2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# HYPER 노심 핵특성에 대한 단위격자 구조 영향 평가

# Cell Geometry Effects on Nuclear Characteristics of HYPER Core

김 용 남, 김 종 경
한양대학교
서울 성동구 행당동 17

박 원 석
한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150

## 요 약

가속기 구동 미임계로를 이용하여TRU 핵종 변환을 위한 중성자 스펙트럼은 가속기 빔 이용의 효율성, 핵종 별 연소의 균일성 및 반응도 보상의 용이성 등의 측면에서 고속 스펙트럼이 열중성자 스펙트럼보다 우수하다고 여겨지고 있다. 이러한 고속 중성자의 상대적 우수성은 높은 에너지의 중성자 스펙트럼일수록 그 효과가 증대될 것으로 기대할 수 있다 이와 관련하여, 본 연구에서는 최대한 높은 중성자평균에너지를 구현하고자 하는 목표의 관점에서, 납-비스무트 냉각 방식의 TRU 핵변환 노심의 단위격자 구조가 노심의 핵특성에 미치는 영향을 분석하였다. 아울러 고속 스펙트럼 환경에서 가연성 흡수체인 $B_4C$ 물질이 초기 반응도를 억제하여 반응도 감손을 보상할 수 있는가의 문제를 검토하였다. 연구 결과 다음의 결론을 얻었다. 첫째, TRU+Zr 형태의 이원 합금 연료만으로 핵연료를 구성하여서는 직접적인 핵분열 반응을 통하여 마이너악티나이드 소멸시킬 수 있는 정도로 중성자 에너지 스펙트럼을 경화하기 어려우며, 따라서 Th 등의 핵원료성(fertile) 물질이나 중성자 흡수체 물질을 혼합 장전하여 핵연료 농축도를 높이는 방안을 고려해야 한다. 둘째, 경한 스펙트럼에서는 $B_4C$ 물질을 이용하여 노심의 잉여 반응도를 억제하기 어려우므로, 마이너 악티나이드를 핵분열 반응을 통하여 직접 소멸시키려는 노심에서는 $B_4C$ 물질 주변의 스펙트럼을 국부적으로 연화하여야 한다

## ABSTRACT

As far as a subcritical system for TRU transmutation is concerned, fast neutron spectrum is preferable to thermal neutron spectrum from the viewpoint of as follows: effective utilization of accelerator, uniform destruction of all TRU nuclides, and reactivity compensation. We can expect that the faster spectrum be achieved, the more effective the core performance become. In this study, aiming at achievement of the spectrum as faster as possible, cell geometry effects on core characteristics were analyzed for HYPER (Hybrid Power Extract Reactor) under development at KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). Simultaneously, It were also investigated whether the neuron absorber such as $B_4C$ can suppress the excess reactivity of initial core in order to compensate reactivity drop due to TRU fuel depletion.

## 1. 연구목적 및 배경

HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) 시스템은 한국원자력연구소에서 연구/개발 하고 있는 초우란 핵종(TRU) 소멸 목적의 미임계 핵변환로이다. HYPER 설계 팀은 국내 실정에 부합하는 최적 핵변환 개념으로 선정을 목표로 핵변환로 성능 및 효율성 등에 대한 중성자 스펙트럼 영향 평가의 사전 연구를 수행한 바 있다[1]. 연구 결과, 고속중성자 스펙트럼이 열 중성자 시스템에 비해 가속기 빔 이용의 효율성, 핵종 별 연소의 균일성 및 반응도 보상의 용이성 등의 측면에서 상대적으로 우수함을 확인하였다. 관련하여, 냉각재를 액체 납-비스무트 합금으로, 연료의 화학적 형태를 TRU+Zr 로 하는 금속연료로 선정하였다. 이러한 고속 중성자의 상대적 우수성은 높은 에너지의 중성자 스펙트럼일수록 그 효과가 증대될 것으로 여겨진다. 즉, 동일한 액체 금속 냉각 방식의 고속로라 할지라도 스펙트럼이 경할수록 상기 우수성 측면에서 더욱 유리할 것이다. 한 예로, 연소의 균일성 관점에서, 마이너악티나이드를 핵분열 반응을 통하여 직접 소멸 시키고자 한다면 마이너악티나이드 핵종들의 α(capture-to-fission ratio) 값이 1보다 작은 값을 가지도록 하는 것이 바람직하다. TRU 핵연료를 구성하는 비핵분열성(nonfissile) 핵종인 $^{237}$Np, $^{238}$Pu, $^{240}$Pu, $^{242}$Pu, $^{241}$Am, $^{243}$Am, $^{244}$Cm 등의 핵단면적 자료를 ENDF/B-VI에서 참조하면, 핵분열 단면적이 포획단면적보다 커지기 시작하는 에너지 영역은 각각 순서대로 450, 50, 200, 400, 800, 700, 450 keV 부근이다. 따라서 적어도 450keV 이상의 평균 중성자 에너지를 확보해야 그 목적에 부합할 것으로 여겨진다. 노심 내 중성자 스펙트럼을 결정짓는 요소는 냉각재 물질이나 핵연료 물질의 화학적 형태 또는 노심의 기하학적 구조 등 여러 가지 인자들이 있겠으나 이들 사항에 공히 적용할 수 있는 또 하나의 인자는 단위격자의 기하학적 구조이다. 즉 목표로 하는 중성자 스펙트럼을 구현하기 위하여 단위격자의 기하학적 구조를 최적화할 필요가 있다.

