

액체금속로 노심 열수력설계 및 특성 비교·분석

김영균, 김영인, 김의광, 송훈, 김영철

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내개발 액체금속로 KALIMER 노심으로 설계한 전기출력 150 MWe (열출력 392 MWth)의 U-Zr이원합금핵연료 사용 소형노심에 대하여 열수력 특성을 분석하고, 그 결과를 전기출력 333 MWe (열출력 840 MWth)의 중형노심설계 특성과 비교·분석하였다. 분석에는 국내개발 액체금속로 KALIMER 노심설계기술 개발의 일환으로서 개발한 개념설계 초기 단계에서의 노심 열수력 특성 분석 방법을 사용하였다.

열수력 특성 분석은 먼저 각 집합체의 최고 선출력에 따라 유량그룹을 설정하고, 각 집합체의 최고온도 연료봉에 대하여 냉각재 온도, 피복관 중심온도, 핵연료 중심온도 등을 계산하는 방식으로 수행하였다. 특성 분석 결과 두 노심 모두 노심내 출력분포를 더욱 평탄화 하고, 노심핵연료 영역에 대한 반경방향 블랑켈 영역의 출력비율을 높히는 작업이 필요하다.

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]. 금속핵연료 노심은 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.

액체금속로 핵연료 집합체는 BWR과 같이 일반적으로 덕트를 이용하는데, 열수력 설계는 각 집합체의 발열량에 따라 냉각재 유량을 배분하여 냉각재를 유용하게 이용하는 것을 목적으로 한다. 각 집합체의 필요 유량은, 정격시 뿐만 아니라 과도시 핵연료 및 구조재의 건전성 확보, 냉각재 비등방지 등의 조건에 의하여 정해진다. 전반적인 작업 흐름도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 노심 핵설계에서 출력분포를 계산하면, 열수력학적 설계목표에 따라 노심내 전체유량을 결정하고, 출력분포에 따라 설계기준을 만족시키도록 각 집합체별 유량을 계산한다. 이렇게 하여 정해진 각 집합체의 유량을 몇 개의 동일 유량그룹으로 나누고, 집합체의 압력강하, 온도분포 등을 계산하여 각 유량그룹에서 핵연료 피복관 최고 중심온도가 같도록 오리피스(orifice) 장치를 설계한다. 이 때 냉각재, 피복관 및 핵연료의 최고온도가 설계조건을 만족하는지를 확인하고 이에 따른 집합체별 최소유량을 결정하여 오리피스 장치 설계시 반영한다. 전체의 해석은

노심 핵설계와 연계되어 반복 수행, 핵열수력 안전성 분석을 통하여 검증을 받는다.

여기에서는 국내개발 액체금속로 KALIMER 노심설계기술 개발의 일환으로서 개발한 개념설계 초기 단계에서의 노심 열수력 설계 및 특성 분석 방법[3]을 사용하여 노심의 열수력 특성을 분석하였다. 이 소형노심의 특성 분석 결과를 국내개발 액체금속로 KALIMER 노심설계 개발의 일환으로 수행하였던 333 MWe (열출력 840 MWth)의 중형노심 및 325 MWe (열출력 840 MWth)의 MDP 노심 특성 분석 결과와 비교하였다.

먼저 노심의 유량영역 구분에 대해서 기술하고, 그 결과를 바탕으로 계산되는 집합체별 최고온도에 대하여 기술하였다. 그리고 소형노심, 중형노심 및 MDP 노심 특성 분석결과를 비교·분석에 대하여 기술하였다.

2. 노심 유량영역 구분

각 집합체의 유량조절은 냉각재입구 노즐과 노심지지판 연결관 입구 부분의 조합과, 집합체 내부에 설치된 오리피스 등의 기구에 의하여 이루어진다. 이들의 기구로는 유량을 변화시켜 가면서 조절할 수 없기 때문에, 각 집합체에는 핵연료의 노내 장전기간 중의 최대 발열량에 대응하여 일정한 유량이 배분된다. 또 조절의 정밀도에는 기계적으로 한계가 있어, 미소한 유량의 조절은 기대할 수 없다. 이를 위한 현재의 설계방법은 각 집합체의 필요유량을 크기에 따라 여러 그룹으로 구분하고, 그 유량을 각 집합체에 배분하는 것이다. 이와같이 하여 배분된 유량으로부터 노심내의 온도분포가 계산된다. 한편, 집합체간의 gap과 제어봉, 반경방향 차폐체 등의 저발열부에서는, 일반적으로 총유량의 5% 정도가 할당된다.

