

KALIMER 우라늄고속핵연료노심의 평형주기 설계인자 변경 연구

김상지, 김영인, 김영진, 박창규

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

KALIMER 우라늄 고속핵연료노심의 평형주기에 대하여 주기길이, 농축도, 중식비의 관점에서 설계인자 변경에 따른 변화를 분석하였다. 유효노심높이, 반경방향 불랑켓의 batch 수, 개스팽창모듈(GEM)의 적용성, 노용기내핵연료저장(IVS)의 사용, 핵연료핀의 직경 증가 등에 대한 설계 변경이 고려되었다. 본 연구결과를 통하여, 평탄화된 출력분포 및 핵연료의 이용도 향상을 기하면서 설계변경이 타 분야에 미치는 영향을 최소화하고 본래 KALIMER의 안전성을 유지하고자 핵연료핀의 직경을 증가시킨 fat pellet 설계방안을 채택하였다.

1. 서론

현재까지 제안된 KALIMER 우라늄고속핵연료노심(97.07 노심)[1]에 대한 주요 설계인자 및 노심 구성을 표 1 과 그림 1 에서 각각 보이고 있다. 표 1 에서 보는 바와 같이 KALIMER 노심은 상업운전중인 가압경수로에 비해서 낮은 선출력 밀도를 갖고 있다. 이는 안전성 측면에서 장점을 가지기는 하나, 이 정도의 선출력 밀도를 갖는 1000 MWe 급의 고속로심을 설계하게 되면 구동핵연료집합체만으로도 노심직경이 4m 에 이르게 될 것이다. KALIMER 가 국내 액체고속로 개발에서 원형로로서 의미를 가지려면 선출력 밀도 또한 상용 대형노심급의 선출력 밀도를 가지는 것이 바람직하다.

선출력 밀도를 증가시키면 중성자속 준위 증가로 인하여 핵연료 연소율이 동반 상승하게 된다. 따라서, 연소율에 따른 연소반응도감소량 증가를 극복하고 주어진 주기길이를 만족하려면 주기초에서의 노심의 잉여반응도를 증가시켜야 한다. 노심의 잉여 반응도를 증가시키려면, 간단히는 핵연료의 농축도를 증가시키면 되지만 경제성 및 고농축우라늄의 사용제한 측면에서 KALIMER 에서 사용가능한 핵연료 농축도는 현 시점에서는 20 w/o 이하로 제한되어 있다[1]. 그러므로, 핵연료 농축도를 허용 한계치로부터 적절한 여유를 가지고 설계가능하도록 다른 설계인자를 조정하므로써 향후 잉여반응도 증가를 위한 최후의 간단한 선택으로서 농축도 증가방안을 보유하는 것이 중요하다.

2. 연구 방향 및 계산 방법론

선출력밀도를 증가시키기 위한 전제조건으로서 주기초의 잉여반응도 확보가 필요하며, 이를 위하여 외부 노심 농축도는 20w/o 로 고정하고 주기길이 310 EFPD 를 만족하기 위하여 요구되는 내부노심 농축도를 고찰하였다. 이 경우, KALIMER 97.07 우라늄노심의 제원은 플루토늄을 사용하는 노심설계자료[2]를 기초하였으므로, 설계인자 변경 후의 KALIMER 우라늄 평형노심이 핵연료 재순환을 고려한 평형노심의 출력분포 특성을 가지도록 하는 것을 본 연구의 목표로 하였다. 한편, 최종적인 설계인자 변경 선택 기준으로서 KALIMER 설계가 타 분야와의 연계를 통하여 종합적으로 수행되는 점을 감안하여 설계인자 변경에 따른 타 설계분야에의 영향을 최소화하여야 하는 점도 포함하였다. 이에 따라, 유효노심높이, 핵연료집합체의 기하학적 설계사양, 핵연료 재장전 전략 등을 변화시켜 가면서 KALIMER 우라늄급속핵연료노심의 핵연료 소요 특성 등을 분석하고 변경전인 97.07 노심 제원으로 핵연료 재순환이 고려된 노심특성과 비교하였다.

본 연구에서는 액체금속로 노심설계 종합계산체계인 K-CORE 시스템[3]을 사용하여 평형주기분석을 수행하였다. 중성자속 및 연소에 대한 반복 계산을 통한 평형주기분석에서 중성자속 계산은 9 군 단면적세트를 기본으로 3 차원 육각주(hex-z) 모델에 대한 노달확산이론 계산을 수행하였으며, 연소계산에서는 핵연료재장전을 비롯한 일체의 핵연료관리전략을 일정한 양식으로 수행하는 평형노심을 대상으로 연소특성을 분석하였다.

