

VSOP94를 이용한 600MWth급 Prism형 고온 가스로 예비 개념 설계

A Preliminary Conceptual Design for a 600 MWth Prismatic HTGR Core using the VSOP94 Code Package

노재만, 주형국, 이현철, 장종화
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

현재까지 한국 원자력연구소에는 Prism형 고온 가스로 노심을 해석할 수 있는 전용 설계 코드가 없었다. 본 연구에서는 Pebble형 고온 가스로 전용 노심 설계 체계인 VSOP94를 Prism형 노심 설계에 적용할 수 있는지를 검증하기 위하여 VSOP94를 이용하여 Prism형 고온 가스로 노심의 예비 개념 설계를 시도하였다. 미국 INEEL에서 개발한 600MWth급 Prism형 NGNP의 노심과 같은 사양을 가진 노심에 대하여 초기 노심부터 평형 노심까지의 예비 개념 설계를 하고 설계 결과를 INEEL 결과와 비교함으로써 VSOP94를 Prism형 노심 설계에 적용할 수 있음을 입증하였다.

Abstract

There have not been the reactor core analysis systems in the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) which are available for the design of the prismatic High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) cores. In this study, the pebble bed HTGR core analysis system VSOP94 was tested its availability to the design of the prismatic HTGR cores via the preliminary conceptual design for a 600MWth prismatic reactor core which have the same specifications to those of the Next Generation Nuclear Plant (NGNP) of the Idaho National Engineering and Environment Laboratory (INEEL) in America. Comparing the design results with those of INEEL showed the applicability of VSOP94 to the design of the prismatic HTGR cores.

1. 서론

최근에 고온 가스로를 이용한 수소 생산에 대한 관심이 높아지고 있다. 고온 가스로는 크게 Pebble형과 Prism형의 두 가지로 나누어지는데 이 두 가지 형태는 노심이나 핵연료의 형태와 핵연료 장전 전략이 완전히 다르다.

한국원자력연구소는 독일 FZJ(Forschungszentrum Jülich)가 개발하고 중국과 남아공 등에서 지금도 설계에 사용하고 있는 Pebble형 고온 가스로용 노심 해석 체계인 VSOP94[1] 를 도입하여 Pebble형 노심 연구에 활용하고 있다[2]. 하지만, 지금 당장 국내에는 Prism형 노심 연구에 활용할 전용 전산 코드가 없다. 향후 경수로용 노심 해석 체계를 수정하여 Prism형 노심 해석에 적용할 계획이다. 본 연구에서 전용 해석 코드가 완성될 때까지 Pebble형 전용 노심 해석 코드인 VSOP94를 Prism형 노심 연구에 활용할 수 있는지를 시험하였다. 지금까지 VSOP94를 Prism형 원자로에 검증한 결과가 거의 없어서 설계 결과의 신뢰성을 확보할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 미국 아이다호 국립공학 및 환경 연구소 (INEEL)에서 개발한 Prism형 차세대원전 (NGNP)의 노심 사양[3]을 그대로 채택하여 초기 노심에서부터 평형 노심까지의 예비 설계를 수행하였다. 이 예비 설계 결과를 INEEL의 결과와 비교함으로써 전용 해석 코드가 완성될 때까지 Prism형 연구에 VSOP94를 사용할 수 있을지를 판단하고자 하였다.

2. 대상 노심 구조

출력이 600MWth인 이 노심에는 그림 1에서 보는 것처럼 중심의 피치가 36cm이고 높이가 79.3cm인 육각형 핵연료 및 반사체 블록으로 구성된 11개의 환(Ring)이 있다. 1번에서 5번까지 환은 내부 반사체 영역이고 6번부터 8번까지는 핵연료 영역, 9번 이후는 외부 반사체 영역이다. 단지 8번 환 모두가 핵연료 영역은 아니며 그 중 6개 핵연료 기둥은 외부 반사체이다. 축 방향으로 10개의 핵연료 블록 층과 그 위 아래로 2 개의 상하부 반사체 블록 층으로 구성된 핵연료 기둥이 있다. 따라서 노심에는 모두 102개의 핵연료 기둥 즉 1,020 개의 핵연료 블록이 있게 되고 활성 노심의 높이는 793cm가 된다. 핵연료 블록은 각각 72개, 18개, 12개인 표준, 예비 정지, 기동 조절 블록의 3가지 종류가 있다.