HYPER 설계 팀이 노심의 개념 설계 기초를 확립하기 위하여 중성자 증배 효율 측면에서 최적 단위격자 선정 연구를 수행한 결과, 단위 격자의 P/D(Pitch-to-Diameter) 값이 작을수록 유리하며 특정한 최적점이 없는 것으로 판정되었다. 그러나 P/D 값이 작아짐에 따라 냉각재 채널이 좁아지므로 유속의 증가로 인한 압력강하의 증가 때문에 시스템의 Pumping Power가 과대해져 열수력학적 측면에서 시스템에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 설계팀은 최종적인 최적 P/D 값의 결정은 열수력학적 상세 계산 이후의 추후연구사항으로 남기고 1.5의 P/D값을 잠정적으로 선정, 노심 기초 설계를 착수하여 현재 개념 설계 진행 중에 있다.

이와 관련하여 본 논문에서는, 전술한 최소 450keV의 중성자평균에너지를 구현하고자 하는 목표의 관점에서, 납-비스무트 냉각 방식의 TRU 핵변환 노심의 단위격자 구조가 노심의 핵특성에 미치는

영향을 분석하였다.

## 2. 평가 방법 및 사항

단위 격자 구조 영향을 평가하기 위하여 표준 모델을 설정하고, 격자 변수들을 변화시키면서 단위 격자 셀 단위의 무한 매질 계산을 수행하였다. 먼저 핵연료봉 직경을 일정하게 한 채 pitch를 변화시켜 P/D 효과를 고찰하고자 하였다. 계산 결과로 얻어진 중성자 스펙트럼의 변화 추이를 주시하면서 평균 중성자 에너지가 450keV 목표치를 만족하는 지를 고찰하였다. 아울러 연료 핵종들의 유효 미시핵단면적 자료 등을 토대로 각 핵종의 η(연료 내 흡수된 단위 중성자 당 생성된 핵분열 중성자 수) 값과 시스템의 η 값의 변화 추이를 고찰함으로써 단위격자 구조가 핵연료 물질의 임계 성능 (criticality performance)에 미치는 영향을 세밀하게 평가하고자 하였다.

현재 세계적으로 연구되고 있는 핵변환 시스템 중에 CERN 의 EA( Energy Amplifier) 등은 핵연료 연소에 따른 반응도 감손을 보상하는 방안으로 Th을 혼합 장전하는 개념이다. 이 때 노심의 초기 반응도를 유지하기 위한 핵연료 농축도가 높아져 보다 경한 스펙트럼을 형성하게 된다. 이와 관련하여 본 연구에서는 TRU+Zr 형태 핵연료의 단위격자 이외에 토륨 혼합 연료 시스템에 대하여도 상기의 단위격자 영향 분석을 수행하였다.

TRU 핵종 소멸의 궁극적인 목적에 충실하기 위하여 $^{232}$Th이나 $^{238}$U과 같은 핵원료성(fertile) 물질을 포함하지 않은 순수 TRU 핵연료를 고려할 때, 연소 진행에 따른 반응도 감소을 보상하는 방안이 요구된다. 그 방안으로 고려할 수 있는 첫번째가 가연성 흡수체를 통한 초기 반응도 억제 방법이다. 높은 열중성자 흡수단면적의 가연성 흡수체는 스펙트럼을 경화할 수 있으며 또한 초기 반응도 억제 가능성 여부는 중성자 스펙트럼에 의존한다. 이와 관련하여, 가연성 흡수체가 스펙트럼에 미치는 영향과 단위격자 구조가 가연성 흡수체의 연소반응도 감손량 최소화 능력에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

## 3. 표준모델 및 전산코드

표준모델은 현재 기초 노심 설계 중인 HYPER 노심의 단위 격자 셀의 데이터를 근간으로 하였다. 표준 모델은 실린더 형의 핵연료봉을 육각형태의 냉각수 채널이 둘러싸고 있는 전형적인 고속로심의 단위 격자의 기하학적 형태를 띠고 있다. 표 1은 표준 단위격자의 주요 설계 인자를 수록한 것으로 1.4의 P/D를 표준으로 선정하였다. HYPER 노심의 단위 격자는 fuel meat와 피복관 사이에 gap이 존재하나 그 부피비가 매우 작아 본 계산에서는 무시하고 피복관 영역으로 포함시켜 계산하였다. 이 때 단위 격자 내 핵연료, 피복재, 냉각재 물질이 차지하는 부피비는 각각 25%, 21%, 54%이다. 핵연료봉에 장전되는 가압경수로에서 연소도 35,000 MWD/MTU로 방출된 후 10년 냉각된 것으로 고려하였으며 핵연료 조성은 연소계산 코드 ORIGEN2.1을 사용하여 계산하였다. 핵변환 노심에 장전되는 핵연료의 화학적 조성은 16.5%TRU+83.5%Zr로 결정되었으며, 이 때 TRU 농축도는 핵연료를 균일 장전한

HYPER 노심의 유효증배계수를 0.97로 하도록 추산하였다. 핵연료 밀도를 높혀 스펙트럼을 경화하기 위해 핵연료의 smearing은 고려하지 않았다.