3. 평형주기 설계인자 변경 결과 및 논의

3.1 우라늄 평형노심설계(97.07 노심)

KALIMER 97.07 노심설계에서 유효노심높이는 실온에서 100cm 로서 전출력 운전시에는 10%의 축방향 팽창을 고려하여 110cm 이다. 또한, 내·외부 노심 및 반경방향 블랑켓 영역은 3 batch 장전을 가정하고 있다. 모든 설계인자를 그대로 둔 채, 평형노심의 주기 길이를 변화시켜 가면서 내부노심에 필요한 장전핵연료 농축도를 평가하였을 때의 결과는 그림 2 에 보여주고 있다. 일반적으로 균질노심에서는 출력 평탄화와 이에 기인하는 방출연소도의 균일화 및 소듐 void 반응도효과 감소를 도모하기 위하여 외부노심의 핵연료농축도가 내부 노심에 비하여 보다 크도록 배치한다. 특히 KALIMER 노심과 동급의 Pu 노심설계의 경우, 일반적으로 내부와 외부 노심간 약 5 w/o 정도의 농축도 차이를 가진다 [3]. 이러한 요건을 충족하고 20 w/o 의 핵연료 농축도 상한치를 고려하여, 그림 2 를 비롯한 모든 계산에서는 외부노심의 농축도는 20w/o 로 고정하고 내부노심의 핵연료 농축도의 변화를 독립변수로 잡고 있다.

그림 2 에서 보는 바와 같이 현재 KALIMER 노심을 85% 성능인자를 고려하여 1년주기 운전을 하려면, 내부노심의 핵연료 농축도는 16.3w/o 에 달한다. 더욱이, U 핵연료는 같은 농축도의 Pu 핵연료에 비하여 75% 정도의 반응도가를 갖는 점을[4] 감안하면, KALIMER 노심은 5w/o 이하의 농축도 차이를 갖게 되어 최대 핵연료 연소도는 내부노심에서 항상 나타나며, 결과적으로 균일하지 않은 출력분포는 집합체 유량 배분에서 보다 복잡한 orifice 설계를 수반하게 된다. 그림 2 에서 볼 수 있는 또 하나의 문제점은 핵연료 농축도에 따른 주기길이의 변화이다. 1년 주기를 달성하기 위해 내부 노심은 16.3 w/o 까지의 핵연료 농축이 필요하게 된다. 그러나, 이 범위에서 주기길이 가 농축도 변화에 매우 민감하게 변하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 점에서 굳이 주기를 1년으로 고정할 이유가 없으며, 다시 말하면 현 KALIMER 노심에서 설정한 1년 주기운전은 정당성 확보 차원에서라도 문제가 있음을 보여준다고 하겠다.

3.2 유효노심높이

일반적으로 주기길이는 농축도 증가에 따른 주기길이의 증가가 거의 없는 양상을 보여주기 시작하는 지점의 값을 그 설계값으로 설정하는 것이 핵연료 이용 관점에서 유리하다. 이와 같은 주기길이의 경향을 보여주는 곡선을 찾고자 유효노심높이를 현재 설계값에서 10cm 증감하여 보았다. 유효노심 높이가 감소하면 주기길이가 핵연료 농축도 변화에 덜 민감해짐을 알 수 있으며, 따라서 KALIMER 노심설계는 이러한 방향으로 추구하여야 할 것이다. 한편, 유효노심 높이가 증가하는 경우에는 내부 노심 장전핵연료 농축도는 15 w/o 이하로 감소하여 출력 평탄화의 효과는 기대할 수 있으나 선출력 밀도가 10% 감소하여, 노심체적 10% 증가에 따른 이 정도의 농축도 감소효과는 다른 방안을 추구함으로써도 얻을 수 있다고 본다.

노심전체 증식비는 노심 높이가 증가함에 따라 체적 당 표면적이 감소하여 상대적으로 중성자 누출이 감소하며, 이에 따라 U-238의 Pu-239으로의 변환이 증가하므로 증식비도 증가한다. 중성자 생성면에서 보면, 우라늄 노심에서의 주 핵분열성 물질인 U-235의 $\eta(=2.4)$ 값이 Pu-239($\eta=2.9$)의 경우에 비하여 0.5 정도 작은 점을 감안하면 증식비를 0.7 이상으로 달성가능하다면 우라늄고속핵연료사용 고속로심으로서 훌륭한 설계가 될 수 있을 것이다.

