

’99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

토륨핵연료 주기를 활용하는 가압경수로심의 전환 특성 연구

A Study on Conversion Characteristics of PWR Core
with Once-through Thorium Fuel Cycle

우일탁, 김명현

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리

주형국

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 토륨 핵연료를 가압경수로심에 비순환주기로 적용할때의 고전환 노심을 설계하는 방법론을 연구하였다. 로심은 RTR의 Seed-Blanket 개념을 적용하되, 씨드와 블랭킷을 핵연료 집합체 크기로 구분하였다. 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체는 서로 다른 재장전 주기를 갖는데, 씨드는 3batch 주기로 매년 교체시키며 블랭킷은 충분한 핵분열성 물질의 증식을 위해 약 100 GWD/MT 동안 로심에 체류시킨다. 씨드 핵연료는 UO_2 , 블랭킷 핵연료는 $(Th+U)O_2$ 혼합 핵연료를 선택하였다. 설계 변수들의 변수 해석을 통해 고전환에 유리한 씨드와 블랭킷의 최적 설계안을 찾았는데, 모든 계산은 HELIOS 전산체계를 이용하였다. 고전환에 유리한 최적 설계안을 평가한 결과, 기존 상업용 원자로보다 훨씬 큰 전환율을 가졌으며 사용후 핵연료 발생량 및 장수명 액티나이드 핵종 발생량을 줄일 수 있었으며 노심의 핵적 안전성 측면에서도 음의 냉각재 온도계수와 음의 핵연료 온도계수를 가짐을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a design methodology for a high-converting PWR core with once-through thorium fuel cycle was investigated. The core is a heterogeneous core which is similar to RTR, but different in size of assemblies. Seed and blanket have different reloading cycle, $(Th+U)O_2$ blanket fuel is designed to stay about 100 GWD/MT for a breeding of fissile material, whereas UO_2 driver fuel is to be refueled annually in 3 batch mode. From a parametric study performed by HELIOS code system, the optimized design of seed and blanket module were searched for. Based on the maximization of conversion capability, it was found that the optimized design had much higher conversion ratio than conventional reactors. The production amount of spent fuel and long-lived minor actinides was much less. It was also found that fuel temperature coefficient and moderator temperature coefficient were all negative.

1. 서론

토륨은 자연계에 우라늄보다 풍부하게 존재하는 핵연료 자원이다. 자연계에 존재하는 토륨은 단일핵종인 Th-232만으로 존재하며, Th-232는 중성자를 포획하여 U-233을 생성한다.[1] 생성된 U-233의 핵분열 단면적은 비록 열중성자 영역에서 다른 핵분열성 물질(U-235, Pu-239)에 비해 작지만 흡수 단면적이 U-235에 2배, Pu-239에 5배나 작기 때문에 capture to fission ratio는 적으며, 고속중성자 영역을 제외하고는 U-233이 가장 큰 η 값을 갖는다. 따라서 토륨 핵연료주기는 열중성자 영역에서의 증식이 가능하고, 우라늄 핵연료주기보다 Np, Am, Cm 등의 장수명 핵종 발생량이 적으며 U-232의 생성과 Pu-238, Pu-240의 높은 생성 비율로 핵확산 저항성 측면에서 유리하다. 또한 우라늄에 비해 용융점과 상변화 온도가 높고 물과의 활성 반응도가 낮다. 이런 장점들로 인하여 최근 토륨에 관한 연구가 활발해지고 있다.[2]

본 연구에서는 토륨핵연료 주기를 활용하는 가압경수로심에서의 전환 특성을 분석하고 전환율이 높은 노심을 설계하는 방법론을 연구하였다. 우선 기존의 가압경수로심에 장전되는 핵연료를 토륨으로 바꾸면서 고전환이 되도록 일부 설계변수를 변경하여 핵연료 집합체를 설계하였다. 설계된 안을 바탕으로 설계변수들에 대한 핵전환 특성을 비교하였으며 고전환에 유리한 최적 설계안을 찾았다. 모든 계산은 9개의 핵연료 집합체를 하나의 module로 설정하여 2차원 평면 계산하였으며 HELIOS 전산체계를 이용하였다.[3] 핵연료의 재장전은 Unit module에 대해 Seed 핵연료만 평형 주기로 가정하면서 교체시켰다.