노심 핵계산의 결과로부터 구한 집합체별 최대 선출력에 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 나누었다.

제어봉과 USS에는 모두 최소 필요 유량만을 배분하였으며, 반사체, 차폐체, 노내저장 집합체 등은 출력이 작아 필요한 유량도 작고, 전 주기 동안 출력변화도 작아 유량배분에 커다란 영향을 미치지 않으므로, 개념설계 초기 단계에서는 이들 집합체에 대한 유량배분 계산을 수행하지 않는다. 이들 집합체에 대하여는 추후에 감마선에 의한 열발생량을 고려하여 유량배분을 실시하게 된다. 또한 노심의 집합체와 집합체 사이로 흐르는 바이패스 유량은 보통 전체유량의 1.5%로 가정하고 계산을 수행한다[4].

그럼 2, 4, 6 및 표 1, 3, 5는 각 노심의 구성과 설계사양을 보여준다. 소형노심은 392 MWth이고, 중형노심 및 MDP 노심은 840 MWth로 같은 용량의 노심이다. 유량배분 결과는 표 2, 4, 6에 각각 나타내었다. 소형노심은 저농축핵연료심에 4개, 고농축핵연료노심에 6개, 반경방향 블랑켈에 4개, MDP 노심은 각각 2개, 4개, 6개씩의 유량그룹이 배분되었으나, KALIMER 중형노심은 저농축핵연료심에 4개, 고농축핵연료노심에 8개로서 반경방향 블랑켈 영역은 따로 유량을 배분하지 않았다. 이는 반경방향 블랑켈 영역의 출력이 너무 낮아 이를 고려할 경우 핵연료 피복판 중심온도가 매우 높게 나타나기 때문이다.

3. 온도 계산

이와 같이 배분된 유량에 의한 집합체별 최고 온도를 계산하고, 그 온도가 설계제한값 안에 있는지 확인하여 그룹별로 필요한 유량을 최종 결정하게 된다. 이렇게 결정된 유량에 따라서 집합체별 최고 출구온도, 핵연료 피복재 최고온도 및 최고 thermal striping 온도 (집합체 출구에서 주변 집합체 출구 온도와의 차이

중 최고값) 등을 구한다. 각 부분의 온도는 그에 따른 온도증가에 해당하는 값을 집합체 입구온도에 더하여 계산된다. 또한 각 부분에 해당하는 온도증가는 에너지 증가, 열용량, 열전도도 및 열전달 계수로부터 계산된다. 이 때 설계 및 계산에 의한 불확정성 인자들로 고려하여 계산한다. 온도계산은 일반적으로 피복관 중심온도를 같게 하는 제한조건을 적용하여 계산을 수행한다. 이렇게 하여 계산된 온도는 최종 부수로해석 계산 결과 보다 매우 보수적인 값이다. 계산에서 사용하는 설계제한값은 집합체 출구온도를 1100°F, thermal striping 온도를 370°F, 피복관 표면온도를 1300°F, 그리고 연료봉 중심온도를 1800°F로 사용하고 있다[2].

집합체별 최고온도 계산결과는 표 2, 4, 6에 나타낸 것과 같다. 이 계산값들은 유량영역 중에서 가장 높은 출력을 갖는 연료봉에 대한 값으로 2σ에 해당하는 값이다. 표에 나타낸 값들은 각각 다음과 같은 의미를 갖는다. 집합체 출구온도는 노심 상부구조의 열에 의한 노화에 영향을 주며, thermal striping 온도는 노심 상부구조의 열피로에 영향을 준다. 한편, 피복관 표면의 온도 및 연료봉 중심의 최고온도는 연료의 용융에 영향을 미치는 값이다. 그림 3, 5, 7은 노심별 온도분포 계산결과를 집합체의 위치, 집합체의 종류, 유량 그룹, 집합체 출력, 출구온도 및 핵연료 중심온도 값들에 대하여 나타낸 것이다.