모든 단위 격자 계산은 MCNP4B 전산코드[2]로 수행되었으며 핵단면적 자료는 JEF-2.2를 기반으로 하였다. 사이클 당 중성자수를 1000개로 하여 총 200 사이클의 simulation을 통하여 모든 계산에서의 표준 편차는 0.1% 이하의 결과를 얻을 수 있었다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 표준 모델 계산

표준모델에 대한 단위격자 계산을 수행한 결과, 평균중성자에너지는 77.5keV로 계산되었는데, 납-비스무트 방식임에도 불구하고 소디움(Na) 냉각로인 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 금속 우라늄 연료 노심의 약 200여 keV보다 훨씬 낮다[3]. 핵연료에 포함된 TRU 핵종들의 유효미시단면적 등 임계 성능 평가 인자들을 계산한 결과를 표 1에 정리하였다. 각 핵종들의 α 값을 보면, 모든 마이너악티나이드는 물론이며 비핵분열성 플루토늄인 $^{240}$Pu와 $^{242}$Pu 핵종 마저도 핵분열보다는 포획 가능성이 훨씬 큼을 알 수 있다. 즉, 표준 모델 정도의 에너지 스펙트럼으로는 모든 핵종을 특히 마이너악티나이드 핵종을 고루 소멸시킨다는 관점에서는 그 평균에너지가 턱없이 낮고 오히려 플루토늄을 핵연료로 하는 동력로의 개념에 가깝다.

### 4.2 중성자 스펙트럼 평가

#### 4.2.1 P/D 효과

P/D 효과를 평가하기 위하여 fuel meat의 직경을 표준모델 값으로 일정하게 유지하고 pitch를 1.2에서 1.8까지 변화시키면서 단위 격자 계산을 수행한 중성자 평균 에너지와 스펙트럼 계산 결과를 그림 1에 도시하였다. P/D 값이 감소할수록 납-비스무트의 냉각재의 감속효과가 줄어들어 스펙트럼은 경화되고 있음을 볼 수 있다. P/D를 KALIMER 금속우라늄 노심의 값인 1.2로 줄여 단위격자 내 냉각재 물질이 차지하는 부비비를 37% 까지 감소시켰을 때 중성자 평균 에너지는 86.3 keV까지 경화 되었다 그러나 목표치인 450keV에 이르지 못하고 더욱이 동일 P/D(=1.2)값을 갖는 KALIMER 금속우라늄 노심의 평균에너지 값에도 한참 못 미치어 스펙트럼을 충분히 경화할 필요가 있음을 확인하였다.

#### 4.2.2 Th 효과

표준 모델의 핵연료 화학적 형태는 16.5%TRU+83.5%Zr 으로 KALIMER 노심보다 훨씬 많은 양의 Zr 핵종을 포함하고 있다. Zr 핵종에 의한 스펙트럼의 연화 정도를 추산하기 위하여 표준모델의 화학적 조성을 그대로 유지한 채 Zr 만을 제거하여 스펙트럼을 계산하였다. 이 때 평균 중성자 에너지는 98.7keV로 Zr은 단위격자 셀의 중성자 에너지를 약 27.5% 정도 감소시키는 결과를 보였다. 이와 관련하여 본 연구에서는 Zr 함량을 5%로 감소, 고정하고 잉여반응도를 Th 핵종으로 억제함으로써

스펙트럼을 경화하는 방안에 대하여 고찰하고자 하였다. Zr 감소로 인한 반응도 감소분을 보상할 수 있는 양의 Th 을 첨가하는 방안을 고려하였다. 이때 화학적 조성은 25%TRU+70%Th+5%Zr으로 추산되었다. 평균 중성자 에너지는 199.6keV로 KALIMER 노심과 비슷한 수준까지 경화되었다. Th만의 스펙트럼 경화정도를 추산하기 위하여 단위격자 내 TRU 핵종 밀도를 그대로 유지한 채 앞서 계산에 사용된 양의 Th을 첨가하여 계산한 평균중성자 에너지는 144.7keV이다. 즉, 첨가된 Th은 평균 중성자 에너지를 스펙트럼은 약 46.1 keV (46.7%)정도 경화하는데 기여했음을 알 수 있다.

