

## VSOP94를 이용한 150MWth급 Pebble형 고온 가스로 예비 개념 설계

### A Preliminary Conceptual Design for a 150 MWth Pebble Bed Reactor Core using the VSOP94 Code Package

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

#### 요 약

최근에 고온 가스로를 이용한 수소 생산에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 현재 국내에서 보유하고 있는 경수로용 노심 핵설계 코드를 고온 가스로 설계에 사용하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 향후 국내의 고온 가스로 연구에 활용할 수 있는 Pebble형 고온 가스로 전용 노심 설계 코드인 VSOP94를 도입하여 설치하고 이를 검증하기 위하여 PROTEUS 임계 실험에 대한 모사 계산을 수행하였다. 또 고온 가스로 설계 경험을 축적하기 위하여 150MWth급 Pebble형 고온 가스로의 가상 노심을 구성하고 이 가상 노심에 대하여 평형 노심까지의 예비 개념 설계를 수행하였다.

#### Abstract

Recently, the hydrogen production using heat source of the high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) has been attracting worldwide attention. Since the domestic neutronic design codes for the LWR core design were judged not to be applicable to design of the HTGRs, the VSOP94 code system for the core design of pebble bed type HTGRs was installed in order to be used in the HTGR design until the domestic code system would be developed. After the VSOP94 was verified against a benchmark calculation for the PROTEUS experiment, the preliminary conceptual design for a hypothetical pebble bed reactor core with 150 MWth was performed using the VSOP94.

## 1. 서론

수소에너지는 지구환경 오염문제와 화석에너지 자원의 고갈 문제를 동시에 해결할 수 있는 유일한 대안으로 인식되고 있다. 따라서 이산화탄소를 배출을 최소화하면서 타 에너지원에 비하여 경제적으로 경쟁력을 갖춘 고온 가스로를 이용하여 수소를 생산하는 방법에 대한 관심도 점증하고 있다. 하지만 현재까지 국내의 원자로 노심 핵설계 경험은 주로 경수로에 국한된다. 고온 가스로는 크게 Pebble형과 Block형의 두 가지로 나누어지는데 이 두 가지 형태 모두는 연료, 냉각, 및 감속재 등 노심 구성물과 각종 정격 온도와 핵연료 관리 등 운전 전략과 같은 고유 특성 및 설계 선택 사항이 경수로와는 완전히 다르다. 따라서 경수로용 노심 핵설계 도구와 절차를 고온 가스로에 적용하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 당분간 고온 가스 개발에 활용할 수 있도록 독일 FZJ(Forschungszentrum Jülich)가 개발하고 중국과 남아공 등에서 지금도 가온 가스로 설계에 사용하고 있는 Pebble형 고온 가스로용 노심 핵설계 및 열수력 통합 해석 체계인 VSOP (Version 94)를 도입하여 SUN workstation 환경과 PC 환경에 설치하였다. 이 VSOP94의 신뢰성을 검증하고 고온 가스로 노심 설계 경험을 축적하기 위하여 IAEA의 고온 가스로에 대한 실무자 그룹의 권고에 따라 1990년에 중국, 일본과 구미 각국 등 8개국 11개 기관이 참여하여 확립된 저농축 우라늄 고온 가스로의 안전관련 노물리 계산 검증에 대한 CRP 일환으로 스위스의 PSI (Paul Scherrer Institute)에서 수행한 PROTEUS 임계 실험의 모사 계산을 수행하였고 또 150MW급 Pebble형 가상 고온 가스로 노심 사양을 결정하고 이 노심 사양에 대하여 평형 노심까지 예비 개념 설계 계산을 수행하였다.

## 2. Pebble형 전용 노심 해석 체계 VSOP 설치

현재 연구소가 보유하고 있는 경수로용 노심 핵설계 해석 체계를 당장 고온 가스로 연구에 사용하는 것은 불가능하다. 따라서 국내에서 전용 해석 체계가 개발되기 전까지 당분간 고온 가스로 연구에 활용할 수 있도록 OECD/NEA Databank에 공개된 Pebble형 고온 가스로용 노심 핵설계 및 열수력 통합 해석 체계인 VSOP (Version 94)[1]를 입수하여 설치하였다. 이 통합 노심 해석 체계는 Pebble Bed형 고온 가스로를 개발한 독일의 FZJ (Forschungszentrum Jülich)가 만들었고 남아공과 중국 등에서 지금도 가온 가스로 설계에 사용하고 있다. 이 체계는 Pebble형 고온 가스로에 대해 초기 노심에서부터 평형 노심까지의 단면적 처리, 연료구 설계, Spectrum 평가, 2~3차원 노심 확산 계산, 연소, 연료 재장전, 제어, 정상상태 혹은 천이 상태 열수력 계산을 통합적으로 할 수 있다.

VSOP94의 특징을 살펴 보자. VSOP94는 ENDF/B-IV, -V 와 JEF-1로부터 만들어진 68

군 GAM-I epithermal library와 30군 THERMOS thermal library를 이용한다. 분리 및 비분리 공명 흡수 단면적은 J.J. Schmidt와 ENDF/B-IV, -V의 공명 자료에 기초한 ZUT-DGL 코드로 계산한다. 흑연의 산란 행렬은 흑연의 Young phonon spectrum에 기반을 두고 있다.

보조 코드 DATA-2에서 연료구(Pebble)에 대한 기하학적 및 물리적 입력 자료를 만든다. BIRGIT 코드에서는 2차원 원자로 구조 자료를 만든다. 이 코드는 실험을 통하여 알려진 연료구의 노심내 흐름을 모사하여 방출구를 향하여 단계적으로 아래로 움직이는 한 덩어리(Batch)의 연료구들의 흐름을 기술할 수 있다. 노심의 같은 영역에도 다른 횡수만큼 재순환한 연료구들이 올 수 있기 때문에 다른 횡수로 재순환한 연료구들을 각각 다른 Batch로 표현한다. 또 이 코드는 노심 확산 계산 코드인 CITATION에 단면적을 전해주고 중성자속 계산 결과를 전해 받는다. 노심 열수력 계산 코드인 THERMIX에는 출력 분포 자료 전해주고 온도 분포 자료를 받는다. 비슷한 방법으로 TRIGIT는 3 차원 기하 구조를 처리한다.