3.3 반경방향 블랑켓 Batch 수

현재의 KALIMER 노심은 반경방향 블랑켓 영역에 대하여 3 batch 장전을 가정하고 있다. 재순환을 고려하는 일반적인 경우에는 블랑켓 내 생성된 고품질의 Pu를 활용하기 위하여 통상 3 batch 운전을 하지만, once through cycle에서는 굳이 반경방향 블랑켓을 빈번히 교체하여야 할 이유가 없고 고속중성자 fluence 제한치 내에서 노심내 최대로 머무르게 하는 것이 주기길이 측면에서 유리하다. 그림 3은 이러한 경향을 보여 주고 있으며, 6 batch 장전을 하게 되면 참고문헌 1의 KALIMER 우라늄노심과 비교하여 내부 노심 장전핵연료 농축도에서 약 0.5w/o의 이득을 가지게 된다. 반면에 노심 전체의 증식 특성면에서 보면, batch 수가 증가함에 따라 U-238의 절대량이 감소하므로 증식비는 약간 감소함을 알 수가 있다.

3.4 개스팽창모듈(GEM)의 적용

KALIMER 노심은 유량상실사고(LOF)시 중성자 누출 증가에 의한 부반응도 삽입을 도모하기 위하여 개스팽창모듈(GEM; Gas Expansion Module)을 노심 외곽에 설치하고 있다. 한 가지 특정사고만을 염두에 두고서 새로운 장치들을 노심 내 6 개의 핵연료 집합체 위치에 과연 두어야 하는가는 안전성 분석을 포함하여 종합적으로 규명될 필요가 있다

노심 구성상 GEM은 외부 노심 핵연료[20w/o] 또는 반경방향 블랑켓으로 대체가능하다. 두 경우에 대한 계산 결과를 그림 4에서 KALIMER 노심의 경우와 비교하고 있다. 반경방향 블랑켓으로 대체하는 경우, 약간의 증식비 증가가 있으나 주기길이에 미치는 영향은 매우 작다. 반면에, 외부 노심 핵연료로 대체되면 해당영역의 체적비 6.3%의 증가로 그림 2에서 노심 높이를 10cm 증가시키는 경우에 버금가는 효과를 가져오므로 노심의 소형화 및 선출력 밀도 증가에 크게 기여할 수 있음을 보여 준다. 따라서, KALIMER 우라늄노심은 16.3w/o에 이르는 내부노심 장전핵연료 농축도를 요구하고 있는데, 기존의 GEM을 적용하지않고 농축도를 15w/o 이하로 낮출 수 있다면, 당연히 이에 대한 종합적인 trade-off 연구가 수행되어야 할 것이다.

3.5 노용기내 핵연료저장(IVS)

3.5 노용기내 핵연료저장(IVS)

그림들 2 - 4 에서 보여준 경향들은 노용기내 핵연료저장(IVS; In-Vessel Storage) 영역에 사용후핵연료집합체가 장전되지 않은 상태에 대한 계산 결과들이다. 실제 평형노심 운전에서는 사용후핵연료집합체의 붕괴잔열냉각을 위하여 1 주기 동안 IVS 에 장전하며, 이 경우에 대한 해석을 수행하였다.

그림 5 에서 보는 바와 같이 추출된 내,외부 노심 핵연료를 IVS 에 재장전하는 경우, 주기길이나 증식비 측면에서 그 영향은 무시할 만하다. 전 노심에서의 중성자속 및 부수중성자속(adjoint flux)에 대한 분포를 살펴보면, IVS 영역에서의 중성자속 분포는 외부노심영역과 비교하여 수 백배 이상 작은 크기를 보이며, 부수중성자속 분포는 노심중앙으로부터 B₄C 차폐체에 이르게 되면 중성자속은 급격히 감소하여 IVS 영역에 장전되어지는 외부노심 핵연료는 노심 반응도에 거의 기여하지 않고 있다. 이는 실제 유효노심영역이 B₄C 차폐체 영역 내부로 제한되어 있음을 보여주며, 반면에 IVS 영역이 추출된 사용후핵연료집합체를 노용기 외부로의 이동을 위하여 사전 붕괴잔열냉각 만의 기능 만을 보유하여야 한다는 점에 부합함을 보여준다. 현재 주어진 60 여개의 IVS 집합체 영역은 평형노심의 batch 운전에 대한 설계 최적화를 통하여 적정 IVS 용량을 설정하여 노심 크기의 감소를 기할 필요가 있다.