여전히 목표로 하는 중성자 에너지에 미치지 못하므로 P/D를 1.8에서 1.2 까지 변화시키면서 스펙트럼 경화 정도를 고찰하였다. 그림 2는 스펙트럼 계산 결과를 도시한 것이다. 전 절의 TRU+Zr 핵연료의 경우와 마찬가지로 P/D 값이 감소함에 따라 스펙트럼은 경화되고 있다

그림 3은 P/D가 스펙트럼에 미치는 민감도를 고찰하기 위한 그림이다. TRU+Zr 핵연료의 경우나 TRU+Th+Zr의 토륨 혼합 연료의 두 경우 모두 단위격자내의 스펙트럼은 P/D변화에 선형적으로 대응하고 있음을 보이고 있으며 Th을 혼합한 경우의 스펙트럼이 표준 모델의 중성자 에너지가 더 높음에도 불구하고 P/D 감소에 대하여 훨씬 민감하게 경화되고 있음을 알 수 있다. 즉, P/D를 감소시켜 스펙트럼 경화하는 데는 Th을 혼합 장전한 경우가 유리하다.

요컨대, TRU+Zr 형태의 이원 합금 연료만으로는 중성자 에너지 스펙트럼을 경화하는데 한계가 있으며, Th 등의 핵원료성(fertile) 물질을 혼합 장전하거나 중성자 흡수체 물질을 도입하여 핵연료 농축도를 높이는 방안을 고려해야 한다. 더불어, 노심 내 핵연료 장전의 구역화 과정을 통하여도 어느 정도 스펙트럼을 경화할 수 있을 것으로 여겨진다.

### 4.2.3 가연성 흡수체 효과

여러 가지 가연성 흡수체 물질 중에서 고속 스펙트럼에서 그 반응도가가 가장 크다고 알려진 $B_4C$ 물질을 채택하였으며 $^{10}B$ 농축도는 90%로 고려하였다. 장전 형태는 여러 가지가 있겠으나 가연성 흡수체의 노심 핵특성에 미치는 영향과 잉여반응도 억제 가능성 여부를 검토하고자 하는 연구에서는 기술적인 문제를 고려하지 않고 냉각재 채널에 혼합 장전하였다. P/D 변화의 경우나 Th 혼합 장전하는 경우에 대한 $B_4C$ 물질의 영향 및 효능의 민감도를 평가하기 위하여, 앞서 수행한 모든 계산 경우에 여타 핵종의 수밀도를 그대로 유지한 채 일정량의 $B_4C$ 물질을 추가 장전하고 단위 격자 계산을 수행하였다. 지난 2000년 한양대학교에서 위탁 수행한 『초우란핵종 소멸처리를 위한 임계 및 미임계 노심의 핵연료 장전탄력성 비교 연구』에서 HYPER 노심과 동일한 기하구조의 임계로심에 표준 모델의 핵연료를 장전하였을 때 1년의 주기길이를 만족하기 위해서 185mδk 정도의 잉여반응도가 필요하다고 계산한 바 있다[4]. 따라서 장전량은 표준 모델의 무한증배계수 (1.40785)를 1.2 가까이 억제하는 정도로 결정하였다.

그림 3과 표 3은 $B_4C$ 물질이 추가 장전되었을 때 P/D 변화에 따른 중성자 평균 에너지 변화량을 나타내고 있다. TRU+Zr 핵연료의 경우나 TRU+Th+Zr의 토륨 혼합 연료의 경우 모두 P/D 값이 감소할수록 $B_4C$ 물질 추가 장전에 의한 중성자 스펙트럼의 경화 정도는 둔화되고 있음을 볼 수 있다.

특히, Th혼합 장전의 경우가 P/D값이 1.3 보다 작아지면 스펙트럼을 연화하고 있음을 볼 수 있다. 높은 에너지 영역에서는 $^{10}B$ 핵종의 중성자 흡수단면적이 작아지고 스펙트럼 경화가 둔화되고 C 핵종의 산란 단면적은 에너지에 그다지 의존하지 않으므로 감속 현상만이 지속되고 있는 것이다. 즉, 어느 정도 이상 경한 스펙트럼에서 가연성 흡수체의 추가 장전은 오히려 스펙트럼을 연화함을 말하고 있다. 물론 이 경우, 스펙트럼 효과뿐만 아니라 Th 물질 고유의 핵특성이 서로 중첩되어 있다. 스펙트럼은 시스템의 핵연료 온도계수나 특히 냉각재 온도 계수에 매우 민감하기 때문에 스펙트럼 연화의 원인을 좀더 정확히 분석할 필요가 있다.