각 핵연료 블록에는 그림 2와 3에서 보인 바와 같이 직경 1.27cm인 핵연료공, 1.5875 cm의 대 냉각재공, 1.27cm의 소 냉각재공, 10.16cm의 제어봉공, 9.525cm의 예비 정지봉 공, 3.7592cm의 블록 취급공 및 1.27cm의 가연성 흡수공이 뚫려 있다. 양쪽이 막개로 막힌 연료공에는 직경 1.25cm, 높이 5cm인 연료 콤팩트가 15개 들어 있으므로 노심 내에는 이론 적으로 모두 3,105,000 개의 콤팩트가 있어야 하나 실제로는 연료 고정 장치

나 취급 장치와 같은 다른 구조물 때문에 2,919,600 개의 콤팩트가 있다. 연료 콤팩트 내는 표 1에서 보인 사양과 같은 TRISO 입자가 첫 주기 노심에는 0.289, 재장전 주기 노심에는 0.279의 부피 비율로 장전되어 있다. 핵연료 농축도는 첫 주기가 10.36% 이고 재장전 주기가 15.50% 이다. 핵연료 커널 물질로는 앞서 설명한 Pebble형 예비 설계에서는 독일, 중국 및 남아공 설계와 같이 UO_2 를 사용하였으나 Prism형 예비에서는 10.5g/cc 밀도의 UCO를 사용하였다. UCO는 분열에 의한 자유 산소를 만들지 않으므로 조사 중에 일산화탄소를 만들지 않아서 커널의 이동이 거의 없다고 한다.

한 주기에 전체의 반 즉 51개의 핵연료 기둥이 새 연료로 장전되므로 각 핵연료 블록은 2 주기 동안 노심에 체류한다. 매 장전 시마다 7번 환의 모든 핵연료 기둥과 8번 환의 15개의 핵연료 기둥이 새 연료로 교체된다. 이는 내부 반사체와 인접한 6번 환의 침투 출력을 줄이기 위함이다. INEEL 계산 결과[3]에 따르면 이 장전 모형을 바둑판식 장전 모형 보다 더 낮은 침투 출력을 준다고 한다. 침투 출력을 더 줄이기 위한 연료 블록의 축방향 이동은 없다고 가정하였으므로 모든 기둥은 한꺼번에 다른 기둥 위치로 이동한다.

평형 노심의 연료 장전량은 4,536Kg, 주기 길이는 485 전출력일, 방출될 때 평균 연소도는 128,300 MWD/MTU이다. Pebble형과 마찬가지로 냉각재 출구 온도는 1,000℃ 이고 입구 온도는 490℃이다.