사용자가 정해진 Spectrum Zone에 대하여 GAM-1과 THERMOS로 스펙트럼 계산을 한다. 또 원통형 구조를 취급할 수 있는 유한 차분 확산 계산 코드 CITATION으로 노심의 중성자속 분포 계산을 한다. 한 영역의 각각 다른 Batch에 대한 연소 및 재장전 계산은 FEVER에서 수행된다. 45개의 핵분열 생성물을 포함하는 표준 연소 사슬과 그 외 좀더 단순한 여러 가지 연소 사슬을 내장하고 있다.

출력 분포로부터 정상상태 및 천이 상태의 열수력 계산을 하는 일은 THERMIX에서 수행한다. 여기서 계산된 Spectrum Zone에 대한 연료 및 감속재 온도는 다음 중성자 확산 계산에 바로 사용된다. 이런 방법으로 중성자 확산 계산과 열수력 계산이 서로 연관되어 수행된다. LIFE코드에서는 방출후 방사선 붕괴 계산을 수행한다.

물론 이 전에 수행한 계산에서 출발하여 다른 노심 상태를 계산하는 재출발 계산도 가능하다.

VSOP94 코드의 가장 두드러진 특징은 다음 두 가지이다. 첫 째는 다른 경수로용 계산 체계와는 달리 격자 스펙트럼 계산, 노심 연소 확산 계산과 열수력 계산이 맞물려서 수행된다는 것이다. 핵연료와 감속재 온도등 상태 변수에 대한 단면적 표를 이용하는 대신 열수력 계산에서 구한 상태 변수에서 직접 격자 스펙트럼 계산을 하여 단면적을 구하고 이 단면적으로 노심 확산 계산을 한다. 또 노심 확산 계산 결과인 노심 출력 분포는 곧바로 열수력 계산의 입력이 된다. 또 다른 특징은 연료구들이 여러 번 투입되고 방출되는 핵연료 관리를 모사한다는 것이다. VSOP94는 다른 횡수로 재순환한 연료구들을 각각 다른 Batch로 표현하고 한 노심 위치에서 동시에 연소한 여러 Batch들을 바로 다음 위치로 전

하다가 노심 하부에서 방출 혹은 재투입한다. 현재 VSOP94는 SUN workstation 환경과 PC에서 이용이 가능하다.

### 3. VSOP94를 이용한 모의 노심 핵설계 계산

지금까지 VSOP94의 신뢰성을 검증하고 설계 경험을 축적하기 위하여 PROTEUS 실험 모사 계산과 150MWth 초고온 가스로 예비 설계 계산을 수행하였다.

#### 가. PROTEUS 실험 모사 계산

##### (1) 개요

PROTEUS 실험[2]은 IAEA의 고온 가스로에 대한 실무자 그룹의 권고에 따라 1990년에 스위스, 중국, 독일, 일본, 네덜란드, 프랑스, 미국, 러시아 등 8개국 11개 기관이 참여하여 확립된 저농축 우라늄 고온 가스로의 안전관련 노물리 계산 검증에 대한 CRP 일환으로 수행되었다. 이 실험은 스위스 Villigen에 있는 PSI의 PROTEUS 임계 실험 시설에서 수행되었다. 초기 임계는 1992년 7월 7일에 도달하였다. 이 실험에서는 흑연 감속 LEU Pebble 장전 장치에 대하여 탄소-우라늄 비율, 노심 높이-반경 비율, 또 모의 수분 함량 등의 실험 인자들을 달리해가며 노심 반응도, 중성자속 및 출력 분포, 핵반응률, 노심 혹은 반사체에 위치한 제어봉의 제어봉가, 가연성 흡수체의 반응도가, 동특성 자료, 그리고 물 유입이 이들 인자에 미치는 효과 등을 측정하였다.

본 연구에서는 VSOP94 사용법을 숙지하기 위하여 향후 전체 실험에 대한 모사 계산을 하기 전 단계로 초기 임계 노심에 대한 검증 계산을 수행하였다.

##### (2) PROTEUS 실험 시설

1968년 이후 PROTEUS 실험 시설에서는 중수 감속로, 고온 가스냉각 증식로, 경수 고 전환로에 대한 임계 실험을 수행하여 오다가 1991년 1월부터 시설을 변경하여 저농축 LEU 장전 고온 가스로에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험을 위한 시스템의 구성은 그림 1에서 볼 수 있다. 전체 시스템은 원통형이고 높이는 330.4cm, 직경은 326.2cm 이다. 가운데 연료구와 흑연구가 들어가는 부분은 단면이 유효 직경이 125cm인 22각형이고 높이가 78cm인 다각 기둥꼴이다. 이 부분은 실제 검증 계산에서 원통형으로 근사된다. 하부 및 외곽 흑연 감속재는 고정되어 있고 78cm 높이의 원통형 알루미늄 통에 들어 있는 상부 흑연 감속재는 제거가 가능하게 되어 있다. 상부 감속재와 연료구 장전 영역 사이에는 공기 틈이 형성된다.