### 4.3 임계 성능 (criticality performance) 평가

격자 구조에 따른 단위 셀의 임계 성능 평가를 위한 인자들의 계산 결과를 표 4와 그림 4, 5에 정리하였다. 모든 경우에 P/D 값이 감소하면 스펙트럼이 경화되므로 중성자 증배계수가 증가하는 현상은 당연한 결과이나 그림 4의 각 경우에 대한 민감도를 살펴 보면, P/D 변화에 대한 무한 증배계수는 핵연료 형태에 따라 그 민감도가 다르다. TRU+Zr의 이원합금 연료일 때 보다는 Th을 혼합 장전한 경우의 중성자 증배 효율이 P/D 변화에 매우 민감함을 보여 , 노심 설계 시 반응도 조정에 훨씬 많은 여유가 있음을 말하고 있다. Th 혼합 핵연료 형태인 TRU+Th+Zr의 경우와 가연성 흡수체인 $B_4C$ 물질의 포함된 TRU+Th+Zr+$B_4C$의 경우를 비교한 결과를 보면, P/D가 감소할수록 $B_4C$물질에 의한 반응도 감소량은 점차 줄어들어 그 효능이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 약 1.25 정도의 P/D 값에 이르면 $B_4C$물질은 더 이상 잉여반응도를 억제하지 못하고 오히려 증가시키기 시작하고 있는데 이 또한 스펙트럼 민감도와 밀접한 관계가 있다. 전 절에서 언급한 바처럼 스펙트럼이 매우 경한 노심에 $B_4C$ 물질이 혼합되면 스펙트럼을 오히려 연화함으로써 $\alpha$ 값을 높혀 무한 증배계수를 감소시키는 것이다. 물론 스펙트럼 영향이 가장 지배적일 것으로 여겨지나, 소멸 대상인 TRU 핵종 이외의 Zr이나 Th, $B_4C$의 핵특성에도 적지 않은 영향을 받을 것으로 짐작된다. 따라서 증배계수를 인자별로 쪼개어 면밀히 분석할 필요가 있다. 그림 6은 각 경우의 $\eta_{TRU}$를 도시한 것으로서, P/D 변화 시 냉각재 물질의 중성자 흡수 반응의 증감 효과를 배제한 TRU 핵종 만의 임계 성능을 대변하고 있다.

### 4.4 연소 균일성 평가

마이너악티나이드 핵종이 핵분열 반응을 통하여 직접 소멸되는 정도를 정량화 하기 위하여 다음과 같이 MADF(Minor Actinides Destruction Factors)를 정의하였다.

$$MADF=\Sigma Ni/\Sigma N_{\iota}\alpha_i, \ i=\text{minor actinides 또는 nonfissile plutonium} \qquad (1)$$

즉, MADF는 핵분열성(fissile) 핵종인 $^{239}Pu$ 와 $^{241}Pu$ 핵종을 제외한 마이너악티나이드들과 비핵분열성 플루토늄 핵종들이 중성자를 흡수하였을 때, 포획 반응을 거쳐 또 다른 higher actinides 핵종으로 천이하지 않고 직접 핵분열을 겪어 소멸할 확률을 의미한다.

단위 격자 구조 변경에 따른 MADF의 계산 결과를 표 5에 수록하였으며 격자 구조에 따른 영향을 분석하기 위하여 그림 6에 도시하였다. 전 절의 중성자 증배 효율 영향의 경우와 마찬가지로 모든

경우에 P/D 값이 감소하면 스펙트럼이 경화되므로 MADF가 증가하는 현상은 당연한 결과이다. 그러나 그림 6의 각 경우에 대한 민감도를 살펴 보면, P/D 변화에 대한 MADF의 민감도는 그 크기나 경향에 있어서 그림 3의 스펙트럼 민감도와는 크게 다른 양상을 띠고 있음을 알 수 있다. 한 예로, TUU+Th+Zr 핵연료의 경우 스펙트럼은 P/D 변화에 매우 민감하나 MADF는 거의 변화가 없으며, TRU+Zr+$B_4C$의 경우는 이와 반대되는 경향을 보이고 있다. 즉, 혼합 장전되고 있는 Zr이나 Th, $B_4C$, 또는 여타 핵종을 혼합하여 노심 특성을 최적화하는 하려는 경우 이들에 대한 면밀한 분석을 통하여 노심의 균등 소멸율을 향상시킬 수 있음을 의미한다

## 5. 결론 및 제언

얻어진 결과들로부터 내릴 수 있는 결론은 다음과 같다.

- 납-비스무트 냉각재의 핵연료 대비 부피비율을 이용하여 중성자 스펙트럼 등 노심의 제반 핵특성을 조정할 수 있으며, 그 영향은 TRU+Zr 형태의 이원합금 연료보다는 TRU+ Th +Zr의 삼원 합금 연료가 더 민감하다.
- TRU+Zr 형태의 이원 합금 연료만으로 핵연료를 구성하여서는 직접적인 핵분열 반응을 통하여 마이너악티나이드 소멸시킬 수 있는 정도로 중성자 에너지 스펙트럼을 경화하기 어렵다.
- $B_4C$ 물질 등과 같은 중성자 흡수체는 연한 스펙트럼에서는 스펙트럼을 경화하나 어느 정도 이상 경한 스펙트럼에서는 오히려 스펙트럼을 연화하므로 450keV 이상의 평균 에너지를 가지는 핵변환 노심의 스펙트럼을 구현하기 어렵다.
- 따라서, Th 등의 핵원료성(fertile) 물질이나 중성자 흡수체 물질을 혼합 장전하여 핵연료 농축도를 높이는 방안을 고려해야 한다.
- 경한 스펙트럼에서는 $B_4C$ 물질을 이용하여 노심의 잉여 반응도를 억제하기 어려우므로, 마이너 악티나이드를 핵분열 반응을 통하여 직접 소멸시키려는 노심에서는 $B_4C$ 물질 주변의 스펙트럼을 국부적으로 연화하여야 한다 .