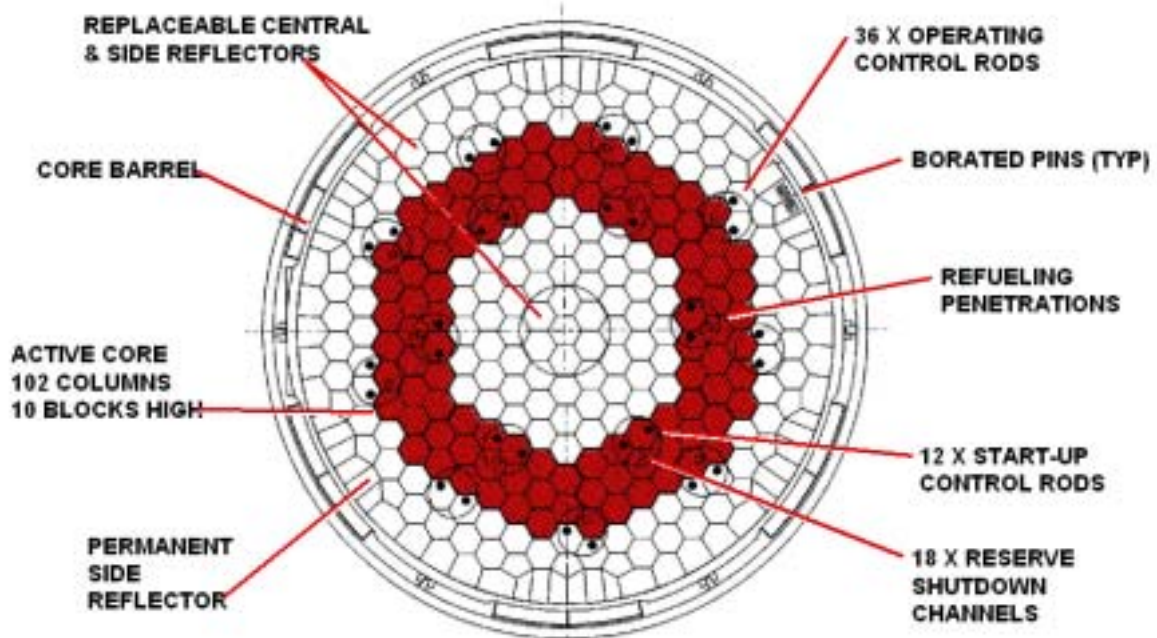


그림 1. 노심 구조

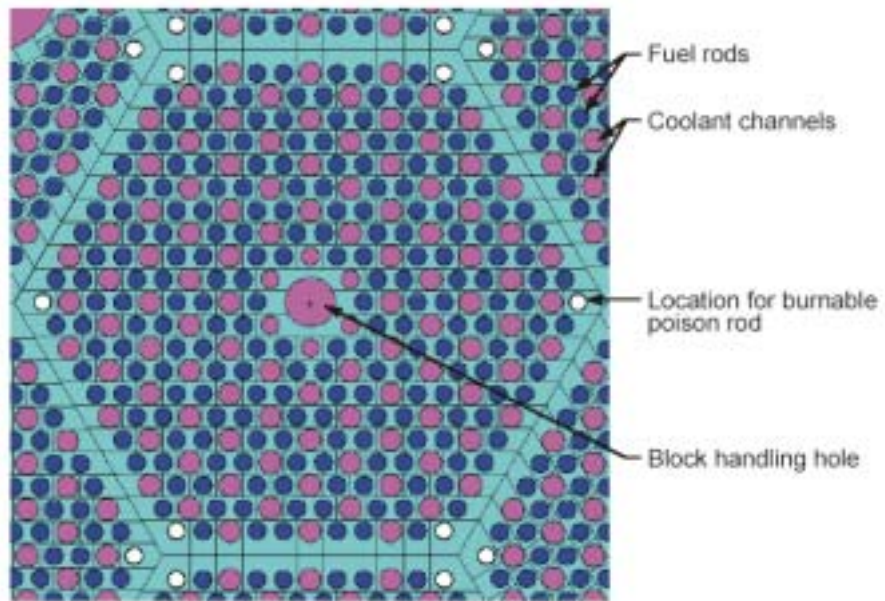


그림 2. 표준 핵연료 블록

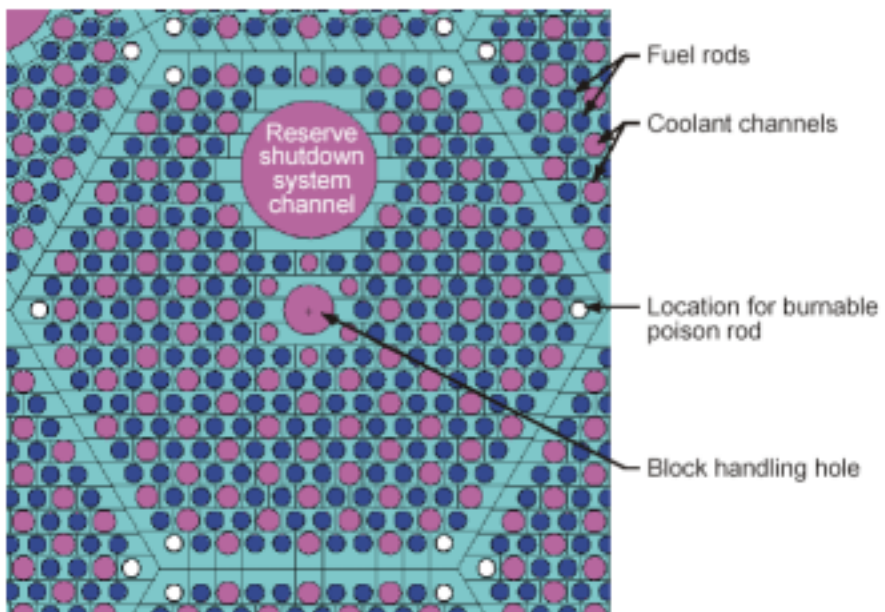


그림 3. 예비 정지 및 기동 조절 핵연료 블록

표 1. TRISO 입자 설계 사양

변수	값
커널 물질	UCO
커널 반경	350 마이크론
커널 밀도	10.5 g/cc
Buffer 두께	100 마이크론
Buffer 밀도	1 g/cc
내부 PyC층 두께	40 마이크론
내부 PyC층 밀도	1.9 g/cc
SiC 두께	35 마이크론
SiC 밀도	3.2 g/cc
내부 PyC층 두께	40 마이크론
내부 PyC층 밀도	1.9 g/cc