연료구와 흑연구는 독일의 FZJ(Forschungszentrum Jülich)에서 공급하였다. 연료구의 주

요 특성은 표 1과 그림 2에 요약해 놓았다. 규칙적인 배치 배열을 얻기 위하여 연료구와 흑연구의 직경은 거의 같도록 하였다. 흑연구의 주요 특성은 표 2에서 볼 수 있다. 불순물을 포함하면 2,200 m/sec 중성자에 대한 흑연의 유효 흡수 단면적은 4.79 mbarn이다. 초기 임계 노심에는 5,181 개의 연료구와 2,585 흑연구가 장전되었다. 중간에 닳는 것을 감시하기 위하여 연료구의 직경과 질량을 실험 전과 후에 측정하였으나 큰 차이를 발견할 수 없었다. 흑연 감속재는 몇몇 제조 업체에서 만든 다양한 세대의 흑연으로 구성되어 있다. 하지만 구식 흑연이 대부분이어서 밀도 1.763g/cc와 유효 흡수 단면적 4.09 mbarn을 가진 단일 흑연으로 취급할 수 있다.

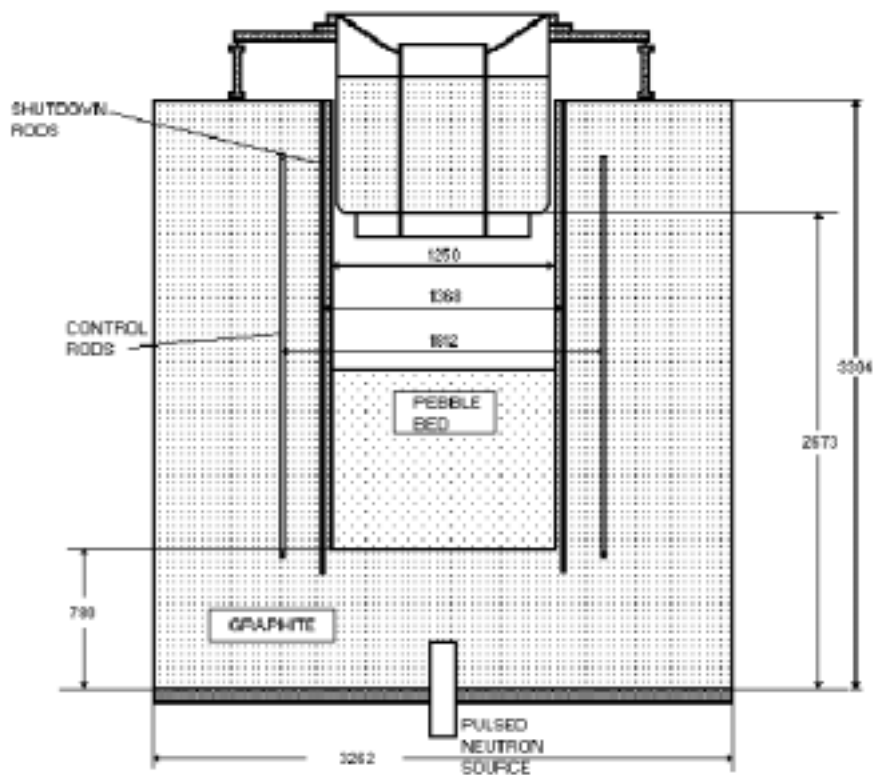


그림 1. PROTEUS 실험 시설의 구조 (단위:mm)

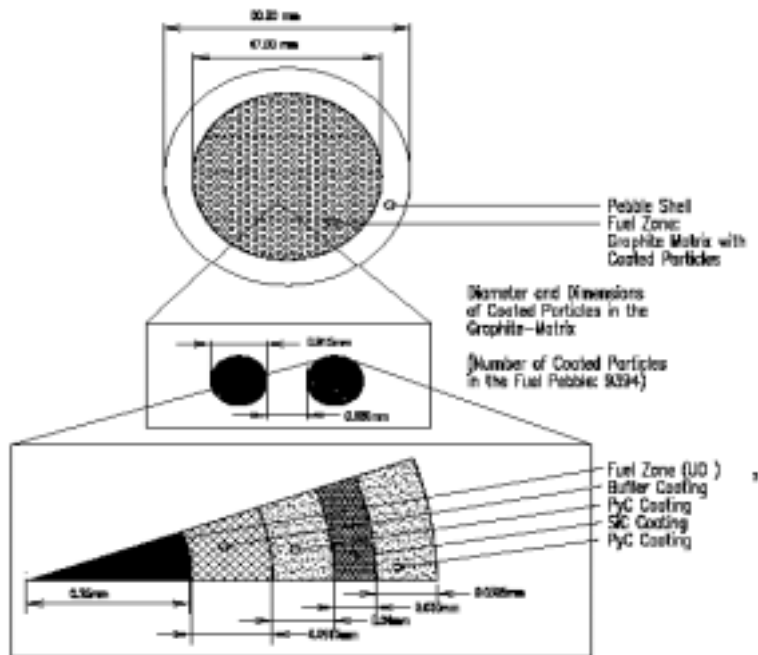


그림 2. 연료구의 구조

$^{235}\text{U}$ mass per fuel pebble (g)	1.000±0.01
$^{238}\text{U}$ mass per fuel pebble (g)	4.953±0.05
Total U mass per fuel pebble (g)	5.966±0.06
Carbon mass per fuel pebble (g)	193.1±0.2
Total mass per fuel pebble (g)	202.22±0.18
Fuel pebble inner (fueled) zone radius (cm)	2.35±0.025
Fuel pebble outer radius (cm)	3.0006±0.002
Radius of fuel particles ( $\text{UO}_2$ ) (cm)	0.0251±0.001
Density of fuel particles ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	247,721

표 1. 연료구 사양

Moderator pebble mass (g)	190.54±1.44
Moderator pebble outer radius (cm)	2.9979±0.0015