본 연구는 외부 중성자원을 고려하지 않고 단위격자 계산을 수행하였다. 따라서 미임계 노심인 HYPER 노심 특성에 대한 최종적인 최적 스펙트럼과 최적 단위 격자 구조를 결정하기 위해서는, 외부선원을 포함한 전 노심 계산을 수행하여 단위 격자 구조가 외부선원 중성자의 중성자 증폭율 등에 미치는 영향을 추가로 평가해야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 방사선안전신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었음.

# 참고 문헌

1. **박원석 외**, "HYPER **시스템 설계연구**," KAERI/TR-1316/99, KAERI, 1999.
2. J. F. Breismeister, "MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
3. **김영철 외**, "**액체 금속로 요소기술 개발**," KAERI/RR-17173/96, KAERI, 1997.
4. **김종경 외**, "**초우란 핵종 소멸처리를 위한 임계 및 미임계 노심의 핵연료 장전 탄력성 비교 연구**," KAERI/CM-462/2000, KAERI, 2000.

**표 1. 표준 단위 셀의 주요 설계 인자**

| Cell Composition | | | Fuel Meat Diameter (mm) | Pin Diameter (mm) | Pin pitch (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| Fuel Meat | Cladding | Coolant | | | |
| TRU+Zr | HT-9 | Pb-Bi | 4.900 | 6.680 | 9.352 |

**표 2. 표준 단위 격자 내 TRU 핵종들의 핵특성 인자 계산 결과**

| Nuclides | w/o[a)] | $\nu$ | $\sigma_f$ | $\sigma_\gamma$ | $\alpha(=\sigma_\gamma/\sigma_f)$ | $\eta$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{237}$Np | 5.22% | 2.5787 | 0.2193 | 1.8703 | 8.5276 | 0.2707 |
| $^{238}$Pu | 1.44% | 2.9373 | 1.0553 | 0.6679 | 0.6328 | 1.7989 |
| $^{239}$Pu | 53.25% | 2.9204 | 1.8945 | 0.6492 | 0.3427 | 2.1751 |
| $^{240}$Pu | 22.01% | 2.8267 | 0.2865 | 0.6801 | 2.3736 | 0.8379 |
| $^{241}$Pu | 7.52% | 2.9732 | 2.7715 | 0.6158 | 0.2222 | 2.4327 |
| $^{242}$Pu | 4.60% | 2.8486 | 0.1787 | 0.5789 | 3.2396 | 0.6719 |
| $^{241}$Am | 4.85% | 3.3755 | 0.1637 | 2.2460 | 13.7226 | 0.2293 |
| $^{243}$Am | 0.91% | 3.1125 | 0.1195 | 2.0166 | 16.8744 | 0.1741 |
| $_{244}$Cm | 0.19% | 3.2926 | 0.3063 | 0.6239 | 2.0369 | 1.0842 |

a) Weight percent of TRU nuclides included in spent fuel discharged from 3.5 w/o fueled PWR after burnup of 35 GWD/MTU and cooled for 10years

**표 3. 단위 격자 구조 변경에 따른 평균 중성자에너지 계산 결과**

| P/D | | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |
|---|---|---|---|---|---|
| TRU+Zr | Without $B_4C$ | 86.3 | 77.5 (Standard) | 69.7 | 62.6 |
| | With $B_4C$ | 102.6 | 102.1 | 102.2 | 102.3 |
| | Difference [a)] | 16.3 | 24.5 | 32.6 | 39.7 |
| TRU+Th+Zr | Without $B_4C$ | 220.2 | 199.6 | 181.9 | 164.9 |
| | With $B_4C$ | 215.4 | 202.8 | 191.6 | 181.8 |
| | Difference | **-4.8** | 3.2 | 9.7 | 16.8 |