3. VSOP94를 이용한 노심 모사

지금까지 우리 연구소에서는 VSOP94를 주로 내부 반사체가 없는 Pebble형인 원자로 설계에만 사용해 왔기 때문에 VSOP94를 이용하여 내부 반사체가 있는 Prism형 원자로를 모사하는 데에는 많은 어려움이 따른다.

VSOP94는 r-z 구조의 2차원 전산 코드로서 육각형 기둥을 취급할 수 없다. 따라서 Prism형 노심의 각 환을 면적이 같은 도넛 기둥으로 가정할 수밖에 없다. 이렇게 계산된 활성 노심은 내부 유효 반경이 148cm, 외부 유효 반경이 241cm, 높이가 793cm이다. 내외부 유효 반경 사이에 반경 180.7 cm와 213.4 cm가 6, 7, 8번 환을 구분하는 경계가 된다. VSOP94 내의 Pebble의 흐름을 취급하는 기능을 이용하여 환별 핵연료 재장전을 모사하기 위하여 각 핵연료 환을 VSOP94의 한 Channel로, 같은 환 내의 각 핵연료 블록층을 한 Layer로 취급하였다. 또 한 Layer 내에는 3 개의 Batch를 두어서 첫 Batch는 신연료, 두 번째 Batch는 전 주기에 7번 환에서 연소하고 다시 장전되는 연료, 세 번째 Batch는 8번 환에서 연소하고 다시 장전되는 연료를 취급할 수 있도록 하였다. 따라서 노심 내에는 모두 3개의 Channel과 30 개의 Layer와 90 개의 Batch가 있게 된다.

다행히 VSOP94 내의 세포 계산 도구인 GAM과 THERMOS는 Pebble 형을 위한 구형 좌표뿐만 아니라 Prism 형을 위한 원주형 좌표도 취급할 수 있다. 이 때 구형 TRISO 입자에 의한 비균질성도 보정할 수 있다[1]. 하지만 GAM, THERMOS와 VSOP94의 기하 구조 자료와 수밀도 자료를 생산하는 DATA-2 코드는 UCO 연료를 취급할 수 없다. 본 연구에서는 UCO를 취급할 수 있도록 코드를 수정하여 사용하였다. 그림 4는 원주형 기본 세포의 모양을 보여 준다. 핵연료공의 크기는 실제 크기이고 흑연 영

역과 He 영역은 노심 전체의 부피비율에 따라 결정되었다. 이 때 가연성 흡수공은 따로 취급하지 않고 He으로 차 있는 것으로 모사하였다. 따라서 가연성 흡수공의 주기말 잔여 반응도 정도만큼 주기 길이가 길어질 소지가 있다.