표 2. 흑연구 사양

### (3) VSOP 모사

기본 노심에 대하여 VSOP94로 r-z 구조, 4 에너지 그룹, 노심 확산 검증 계산을 하였다. 공명 적분값을 계산하는 ZUT-DGL 입력은 연료구가 독일의 FZJ에서 만든 것임을 감안하여 FZJ의 표준형을 그대로 사용하였다. 또 연료구와 흑연구 설계를 모사하는 DATA-2 입력 자료는 표 1, 2 및 그림 2에서 얻었다. 이 표에 나와 있지 않은 자료는 FZJ의 일반적인 연료구 설계 자료를 사용하였다. 노심 구조를 모사하는 BIRGIT 입력은 그림 1과 Pebble형 고온 가스로에 대한 표준 입력을 바탕으로 만들었다. 먼저 물질이 같은 영역 영역을 의미하는 Layer를 분할할 때 노심을 부피가 같은 50개의 Layer로 나누었으며 반사체는 진공 영역, 제어봉 및 다른 구조물의 물질 조성을 줄 수 있도록 27개의 Layer로 나누었다. 연료구 재순환 횟수에 따라 연소 기본 단위가 되는 Batch 개수는 재순환이 없는 고정식 실험 장치이므로 Layer당 1개 하였다. 또 중성자속 계산의 기본 계산 격자인 CITATION mesh는 축 방향, 반경 방향 모두 대략 7cm 이내가 되도록 하였다. GAM, THERMOS 스펙트럼 계산의 기본 단위인 스펙트럼 존은 노심에서 10개, 반사체에서는 향후 제어봉 삽입을 고려하여 17개로 분할하였다. PROTEUS 실험의 경우에는 노심 출력이 영이어서 스펙트럼 존별 온도 분포가 평탄하므로 THERMIX 계산은 필요하지 않다.

### (4) 계산 결과

PROTEUS의 기본 노심에 대한 VSOP94와 SRAC95코드[3]의  $k_{eff}$  계산 결과를 표 3에 요약하였다. VSOP 계산에서는 빈 공간에 의한 Streaming Effect를 보정하였는데 먼저 Pebble들 사이의 빈 공간에 의한 것은 Lieberoth와 Stojadinovic가 제안한 방법[4]으로 상부 Cavity에 의한 것은 Gerwin-Scherer가 제안한 방법으로 보정을 하였다[5]. SRAC95는 JAERI에서 Block형 고온 가스로 설계에 사용하고 있는 계산 체계이다. SRAC95에서는 2차원 r-z 구조,  $P_0$  Legendre 전개,  $S_6$  Angular Quadrature, 24 에너지 그룹을 이용하였다. 이 계산에서는 아무런 Streaming Effect 보정도 하지 않았다. 이 표를 보면 우리의 계산 결과가 실험치 보다는 3%가량 낮은 것을 알 수 있다. 반면에 똑 같이 VSOP94를 이용하는 중국 INET의 계산 결과는 불과 0.2% 이내로 실험치와 잘 일치한다. VSOP94의 세부적인 모사가 서로 다르다는 것을 감안하더라도 이 차이는 너무 크다. 현재 그 원인을 분석하고 있다. 또 SRAC95를 이용한 JAERI 결과는 실험 결과와 2.5% 정도 높다. 이는 Streaming Effect를 보정하지 않은 것에 기인하는 것으로 알려져 있다.

	코드시스템	$k_{eff}$	계산/실험
Experiment		$1.0147 \pm 0.0006$	
INET	VSOP	1.01299	0.9983
JAERI	SRAC-ENDF/B-IV	1.0384	1.0234
JAERI	SRAC-JENDL-3.2	1.0427	1.0276
KAERI	VSOP	0.9835	0.9692

표 3. PROTEUS 실험 모의 계산 결과

#### 나. 150MWth급 Pebble형 고온 가스로의 모의 설계 계산

PROTEUS 실험은 실제 Pebble형 고온 가스로나는 달리 노심의 출력이 없는 저온 장치이고 연료구의 투입 방출을 반복하는 핵연료 관리가 없는 단순한 문제이다. 여기에서는 실제 Pebble형 고온 가스로나 설계에 VSOP94를 활용하는 방법을 숙지하고 기본적인 핵특성을 이해하기 위하여 150MWth급의 Pebble형의 고온 가스로나 개념을 개발하고 이 노심 개념에 대하여 초기 노심서부터 평형 노심까지의 모의 설계 계산을 수행하였다.

##### (1) 모의 노심 구조

여기에서 개발한 고온 가스로나 구조가 그림 3에 나와 있다. 연료구와 노심의 주요 설계 사양은 표 4, 5, 6에 요약하였다. 노심 열출력 150MWth은 완전히 냉각 기능을 상실했을 때 수동적인 노심의 장기 잔열 제거 한계가 대략 출력 밀도로 3 W/cc임을 고려하여 결정하였다. Triso 입자와 연료구의 설계 사양은 거의 독일 FZJ의 연료구 설계 사양과 같다. 초기 노심에는 농축도가 2.84%와 4.84%인 연료구가 7:3으로 장전된다고 가정하였고 이후 새로 공급되는 연료구의 농축도는 7.17%로 고정하였다. 활성 노심중 연료구가 차지하는 부피비는 61% 이고 활성 노심 전체에 장전되는 연료구의 숫자는 247,721개이다. 이 사양은 초기 및 천이 노심이 아닌 평형 노심의 임계도를 고려하여 결정한 것이다.

