primary loop flow : 1824 kg/s
 Total bypass flow : 2.0 %

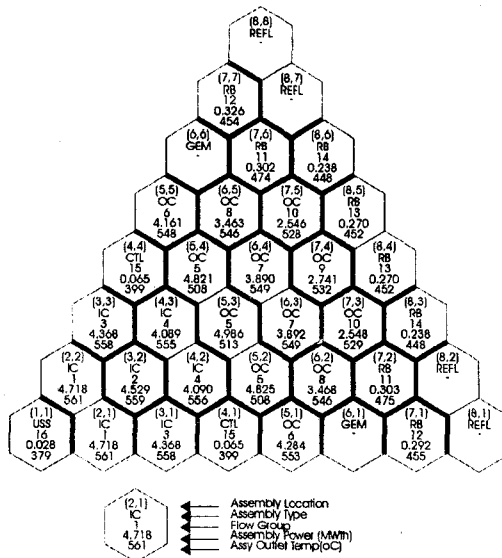


그림 4 유량영역구분 결과 (1/6 노심) - 97.07 설계 노심