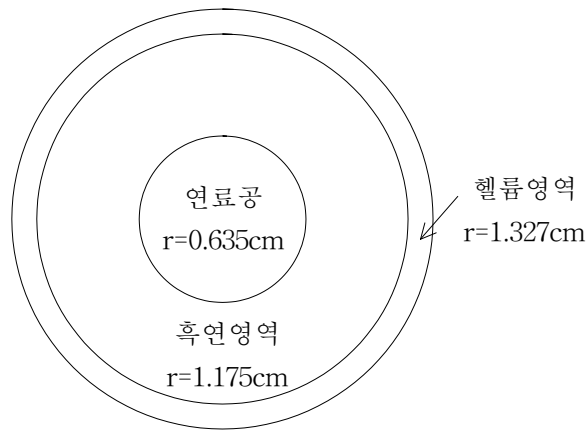


그림 4. 원주형 기본 세포

연료봉 마개 부분의 콤팩트 미장전 영역과 이론과 실제적인 콤팩트 장전 수의 차이는 콤팩트 내의 Triso 입자 장전율에 보정하였다. 흑연 내의 불순물은 일반적으로 Pebble형 원자로에서 고려하는 것과 같이 흑연 수밀도의 0.293배의 가상 불순물 원소인 Poison in C 원소를 추가함으로써 고려하였다. 등은 및 등연소도로 취급되는 구역인 스펙트럼 영역을 잡을 때, Pebble형의 경우 한 스펙트럼 영역 내에 여러 연소도 Batch가 섞여 있도록 정의하나 Prism형의 경우는 특정 공간 영역의 연소도가 고정되는 장전 모형의 특성상 신 연료와 한 번 탄 연료 Batch를 구분하여 다른 스펙트럼 영역되도록 정의하였다.

노심 유체과 온도 분포 계산 코드인 THERMIX는 Prism형을 취급할 수 없다. 따라서 Pebble형처럼 활성 노심에 연료구가 장전되는 형태로 밖에 모사할 수 없다. 이렇게 모사하는 경우 He 유량, 압력 강하 등에 대한 계산 결과의 부정확도는 알려져 있지 않지만 연료 온도 계산 결과는 $1,000^{\circ}\text{C}$ 근처에서 50°C 정도 낮게 계산되는 것으로 나타나 있다. 다행히 유체 계산 결과는 노심 핵계산에 영향을 주지 않으며 또 출구 근처에서 50°C 정도의 낮은 온도는 불과 100pcm 정도의 높은 반응도만 유발한다. 이 정도로는 출력 분포에는 거의 영향을 주지 않으며 단지 주기 길이만 몇 일 길어질 뿐이다. 연소 계산 도중 THERMIX 온도 계산은 주기 초와 중간 및 주기 말에서 수행하였다. 그 사이 시간 간격에서의 연소 계산은 바로 앞 THERMIX 계산 온도를 그대로 사용하였다. THERMIX 계산의 빈도가 연소 계산에 미치는 민감도 계산 결과, 이 정도의 THERMIX 계산으로도 충분히 연소 계산의 정확도를 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 노심 예비 개념 설계의 결과와 논의

대상 노심에 대하여 초기 노심에서부터 거의 평형에 도달하는 제 7주기까지 노심 예비 설계 계산을 수행하였다. 그림 5는 초기 주기와 평형 주기의 연소도의 따른 노심의 유효 증배 계수 변화이다. 유효 증배계수가 거의 1.0이 되는 지점으로 정의한 주기 길이는 대략 초기 주기가 460, 평형 주기가 485 유효 전출력일(EFPD)이다. 이 결과는 같은 노심 사양에 대해 흑연의 불순물에 따라 최고 540일, 최저 420 유효 전출력일인 INEEL의 계산 결과와 잘 일치한다. 연소도에 따른 유효 증배 계수의 감소 형태도 INEEL의 계산 결과의 최고 값 곡선과 최저 값 곡선의 거의 중간에 위치한다.

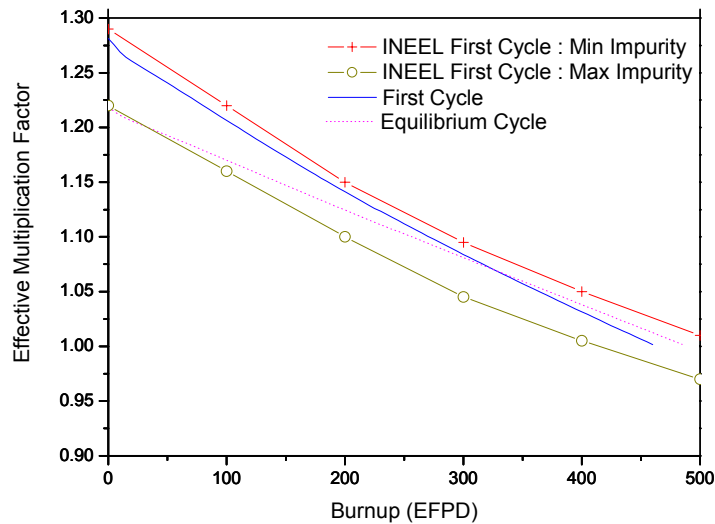


그림 5. 연소도에 대한 유효 증배계수 변화

표 2는 초기 주기와 평형 주기의 주기 초, 주기 중간 주기 말에서의 각 환(Ring)별 상대 출력을 보여 준다. 평형 주기의 제 7번 환의 출력이 높으므로 장전 모형을 더 개량할 필요가 있을 것이다. 하지만 6번 환과 8번 환의 출력이 상대적으로 낮아서 내외부 반사체의 중성자 조사량을 줄여서 반사체 수명을 연장할 수 있다는 장점은 있다.