a) Difference= Average Energy with $B_4C$ - Average Energy without $B_4C$

표 4. 단위 격자 구조 변경에 따른 임계 성능 (Criticality Performance) 평가 인자 계산 결과

| P/D | | | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TRU+Zr | Without $B_4C$ | $k_{inf}$ | 1.4789 | 1.4079 | 1.3417 | 1.2791 |
| | | $\eta_{TRU}$ | 1.8596 | 1.8196 | 1.7796 | 1.7410 |
| | With $B_4C$ | $k_{inf}$ | 1.3665 | 1.2120 | 1.0727 | 0.9501 |
| | | $\eta_{TRU}$ | 1.9678 | 1.9667 | 1.9680 | 1.9688 |
| | Difference [a)] | $k_{inf}$ | -0.1124 | -0.1959 | -0.2690 | -0.3289 |
| | | $\eta_{TRU}$ | 0.1082 | 0.1471 | 0.1883 | 0.2279 |
| TRU+Th+Zr | Without $B_4C$ | $k_{inf}$ | 1.5203 | 1.4687 | 1.4180 | 1.3699 |
| | | $\eta_{TRU}$ | 2.2277 | 2.1905 | 2.1546 | 2.1166 |
| | | $\eta$ Fuel [b)] | 1.5474 | 1.5058 | 1.4668 | 1.4264 |
| | With $B_4C$ | $k_{inf}$ | 1.5319 | 1.4506 | 1.3693 | 1.2885 |
| | | $\eta_{TRU}$ | 2.2922 | 2.2676 | 2.2441 | 1.2126 |
| | | $\eta$ Fuel | 1.6202 | 1.5908 | 1.5635 | 0.9794 |
| | Difference | $k_{inf}$ | **0.0116** | -0.0181 | -0.0487 | -0.0814 |
| | | $\eta_{TRU}$ | 0.0645 | 0.0771 | 0.0895 | -0.9040 |
| | | $\eta$ Fuel | 0.0728 | 0.0850 | 0.0968 | -0.4470 |

a) Difference=MADF with $B_4C$-MADF without $B_4C$

b) $\eta_{Fuel}=a/o_{TRU} \times \eta_{TRU} + a/o_{Th} \times \eta_{Th}$, a/o= atomic percent

표 5. 단위 격자 구조 변경에 마이너 악티나이드 소멸 인자 (MADF[a)]) 계산 결과

| P/D | | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |
|---|---|---|---|---|---|
| TRU+Zr | Without $B_4C$ | 0.2271 | 0.2012 | 0.1780 | 0.1578 |
| | With $B_4C$ | 0.3167 | 0.3115 | 0.3094 | 0.3067 |
| | Difference [b)] | 0.0895 | 0.1103 | 0.1314 | 0.1489 |
| TRU+Th+Zr | Without $B_4C$ | 0.6252 | 0.5510 | 0.4913 | 0.4355 |
| | With $B_4C$ | 0.6713 | 0.6236 | 0.5835 | 0.5479 |
| | Difference | 0.0461 | 0.0726 | 0.0922 | 0.1125 |

a) $MADF=\Sigma Ni/\Sigma N_\iota \alpha_i$, i=minor actinides and nonfissile plutonium isotopes