Pebble이 장전되는 활성 노심은 높이가 700cm, 직경이 300cm인데 위쪽으로 50cm는 아무 것도 장전되지 않은 빈 공간이라고 가정하였다. 활성 노심은 하단 중앙에 있는 배출구 쪽으로 연료구 흐름을 유도하게끔 하단에서 88cm 떨어진 지점부터 가운데 쪽으로 좁아진다. 또 이 활성 노심은 두께 345cm인 하부 반사체, 두께 195cm인 상부 반사체 그리고 두께 77.5cm의 반경 방향 외각 반사체로 둘러 싸여 있다. 활성 노심 바깥 경계로부터 6cm 떨어져 직경 6cm인 비상 제어봉 8개가 Azimuthal 방향으로 균일하게 포진하고 있다. 활성 노심 내에서의 연료구 하향 속도는 FZJ의 실험치를 바탕으로 대략 반경 방향으로 아래가 잘록한 항아리 형태의 5개의 Channel으로 분할하여 각 Channel 내에서는 상



수로 가정하였다. 노심 전체 평균으로 보면 투입된 연료구는 대략 114일만에 방출되고 전부 7번 투입된다고 가정하였다. 따라서 한 개의 새 연료구는 저장고에 영구 저장될 때까지 모두 797일간 노심에 머문다. 방출될 때 연소도는 68,938MWD/MTU이다. 하루에 311개의 새 연료구와 1,866 개의 재순환 연료구가 투입되고 방출된다. Helium의 입구 온도는 250. C이고 출구 온도는 초고온 가스로 설계를 생각하고 1,000. C로 설정하였다.

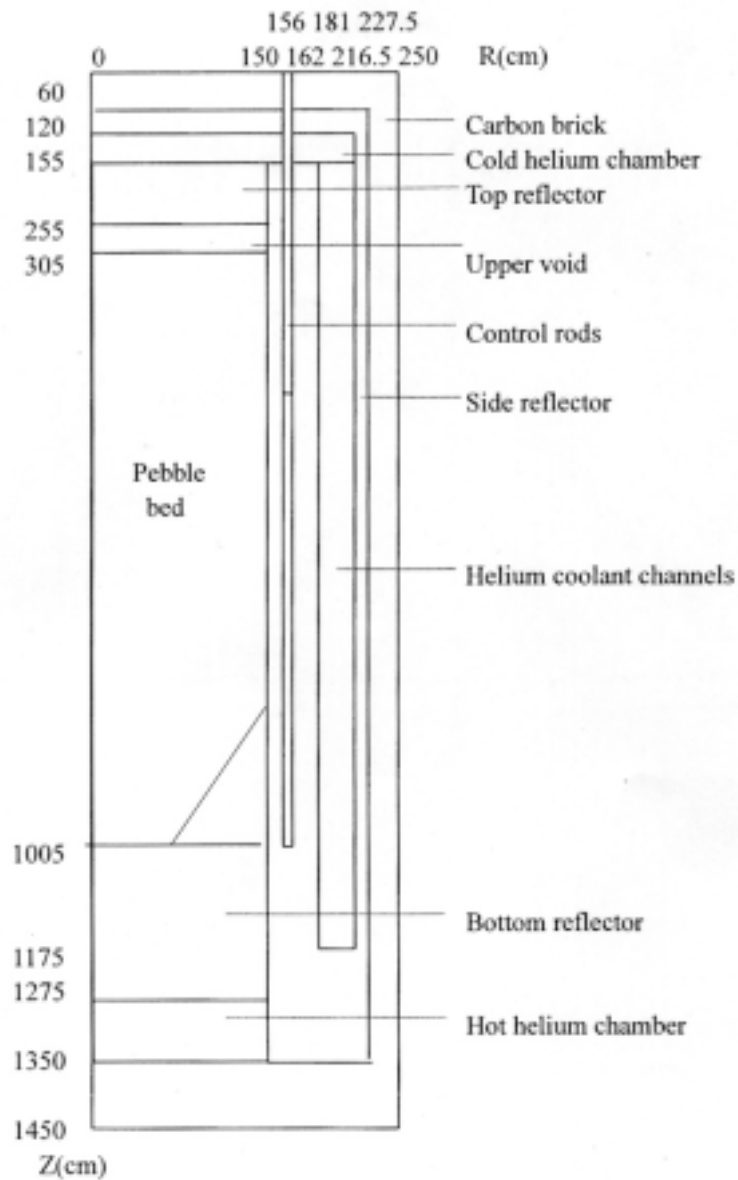


그림 3. 150MWth 급 Pebble형 고온 가스로의 구조

Parameters	Value
Fuel element	
Volumetric filling fraction	0.61
Uranium weight in fuel element (g)	7
Enrichment of U-235 (w/o)	7.8
Diameter of the fuel element (cm)	6
Diameter of fuel zone in the fuel element (cm)	5
Density of graphite matrix and outer shell (g/cm <sup>3</sup> )	1.75
Coated particle	
Radius of the fuel kernel (cm)	0.025
Density of UO <sub>2</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	10.4
Density of low density PyC (g/cm <sup>3</sup> )	1.05
Thickness of low density PyC (cm)	0.00095
Density of inner high density PyC (g/cm <sup>3</sup> )	1.9
Thickness of inner high density PyC (cm)	0.004
Density of SiC (g/cm <sup>3</sup> )	3.18
Thickness of SiC (cm)	0.0035
Density of outer high density PyC (g/cm <sup>3</sup> )	1.9
Thickness of outer high density PyC (cm)	0.004

표 4. 연료구의 사양

Parameters	Value
Reactor thermal power (MWt)	150
Number of pass to the core	7
Core equivalent diameter (cm)	300
Core equivalent height (cm)	700
Height of the top cavity in the core (cm)	50
Thickness of the top reflector (cm)	195
Thickness of the bottom reflector (cm)	345
Equivalent thickness of the side reflector (cm)	77.5
Density of the reflector graphite (g/cm <sup>3</sup> )	1.8
Thickness of the top carbon brick with natural boron (cm)	60
Thickness of the bottom carbon brick with natural boron (cm)	100
Equivalent thickness of the side carbon brick with natural boron (cm)	22.5