4. 노심 열수력 설계 특성

앞에서 계산한 중형노심과 소형노심의 열수력 특성을 비교하면 다음과 같다. 우선, 두 노심 모두 반경방향 불량켈 영역의 선출력이 노심핵연료에 비해 너무 낮아 유량영역구분에 어려움이 있었다. 두 노심 모두 같은 조건에서 유량배분을 수행하였는데, 중형노심에서는 노심핵연료에 대해서만 계산을 수행하여 12개의 유량그룹으로 나누었고, 소형노심에서는 노심핵연료 영역과 반경방향 불량켈 영역에 대하여 총 16개의 유량그룹으로 나누었다. 이것은 각각의 온도 제한조건을 맞추기 위해서 나타난 결과이나, 유량 그룹 수가 너무 커서 경제성이 떨어지므로, 다음단계의 계산에서는 그 숫자를 2/3정도로 줄이는 방안을 모색해야 할 것이다.

소형노심에서 보듯이 반경방향 불량켈 영역에 배분된 유량이 5.1%로서 노심핵연료 영역에 배분된 92.3%에 비해 무척 낮다. 이것은 일반적으로 액체금속로의 경우 반경방향 불량켈 영역의 출력이 노심 전체에서 차지하는 비율이 5% 정도인데, 현재 구성된 노심의 경우에는 1% 정도로서 매우 낮게 나타났기 때문이다. 그러므로 출력분포를 보다 평탄하게 하고, 반경방향 불량켈 영역의 선출력을 현재 값의 5배 정도로 올려주어 10% 정도의 유량이 반경방향 불량켈 영역에 배분될 수 있도록 하는 노심구성 및 핵계산이 강구되어야 할 것이다[5].

현재 KALIMER 개발의 개념설계 초기 단계에서는, 냉각재 유량배분 설계에 ORFCE-F, 유량배분에 따른 온도계산에는 ORFCE-T를 사용하고 있다. 개념설계 초기 단계에서 계산된 집합체의 유량분포나 온도분포는, 다음 단계 계산에서 SLTHEN 코드[6] 및 부수로 해석용 코드를 사용하여 좀 더 상세한 계산을 수행한다. SLTHEN 코드는 에너지 방정식을 이용하여 집합체의 온도분포를 계산하는 SUPERENERGY-2 코드를 기초로 하여 작성되었으며, 부수로 해석 코드로는 COBRA-VI-I를 기본으로 하여 액체금속로 부수로 해석용 코드를 개발 중에 있다. 이 코드들을 이용하여 노심 전체에 대한 온도분포 계산 즉, 모든 집합체 및 모든 연료봉에 대한 온도분포를 계산한다.

5. 결론

국내개발 액체금속로 KALIMER 노심으로 설계한 전기출력 150 MWe (열출력 392 MWth)의 U-Zr이원합

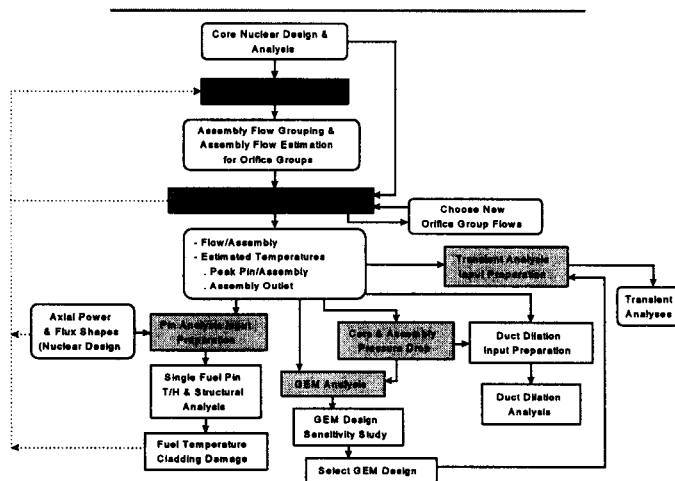
금핵연료사용 소형노심에 대하여 열수력 특성을 분석하였으며, 그 결과를 전기출력 333 MWe (열출력 840MWth)의 중형노심설계 특성과 비교·분석하였다. 분석 방법은 GE와의 공동작업으로 수행하였던 840 MWth의 MDP 노심 분석과 같은 방법을 사용하였다. 중·소형 노심 모두 핵적 특성은 우수하게 나타났으며, 특히 음의 소듐 void 반응도가를 가짐으로써 노심안전성 확보 측면에서 매우 양호함을 보였다[7]. 그러나 열수력 특성 분석결과 두 노심 모두 반경방향 블랑켈 영역의 출력이 핵연료 영역에 비하여 매우 낮고, 전체노심의 출력평탄화가 잘 이루어지지 않아서 유량 그룹이 많게 되었다. 종합적으로는 노심 전체적으로 출력분포를 보다 평탄하게 하고, 반경방향 블랑켈 영역의 출력분율을 증대시킬 수 있도록 하는 노심구성 및 핵계산 작업이 필요할 것이다.