b) Difference=MADF with $B_4C$-MADF without $B_4C$

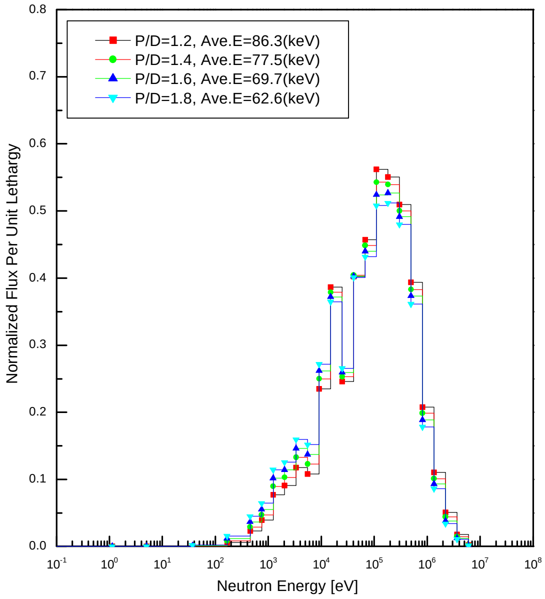

그림 1 표준 모델(TRU+Zr 연료)의 P/D 변화에 따른 중성자 스펙트럼

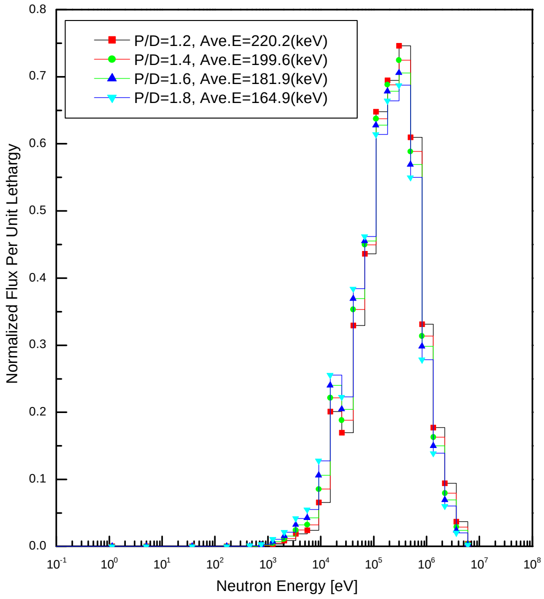

그림 2 토륨 혼합 연료 모델의 P/D 변화에 따른 중성자 스펙트럼

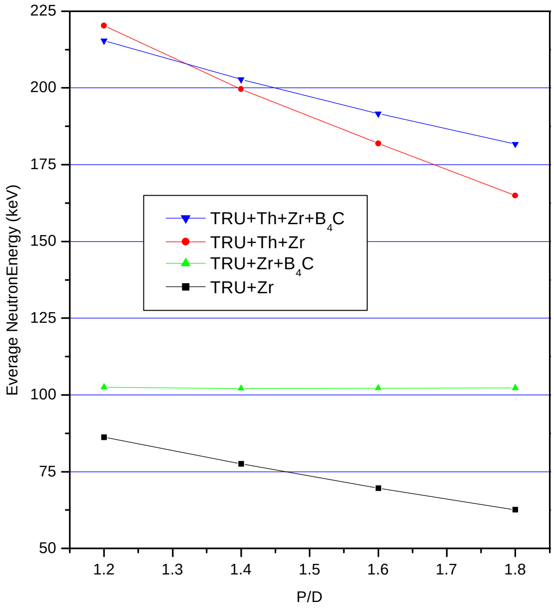

그림 3 단위 격자 구조 변경에 따른 평균 중성자 에너지

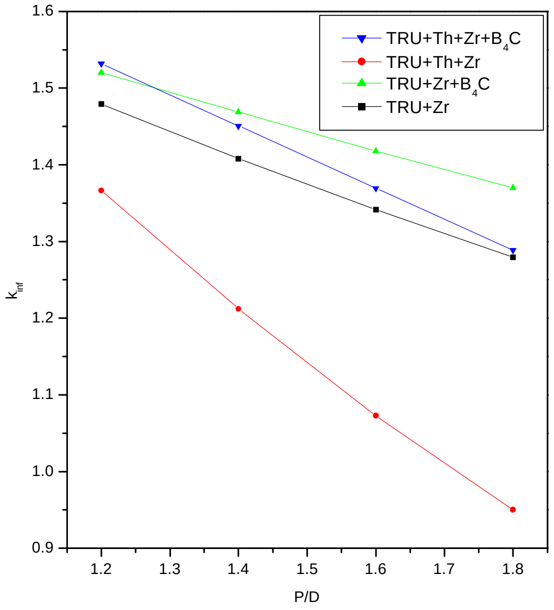

그림 4 단위 격자 구조 변경에 따른 무한 증배계수

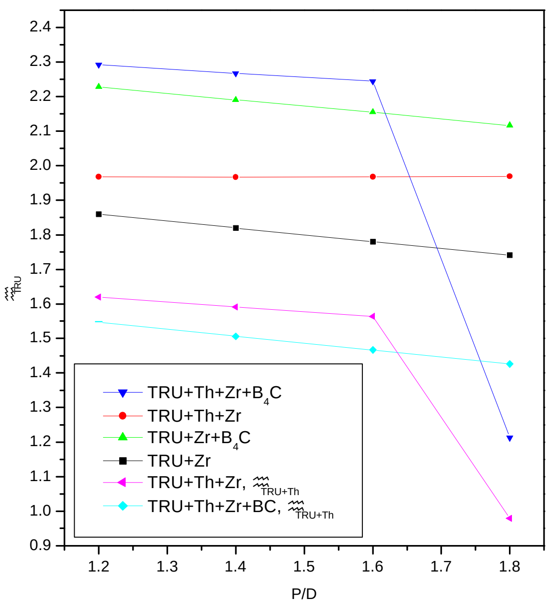

그림 5 단위 격자 구조 변경에 따른 $\eta_{TRU}$

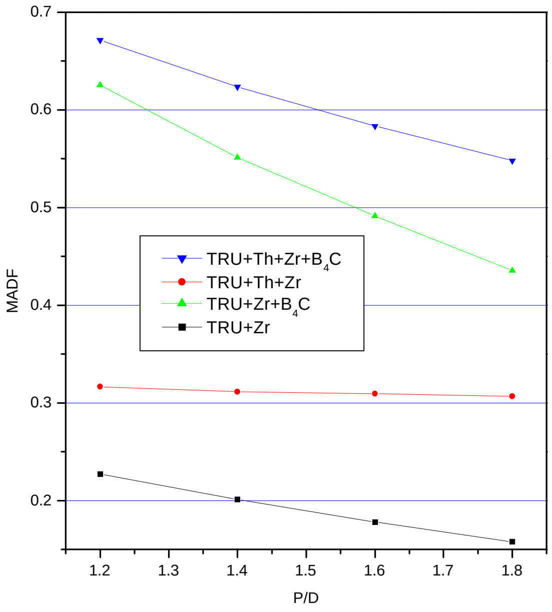

그림 6 단위 격자 구조 변경에 따른 MADF