3.6 핵연료핀 직경 증가

주기초의 잉여 반응도를 효과적으로 조절하면서 타 설계 분야로의 영향이 크지 않은 방법 중의 하나는 핵연료설계를 변경하는 것이다. 내부노심 장전핵연료 농축도를 감소시키기 위해 핵연료핀(fuel slug) 직경을 기존값인 5.63 mm 로 부터 5.8 mm 로 증가시켜 보았다. 이는 핵연료 체적비로는 집합체 구성상 30.05 %에 달하며, KALIMER 우라늄 노심에 비해 6.1% 증가에 해당한다. 그 결과는 그림 6 에서 보는 바와 같이, 이에 따른 주기길이의 변화는 노심 높이 10 % 증가의 경우 보다도 더욱 효과적임을 알 수 있다. 이는 핵연료의 절대적인 총량 증가 외에 스펙트럼 경화로 η 값이 증가하여 반응도의 복합적 상승효과를 유발하는 것에 기인하며, 핵연료 내 반응가능 중성자속 비율 증가로 인하여 증식비도 증가하였다. 우라늄노심은 일반적인 Pu 노심에 비하여 중성자속 준위가 낮으므로, 같은 맥락에서 반경방향 불랑켓의 핵연료핀 직경을 증가시키는 fat pellet 설계방안도 증식비 향상을 위한 하나의 방안으로 판단된다.

4. 결론

이상에서 기술한 몇 가지 설계방안에 대한 결과를 그림 7 에서 요약적으로 보여주고 있다. 이 그림에서는 KALIMER 노심에서 Pu 재순환을 고려한 경우의 결과도 함께 보이고 있다. 최초로 KALIMER 우라늄고속핵연료노심을 구성시, 해외 액체고속로 Pu 노심에 대한 다양한 노심설계 데이터베이스와 분석 자료 및 그 장점들을 취하였으므로[3], 우라늄을 사용하는 노심에 대하여 Pu 재순환노심의 주기길이 특성을 보여준다면 우라늄노심에 대한 최적화는 이루어졌다고 볼 수 있을 것이다.

본 연구결과를 기초로 하여, 현재 KALIMER 노심개념설계작업에서는 본 연구에서 제시한 핵연료핀(fuel slug) 직경이 증가된 fat fuel pellet 제원을 갖도록 핵연료설계를 변경하기로 하고, 타 설계 분야와의 설계 제원 변경 협의 를 통하여 98.03 노심으로 명명하였다. 새로운 98.03 노심에 대하여는 현재 반경방향 불랑켓 영역의 6 batch 운전 등을 반영한 평형노심모델에 대한 핵.열수력 특성 분석 뿐만 아니라 집합체설계, 열유체계통설계 등에 필요한 설계 자료를 생산 중에 있다.

5. 참고문헌

1. C. K. Park, et al., "KALIMER Design Concept Report," KAERI/TR-888/97, KAERI, 1997.
2. "Fast Reactor Database," IAEA-TECDOC-866, IAEA, 1996.
3. 김영철, 김영인 외, "액체금속로 요소기술 개발," KAERI/RR-17173/96, KAERI, 1997.
4. J. Bouchard, P. Hammer and M. Salvatores, "The Burn-Up and Fuel Cycle Aspects of LMFBR Physics Assesment," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 16, No. 3, pp. 251-295, 1986.

표 1. KALIMER 우라늄금속핵연료노심의 주요설계인자

노심설계인자	크기
열/전기출력 (MWt / MWe)	392 / 150
재장전주기 (개월)	12
노심영역별 batch 수	
내부/외부 노심	3
반경방향 블랑킷	3
유효노심높이 (cm)	100.0
전노심직경 (cm)	344.3
평균중식비	0.676
공급핵연료농축도(내부/외부) (%)	15.0/20.0
구동핵연료 평균선출력밀도 (W/cm)	152.2