표 2. 각 환별 상대 출력 분포

	초기 주기			평형 주기		
	주기초	주기중간	주기말	주기초	주기중간	주기말
제 6 환	1.126	1.084	1.036	0.938	0.910	0.865
제 7 환	0.951	0.981	1.022	1.084	1.130	1.184
제 8 환	0.944	0.950	0.947	0.968	0.946	0.929

그림 6은 평형 주기의 주기 중간에서의 출력과 핵연료 온도 분포를 나타내었다. THERMIX의 열전달 계산에서 Pebble형 노심으로 가정된 것이 핵연료 온도를 대략 50°C 정도 낮게 계산하는 것을 감안하면 노심의 최대 핵연료 온도는 정상 운전 제한치인 1,250°C를 초과한다. Pebble형과는 달리 Prism형은 가연성 흡수봉이나 블록별 재장전 설계와 같은 출력 분포 조절 수단과 핵연료 기동별로 오르피스를 설치하는 등의 He 유량 분포 조절 수단을 가지고 있기 때문에 향후 노심의 최대 핵연료 온도는 상당히 낮출 수 있을 것으로 보인다. 하지만 최대 핵연료 온도를 낮춘다고 하여도 출구 온도를 1,000°C로 유지하는 한 국부적으로 제한치를 넘는 경우는 발생할 것으로 보인다. 따라서 정상 운전 핵연료 온도 제한치를 높이는 노력이 필요할 것으로 보인다.

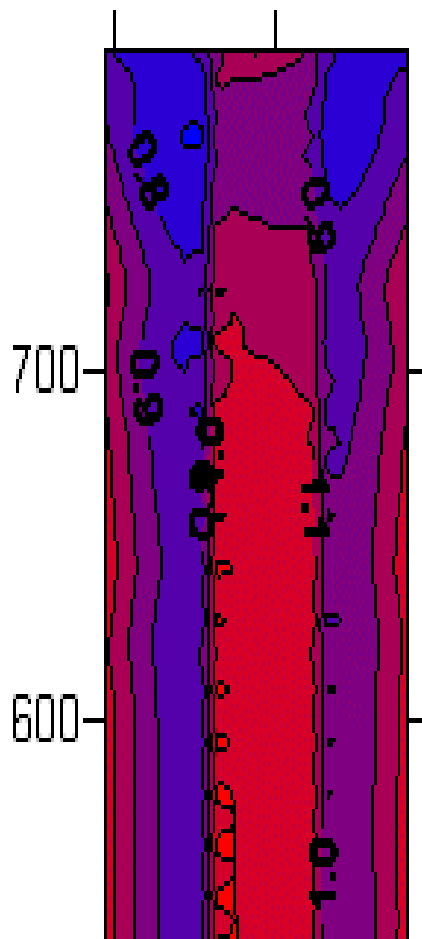


그림 6. 평형 주기의 주기 중간에서 출력 및 핵연료 온도 분포

그림 7에는 평형 주기의 주기 중간에서 핵연료 온도가 가장 높은 내부 반사체와 인접한 곳의 축방향 온도와 출력 분포를 보여 준다. 일반적으로 축방향 출력 분포는 축 방향 Xe 진동과 상당한 연관이 있다. 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