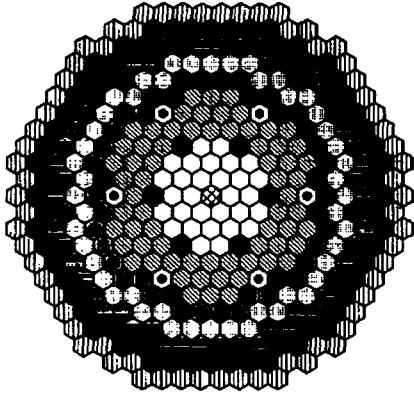
본 소형노심(전기출력 150 MWe) 설계는 국내개발 KALIMER 노심의 노심설계안으로 제안될 수 있으며, 이를 기초로 하여 노심설계작업에서 제기된 열수력 특성 분석 결과를 고려하여 KALIMER 노심설계 개념을 최종적으로 확립하여야 할 수 있을 것이다.

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 외, "액체금속로 요소기술 개발," KAERI/RR-1713/96 (1997).
- [4] Y. G. Kim, et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995).
- [5] T. Yokoo, et al., Design Study on Metal Fuel FBR Cores, T91013, CRIEPI (1991).
- [6] 양원식 외, "액체금속로 노심내 정상 상태 열수력 해석을 위한 전산 코드 개발에 관한 연구," 기초전력 공학공동연구소 (1996).
- [7] 김영인 외, "액체금속로 KALIMER 예비노심설계 및 특성 분석," '97 추계학술발표회 논문집, KNS (1997).

그림 1 액체금속로 노심 열수력 개념설계 흐름도





- Inner Core 30
- ◐ Outer Core 66
- ◑ Radial Blanket 42
- ◒ Control Rod 6
- ◓ USS 1
- ◔ GEN 6
- ◕ Reflector 48
- ◖ B.C Shield 54
- ◗ IVS 60
- ◘ Shield 66

표 1 소형노심(150 MWe)의 설계사양

Core Thermal Output (MWt)	392.0
Core Electric Power(MWe)	150
Plant Thermal Efficiency(%)	38.3
Core Inlet/Out Temp.(°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)	15.0/20.0
Fuel Form	U-10%Zr Binary Alloy
Refueling Interval (months)	12
Refueling Batches	3
Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	157
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)	1.189/1.063
Average/Peak Fuel Burnup (MWD/kg)	28.0/47.3
Average/Peak Linear Power (BOEC) (W/cm)	151.9/234.6
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) (x 10 ²⁰ n/cm ²)	1.434
Cladding Material	HT9

그림 2 소형노심(150 MWe) 배치도

표 2 소형노심(150 MWe) 유량영역별 최고온도 (2σ)

Orifice Group	Assy Type	Assy Ct.	Assy Flow (lbm/hr)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (°F)	Thermal Striping (°F)	Cladding Midwall (°F)	Fuel Surface (°F)	Fuel Center (°F)
1	IC	5	149893		1099	374	1209	1226	1342
2	IC	6	144757		1097	91	1209	1224	1324
3	IC	6	140277		1095	341	1209	1224	1316
4	IC	12	133101		1089	336	1209	1222	1300
5	OC	18	208169		1000	240	1209	1226	1354
6	OC	6	141282		1084	330	1209	1226	1351
7	OC	12	131214		1075	144	1209	1222	1311
8	OC	12	118600		1070	208	1209	1222	1293
9	OC	6	101504		1041	213	1209	1220	1249
10	OC	12	96203	92.3	1034	212	1209	1220	1243
11	RB	12	16730		1004	208	1210	1210	1155
12	RB	6	19633		932	134	1210	1210	1157
13	RB	12	18749		920	213	1210	1210	1155
14	RB	12	17355		908	212	1210	1210	1153
15	CTL	6	11250	5.1	769	341	-	-	-
16	USS	1	11250	0.5	725	374	-	-	-
total primary loop flow (lbm/hr) :					14694512				
total bypass flow					2.0%				