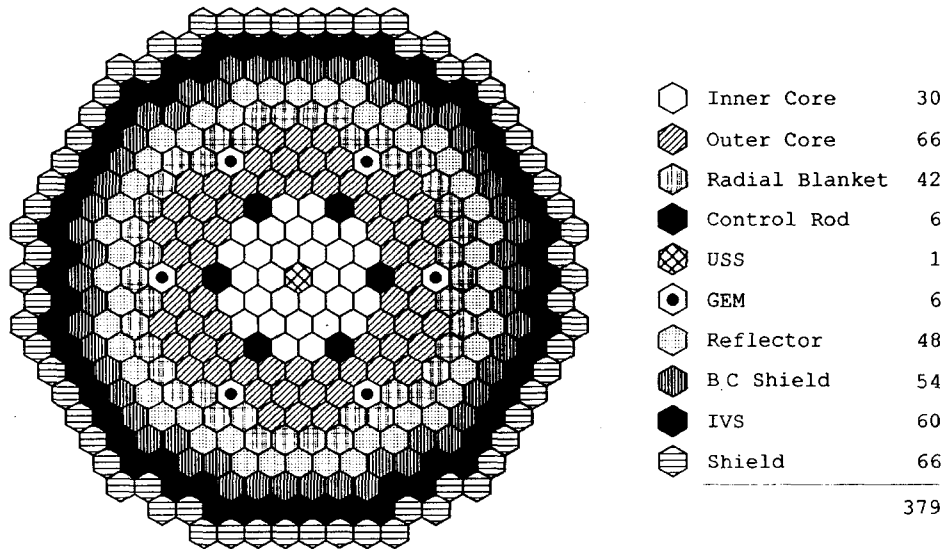


그림 1. KALIMER 우라늄금속핵연료노심(97.07 노심) (150 MWe) 배치단면도

그림2. 유효노심높이 변화

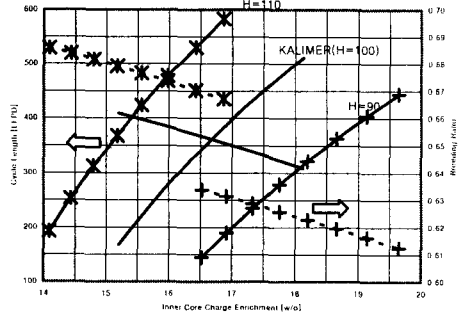


그림3. 반경방향 블랑켓 Batch수 변화

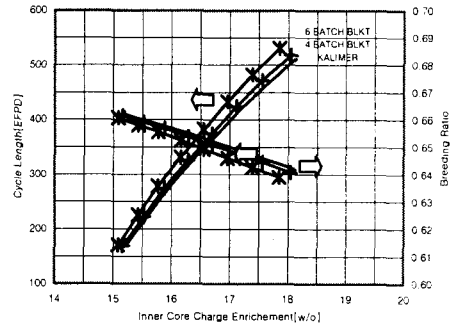


그림4. 가스형창모듈(GEM) 대체효과

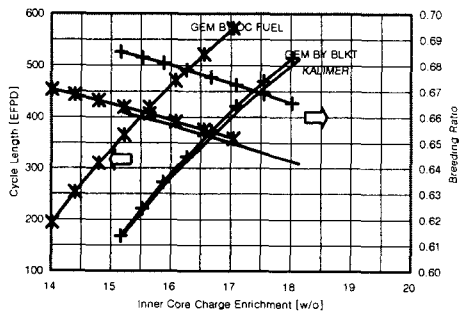


그림5. 노용기내 핵연료저장(VS)내 외부노심핵연료 장전효과

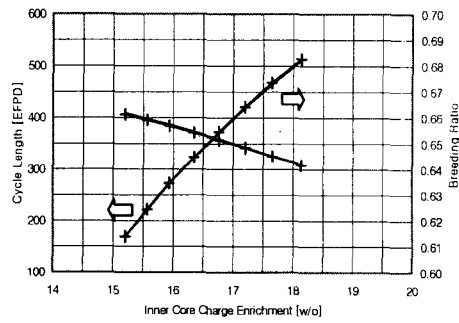


그림6. 핵연료핀 직경변화

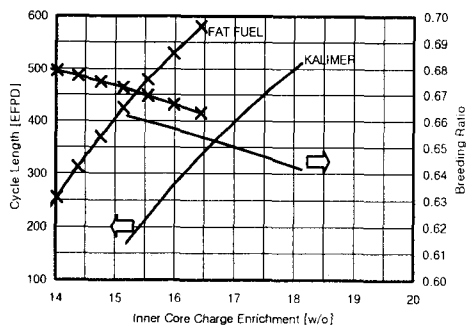


그림7. Pu재순환노심 대비 주요설계인자 변경 효과