표 5. 주요 노심 사양

Parameters	Value
Effective core volume (m <sup>3</sup> )	45,930
Average discharge burnup (MWd/t)	68,938
Average power density (W/cm <sup>3</sup> )	3.27
Inlet temperature of Helium (°C)	250
Outlet temperature of Helium (°C)	1,000
Average residence time of fuel element (day)	797
Number of fuel element in the core	247,721

표 6. 평형 노심 특성 인자

## (2) VSOP 모사

이 노심에 대하여 VSOP94로 초기 노심에서부터 평형 노심까지 연소 계산을 수행하였다. ZUT-DGL 입력과 DATA-2 입력은 각각 독일의 FZJ의 표준형 자료와 표 4에서 얻었다. BIRGIT 입력 중 먼저 연료구의 유속이 같은 영역은 의미하는 Channel은 아래가 잘록한 항아리형이 되도록 5개로 분할하였다. Channel의 부피비는 안쪽 Channel부터 0.138, 0.165, 0.187, 0.231, 0.279이다. 각 Layer의 부피가 같도록 Channel들은 13, 15, 17, 21, 25개의 Layer로 분할하였다. VSOP94에서는 연료구가 한 Layer를 진행하는 시간을 한 Cycle이라 부르고 이 Cycle을 모든 Channel에 동일하게 적용한다. 이 노심의 한 Cycle은 3.128일이다. 여기에다 Channel별 Layer숫자를 곱하면 연료구가 투입구부터 방출구까지 한 Channel을 완전히 통과하는 시간인데 여기서는 각각 40.7, 46.9, 53.2, 65.7, 78.2일이 된다. Channel과 Layer 분할은 실험 값인 노심 내의 연료구의 유속 분포와 일치하도록 잡아 주어야 한다. 물질이 고정된 반사체에서는 제어봉 삽입을 모사할 수 있도록 47개의 Layer로 나누었다. VSOP94에서는 노심 하부의 잘록 들어간 부분을 Cone이라고 부르고 별개의 Layer로 취급한다. 따라서 전체 Layer 개수는 13+15+17+21+25+1+47=139 개다. 연료구 재순환 횟수에 따라 연소 기본 단위가 되는 Batch 개수는 한 연료구가 7번 재순환하므로 Layer당 7개로 하였다. 결국 노심에는 모두 637 개의 Batch가 있고 이 모든 Batch에 대하여 연소 계산을 수행한다. 첫 번째로 노심에서 연소되는 연료구가 첫 번째 Batch가 되고 마지막 7번째로 연소되는 연료구가 마지막 Batch가 된다. 매 Cycle의 종점에서 각 Channel 최하단에 있는 Layer에 있는 7 개의 Batch는 방출되고 방출된 5 Channel의 총 35개 Batch에 대하여 같은 순서에 있는 Batch별로 연소도와 수밀도 등 연소 자료를 평균한다. 이 중 7번째 Batch는 저장고로 보내고 나머지 6개 Batch는 Batch 순서만 하나씩 밀어서 다시 각 Channel 최상단 Layer로 재투입한다. 이 과정을 VSOP94에

서는 Shuffling이라고 하는데 최상단과 최하단의 Batch들의 움직임만 사용자가 입력하면 다른 Batch들은 한 Cycle이 끝나면 코드 내에서 자동적으로 바로 아래 Layer로 진행한다. 중성자속 계산의 격자인 CITATION mesh는 활성 노심 내에서는 축 방향, 반경 방향 모두 대략 10cm 내외, 반사체에서는 20cm 내외가 되도록 하였다. GAM, THERMOS 스펙트럼 계산의 기본 단위인 스펙트럼 존은 노심에서 10개, 반사체에서는 제어봉이 삽입될 때를 고려하여 14개로 분할하였다. THERMIX 계산을 병행하여 스펙트럼 존별 온도 분포를 얻었다. 충분히 평형 노심에 도달하도록 대략 3,000일까지 연소 계산을 하였다.

### (3) 계산 결과

그림 4에 초기 노심에서부터 평형 노심까지의  $k_{eff}$  변화를 보였다. 전 기간 동안 임계 상태( $k_{eff}=1$ )에서 연소 계산을 하여야 하지만 Pebble형의 고온 가스로의 개념 설계 경험을 축적하는 것이 목적인 만큼 대략 평형 노심에서만 임계 상태가 되도록 하였다. 실제 설계에서는 초기 투입 연료구에서 점차적으로 농축도를 높여가거나 초기 노심에 흑연구를 투입하고 이 흑연구 투입량을 줄여가면서 임계도를 맞추어 나가야 할 것이다. 그림 5과 6은 초기 노심 및 평형 노심에서의 CITATION mesh별 노심 출력 분포이다. CITATION에서는 노심을 r-z 좌표에서 직사각형으로 묘사하므로 실제 출력이 나지 않는 노심의 하단 잘록한 부분에도 출력이 나온다. 이 CITATION 출력은 구조 변환 함수를 통하여 실제 노심 출력 분포로 변환된다. 그림 7은 THERMIX로 계산한 평형 노심에서의 헬륨 온도 분포이다. 입구서부터 출구까지 온도 변화를 잘 볼 수 있다. 또 그림 8은 노심 중심선을 따라 축방향 출력과 온도를 보인 것이다. 이 그림을 보면 Pebble형 원자로의 전체적인 출력 및 온도 분포의 대강을 알 수 있다. 즉 상부 보다 하부의 연소도가 높고 노심이 잘록하기 때문에 출력은 상부가 높지만 온도는 반대로 하부가 높다. 반경 및 축방향 반사체 근처에서 출력 분포가 매끄럽지 못한 것은 반사체의 열중성자 되돌림에 기인하는 것으로 보인다.