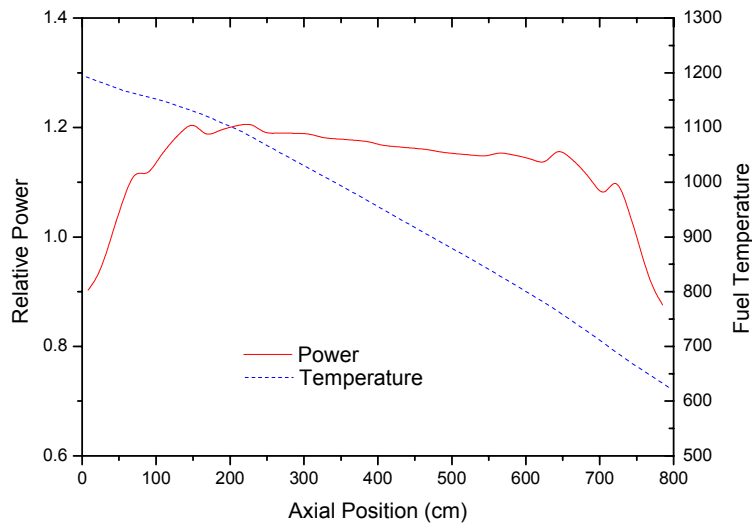


그림 7. 평형 주기 중간의 중심부 축방향 상대 출력 및 핵연료 온도 분포

표 3에는 초기 주기와 평형 주기의 연소도에 따른 등온 및 핵연료 온도 계수의 변화이다. Pebble형과 마찬가지로 이 계산에서도 평균 온도 변화에 따른 온도 재분포를 고려하지 않았다. 계산 결과는 전 출력에서 INEEL에서 계산한 등온 온도 계수인 대략 $-5\text{pcm}/^\circ\text{C}$ 과 잘 일치한다. 연소도에 따른 등온 온도 계수의 차이는 주로 중핵종 구성비의 차이에 의한 핵연료 온도 계수 변화 때문일 것으로 판단된다.

표 3. 등온 및 핵연료 온도 계수

		온도계수 ($\text{pcm}/^\circ\text{C}$)	
		등온	핵연료
초기 주기	주기초	-4.98	-4.64
	주기중간	-5.44	-4.00
	주기말	-5.22	-3.54
평형 주기	주기초	-5.30	-3.96
	주기중간	-5.18	-3.56
	주기말	-4.92	-3.16

표 4에는 평형 주기에 대해 상·하부 및 외부 반사체에 대하여 0.1MeV 이상의 속 중성자와 1.86eV 이하(INEEL은 1.4eV이하)의 열중성자의 주기 평균 최대 중성자속과 연간 조사량을 보였다. 서로 계산한 위치가 정확히 일치하지 않아서 직접적인 비교가 어렵지만 INEEL 계산 결과와 같은 차원 정도의 크기를 보였다. Pebble형과는 달리 Prism형은 수명 도중에 반사체 교체가 비교적 용이하다.

표 4. 반사체의 연간 중성자 조사량

반사체	에너지	중성자속 (n/cm ² /sec)		연간 조사량 (n/cm ² /yr)
		KAERI	INEEL	
상부	0.1MeV 이상	1.856E+13		5.271E+20
	1.86eV 이하	8.727E+13		2.479E+21
하부	0.1MeV 이상	1.712E+13		4.863E+20
	1.86eV 이하	8.779E+13		2.493E+21
외부(제 9환)	0.1MeV 이상	1.884E+13	2.399E+13	5.352E+20
	1.86eV 이하	1.113E+14	8.451E+13	3.162E+21
내부(제 5환)	0.1MeV 이상	2.112E+13	3.040E+13	5.999E+20
	1.86eV 이하	1.310E+14	1.298E+14	3.721E+21

Fissile 핵종의 소멸율에 대한 생성율의 비로 정의 되는 평형 주기의 평균 전환비는 0.421로 계산된다.

5. 결론

Pebble형 노심 해석 체계인 VSOP94로도 Prism형 노심을 충분히 모사할 수 있었다. 노심 유효 증배 계수, 출력 분포, 온도 계수 등 일부 계산 결과도 INEEL의 계산 결과와 잘 일치 하였다. 따라서 우리 연구소만의 전용 해석 코드가 완성될 때까지 VSOP94를 Prism형 노심 설계에 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 흑연 반사체의 조사량과 같은 다양한 설계 인자에 대한 검증은 더 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. E. Teuchert et al., "VSOP('94) Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation," FZJ Internal Report, Jül-2897, 1994.
2. 노재만, 유재운, 주형국, 장종화, "VSOP94를 이용한 150MWth급 Pebble형 고온 가스로 예비 개념 설계," 한국원자력학회 2003 춘계학술발표 논문집, 경주, 2003. 5. 30.
3. P. E. MacDonald, "NGNP Point Design - Results of the Initial Neutronics and Thermal-Hydraulic Assessments During FY-03," INEEL Internal Report, INEEL/EXT-03-00870 Rev. 1, 2003.