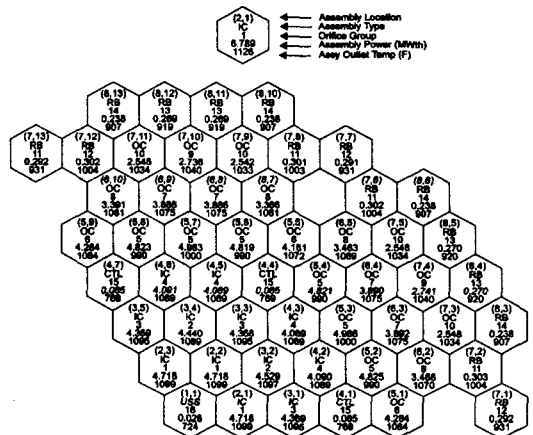
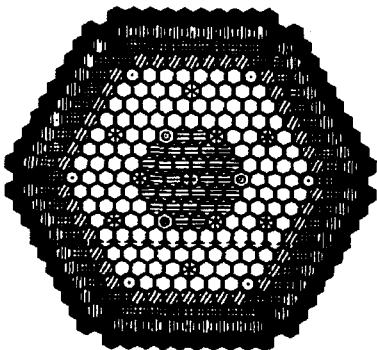


그림 3 소형노심(150 MWe)의 계산결과 (1/3 노심)



- ◐ Low Enrichment Fuel 30
- ◑ High Enrichment Fuel 120
- ◒ Radial Blanket 42
- ◓ Control 9
- ◔ Scrape 1
- ◕ Ultimate Structure 3
- ◖ Gas Expansion Module 4
- ◗ B.C Shield 54
- ◘ IVS 54
- ◙ Shield 72

표 3 중형노심(333 MWe)의 설계사양

Core Thermal Power(MWt)	840
Core Electric Power(MWe)	333
Plant Thermal Efficiency(%)	39.6
Core Inlet/Out Temp.(°C)	375/530
Total Flow Rate (kg/s)	4275
Active Core Height (cm)	100.0
Core Diameter (cm)	350.8
Plant Capacity Factor(%)	85
Core Configuration	Radial Homogeneous
Number of Core Enrichment Zones	2
Feed Fuel Enrichments (w/o%) (IC/OC)	14.00/18.91
Fuel Form	U-10%Zr Binary Alloy
Refueling Interval (months)	18
Number of Batches	3
Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	157
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)	1.197/1.063
Average/Peak Fuel Burnup (MWD/kg)	93.7/116.6
Average/Peak Linear Power (BOEC) (W/cm)	185.4/297.9
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) (x 10 ²⁰ n/cm ²)	3.452
Core Structural Material	HT9

그림 4 중형노심(333 MWe) 배치도

표 4 중형노심(333 MWe)의 유량영역별 최고온도(2σ)

Orifice Group	Assy Type	Assy Ct.	Assy Flow (lbm/hr)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (°F)	Thermal Striping (°F)	Cladding Midwall (°F)	Fuel Surface (°F)	Fuel Center (°F)
1	IC	12	220837		1126	400	1239	1258	1398
2	IC	18	216561		1118	358	1240	1257	1387
3	OC	24	307711		1023	267	1239	1260	1433
4	OC	24	218186		1099	353	1239	1259	1414
5	OC	6	208969		1067	143	1239	1257	1387
6	OC	12	196115		1055	311	1239	1256	1363
7	OC	12	190206		1036	156	1240	1255	1348
8	OC	18	193201		975	220	1240	1253	1313
9	OC	12	183214		954	147	1240	1252	1289
10	OC	12	181617	96.99	919	156	1240	1250	1264
11	CTL	10	25000		765	400	-	-	-
12	USS	3	25000	0.96	769	354	-	-	-
total primary loop flow (lbm/hr) :						33935189			
total bypass flow						2.05%			