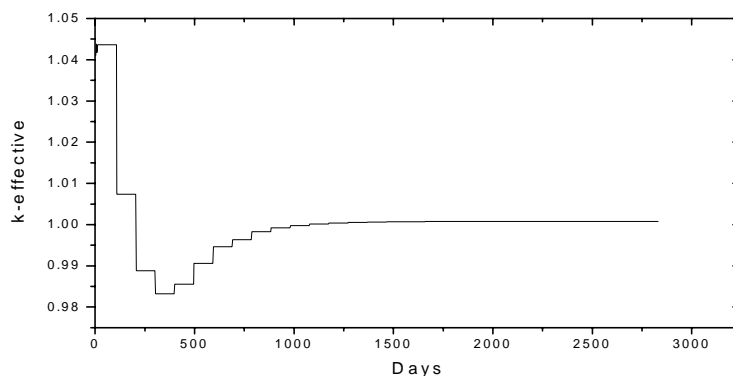


그림 5. 평형 노심까지의 임계도 변화

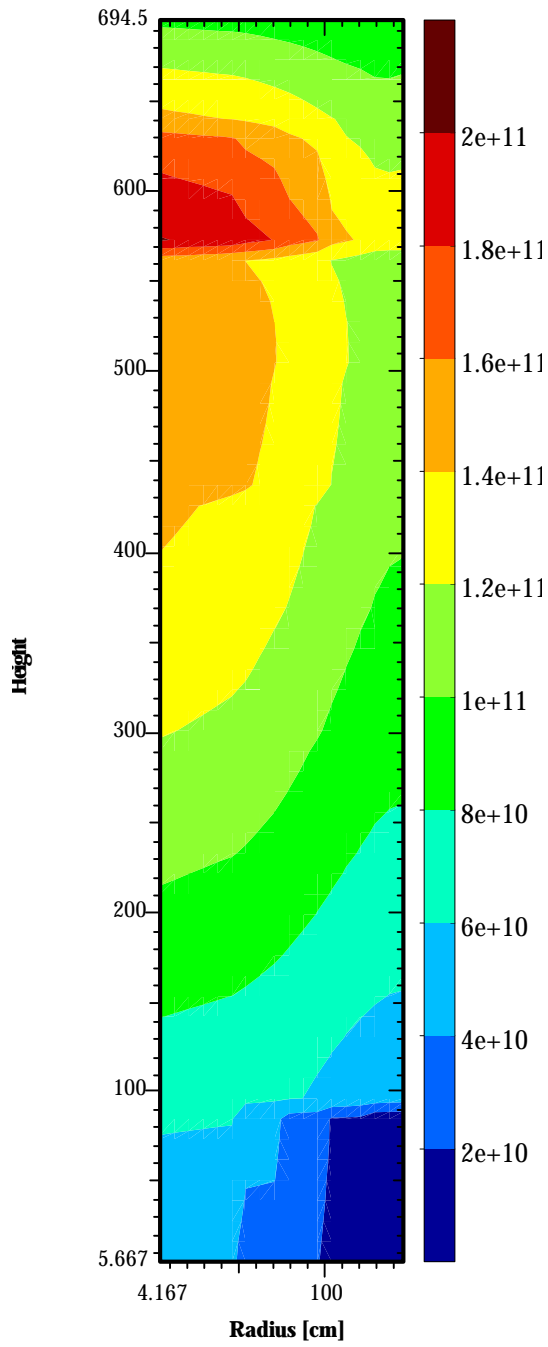


그림 6. 초기 노심의 출력 분포

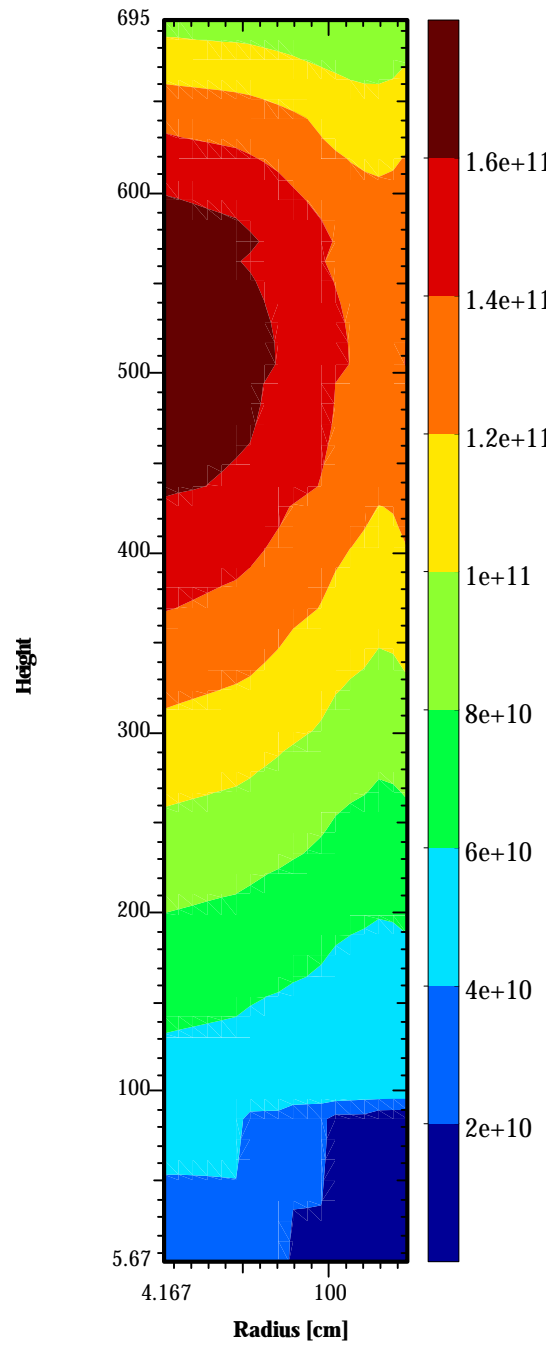


그림 7. 평형 노심의 출력 분포

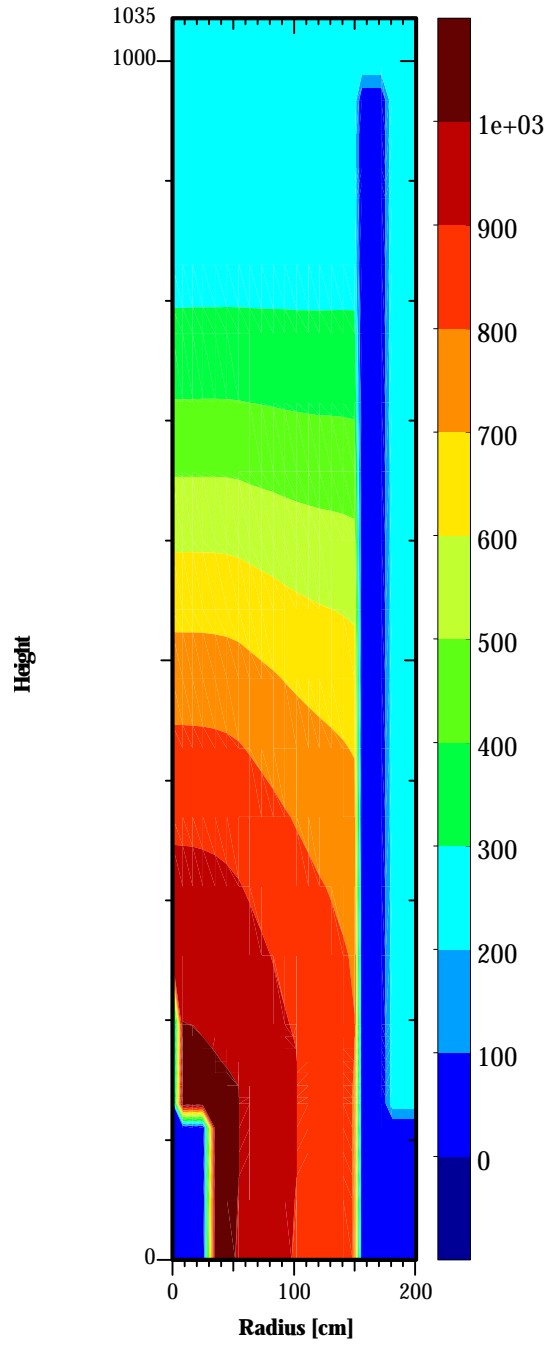


그림 8. 평형 노심의 온도 분포

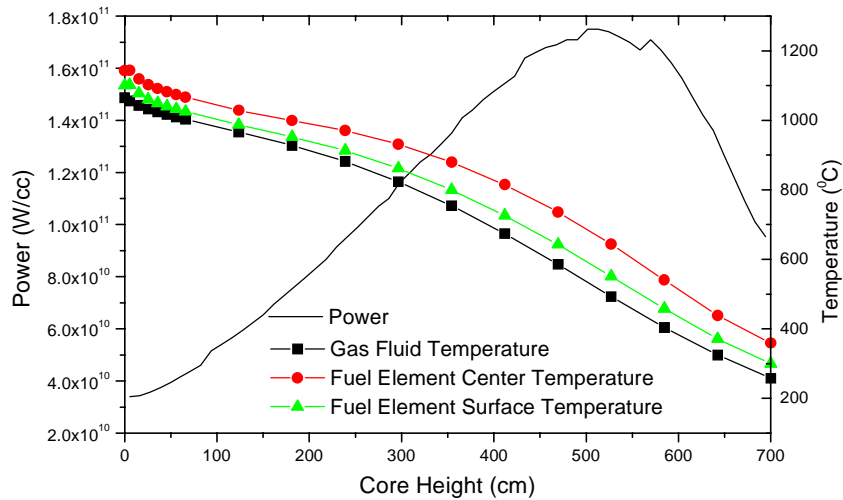


그림 9. 노심 중앙에서 출력 및 온도 분포

#### 4. 결론

본 연구에서는 수소 생산용 고온 가스로 연구에 사용할 수 있도록 독일 FZJ가 개발한 Pebble형 고온 가스로용 노심 핵설계 및 열수력 통합 해석체계인 VSOP94를 설치하였다.

VSOP94의 신뢰성을 검증하기 위하여 PROTEUS 임계 실험의 모사 계산을 수행하였다. 그 결과, 노심 임계도에서 같은 코드 시스템을 사용하는 중국 INET 결과와 3% 정도의 차이를 보였는데 현재 그 원인을 분석하고 있다. 또 설계 경험을 축적하기 위하여 150MWth급 Pebble형 고온 가스로의 노심 사양을 결정하고 이 노심 사양에 대하여 평형 노심까지 예비 개념 설계 계산을 수행하여 노심 출력 분포와 온도 분포 등을 계산하였다.

#### 참고문헌

1. E. Teuchert et al., "VSOP('94) Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation," FZJ Internal Report, *Jil-2897*, 1994.
2. "Critical Experiments and Reactor Physics Calculations for Low-Enriched HTGRs," IAEA TECDOC 1249, 2001.
3. K. Okumura et al., "SRAC95: General Purpose Neutronic Code System," JAERI Internal Report, *JAERI-Data/Code 96-015*, 1996.
4. J. Lieberoth and A. Stojadinovic, "Neutron Streaming in Pebble Beds," *Nucl. Sci. Eng.*, **76**, 1980.
5. H. Gerwin and W. Scherer, "Treatment of the Upper Cavity in a Pebble-Bed High-Temperature Gas-Cooled Reactor by Diffusion Theory," *Nucl. Sci. Eng.*, **97**, 1987.