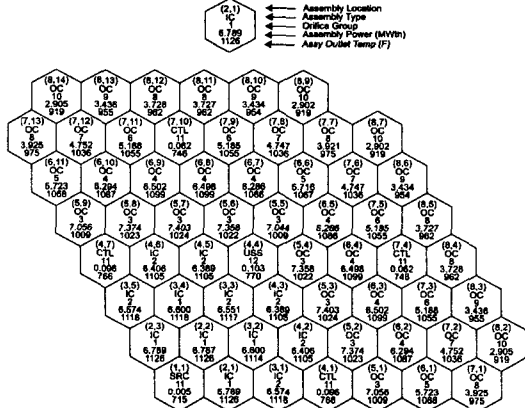


그림 5 중형노심(333 MWe)의 계산결과 (1/3 노심)

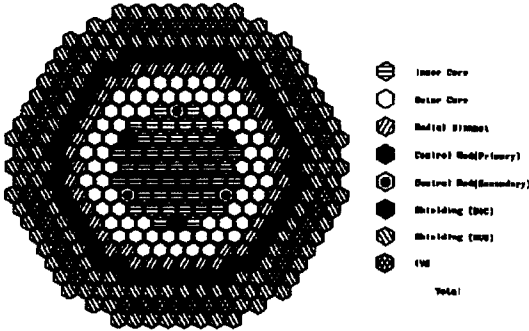


그림 6 MDP(840 MWth) 노심 배치도

표 5 MDP(840MWth) 노심의 설계 사양

Core Thermal Output (MWt)	840
Core Electric Power(MWe)	325
Plant Thermal Efficiency(%)	38.7
Core Inlet/Out Temp.(°C)	375/530
Total Flow Rate (kg/s)	4260
Active Core Height (cm)	115
Core Diameter (cm)	335
Plant Capacity Factor (%)	85
Core Configuration	Homogeneous
Number of Core Enrichment Zones	2
Feed Fuel Enrichments (w/o) (IC/OC)	10.0/16.5
Fuel Form (Driver)	U-Pu-10%Zr Ternary Alloy
Refueling Interval (months)	24
Refueling Batches(Fuel/RB)	4/5
Duct Inside Flat to Flat Distance (mm)	157
Fins per Fuel Assembly (Driver/R. Blanket)	271/127
Pin Outer Diameter (Driver/RB) (mm)	8.0/12.5
Pin P/D Ratio (Driver/RB)	1.17/1.09
Average/Peak Fuel Burnup (MWD/kg)	140/170
Average/Peak Linear Power (BOEC) (W/cm)	220/390
Peak Fast Neutron Fluence (E>0.1 MeV) (x 10 ²¹ n/cm ²)	8.4
Cladding Material	ODS

표 6 MDP(840MWth)노심의 유량영역별 최고온도 (2σ)

Orifice Group	Assy Type	Assy Ct.	Assy Flow (lbm/hr)	Zone Flow (%)	Assy Outlet (°F)	Thermal Striping (°F)	Cladding Midwall (°F)	Fuel Surface (°F)	Fuel Center (°F)
1	IC	19	291059		1133	106	1239	1257	1507
2	IC	30	257510		1117	306	1245	1261	1477
3	OC	30	279656		1133	290	1271	1291	1655
4	OC	6	255574		1059	288	1228	1245	1559
5	OC	18	225324		1059	286	1235	1250	1518
6	OC	12	206152		1024	254	1220	1234	1469
7	RB	6	112928	87.8	953	288	1211	1218	1308
8	RB	12	87644		953	286	1221	1226	1282
9	RB	12	78240		941	274	1217	1222	1265
10	RB	12	51381	9.7	910	254	1213	1216	1219
11	CTL	3	25000		897	258	-	-	-
12	USS	3	25000	0.4	844	306	-	-	-
total primary loop flow (lbm/hr) :						33826993			
total bypass flow						2.1%			

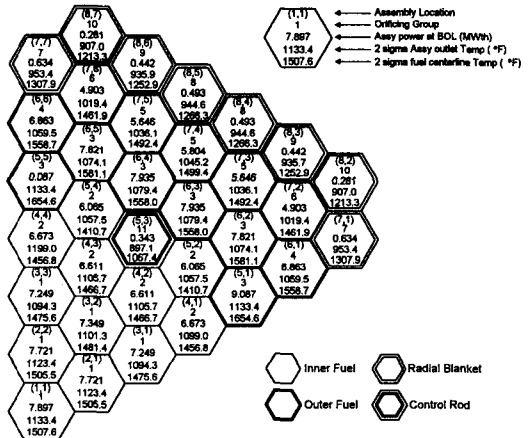


그림 7 MDP(840 MWth) 노심의 계산결과 (1/6노심)