2. 전환 특성 연구를 위한 노심 선정 및 특징

비순환 토륨 핵연료주기를 활용하는 가압경수로심의 전환 특성을 알아보기 위해 변수 해석 및 최적화 설계를 수행하는 기본적인 설계 기준을 선정하였다. 노심은 울진 3/4호기(2,815MW)로 정하였으나 총 177개의 핵연료집합체를 RTR과 같이 씨드와 블랭킷으로 구분하여 비균질 로심으로 구성하였다.[4] RTR의 Seed Blanket Unit (SBU)는 그림 1과 같이 씨드와 블랭킷이 하나의 핵연료 집합체내에 서로 공간적으로 분할된 형태를 갖는데, 여기서는 씨드와 블랭킷을 SBU와 달리 그림 2와 같이 단일 집합체로 구성하여 노심에 장전하였다. 이렇게 함으로써 기존의 재장전 기술을 그대로 적용할 수 있다. 토륨 핵연료주기에서는 토륨에 의한 U-233의 생성이 우라늄 핵주기의 플루토늄 생성보다 그 양이 많으나, 포화를 이루기까지는 5년 이상의 매우 오랜 시간이 소요된다. 본 연구에서는 비순환 토륨 핵주기를 기본으로 하였기 때문에 Th-232로 이루어진 블랭킷을 원자로 내에 오래 잔류시켜 U-233의 생성이 충분해지도록 하고자 씨드와 블랭킷을 서로 다른 교체 주기로 재장전한다. 즉, 씨드 핵연료는 원자로의 임계 조건을 만족시키고 블랭킷으로의 중성자의 공급을 극대화하기 위하여 자주 교체시키나, 블랭킷 핵연료는 씨드 핵연료가 교체되는 동안 로 내에 계속 잔류하면서 장전 위치만 옮겨가도록 하였다.[5] 씨드는 3 batch로 매년 교체되면서 방출연소도가 약 900 EFPD로 될 때까지 이용된다. 블랭킷은 토륨의 전환 특성을 고려하여 약 100 GWD/MT 까지 노 내에 계속 잔류토록 하는 핵주기 전략을 채택하였다.

블랭킷 핵연료는 토륨을 기저물질로 사용하는 (Th+U)O₂ 혼합물이며 씨드로부터 중성자를 공급받아 핵변환되는 핵연료이고, 씨드 핵연료는 블랭킷으로 가능한 많은 중성자를 공급해주고 임계유지를 위해 고농축 UO₂ 핵연료를 사용하였다.

3. 변수 해석 방법

토륨 핵연료를 이용한 가압경수로심에서의 전환 특성은 변수 해석을 통해 알아보았으며, 변수

해석을 통한 전환 특성을 바탕으로 고전환에 유리한 최적 설계안을 마련하는데 연구 목표를 맞추었다.

원자로에서 생성되는 핵분열성 물질들은 Th-232, U-238, Pu-240 등과 같은 핵원료성 물질들이 중성자를 포획함으로써 생성되는데 생성된 U-233, Pu-239, Pu-241 등의 핵분열성 물질들은 매우 빨리 핵분열되어 소모된다. 따라서 생성되는 이득을 나타내는 척도로서 아래와 같은 증식율(Breeding Ratio) 혹은 전환율(Conversion Ratio, CR)을 주로 사용한다.

$$CR = \frac{\text{Total Fissile Material Production Rate}}{\text{Total Fissile Material Consumption Rate}}$$

그런데, 이 수치는 핵연료의 연소가 진행되는 시간에 따라 변하기 때문에 경우에 따라서는 증식 혹은 전환시키는 원자로의 설계특성을 잘 대변할 수 없다. 따라서 일정기간 동안의 원자로 특성을 보여주기 위해 핵분열성 물질 총량 변화 비율(Overall Fissile Inventory Ratio, FIR)로 표시하기도 한다. FIR은 아래 식과 같이 정의된다.

$$FIR = \frac{\text{Fissile Fuel Amount at the End of a Refueling Period}}{\text{Initial Fissile Amount}}$$

설계변수가 전환 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 설계변수의 변화에 따라 무한증배계수(K-infinite) 값을 계산하여 모든 재장전 주기동안 어느 정도 임계를 유지하는 지를 살펴보았고, 각 주기의 연소도에 따라 블랭킷에서 생성되는 U-233의 양을 비교하였다. 또 처음에 장전되는 핵분열성 물질의 양이 각각 다를 수가 있기 때문에 FIR값을 도입하여 전환율이 높은 설계안을 찾았다. 변수 해석에 사용된 설계변수로는 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체의 노심 구성비, 씨드 핵연료 농축도, 블랭킷 핵연료내 UO₂의 농축도, 블랭킷 핵연료내 UO₂ 함유량, 씨드 핵연료봉의 크기, 블랭킷 핵연료봉의 크기등이 있다. 변수 해석은 먼저 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체의 노심 구성에 대한 변수 해석을 통해 고전환에 유리한 노심 구성을 찾아내고 다른 설계변수의 변수 해석시 찾아낸 고전환에 유리한 노심 구성을 적용하였다.

4. 변수 해석을 통한 전환 특성

변수 해석에 사용한 설계안들은 표 1에서와 같이 각 설계변수들의 조합으로 상당히 많은 경우의 수를 갖을 수 있다. 가능한 모든 경우에 대해 전환 특성을 살펴보았는데 어느 하나의 설계변수는 나머지 다른 설계변수들에 대해 큰 영향을 받지 않고 독립적임을 알 수 있었다. 본 논문에서는 설계변수들에 대한 변수 해석 결과 중에서 몇가지 설계안만을 선정하여 보여주고 있다. 표 2는 본 논문에서 변수 해석 결론을 도출하기 위해 사용된 설계안이다.

씨드와 블랭킷 핵연료 집합체를 Checker-Board 형태로 노심을 구성할 때, 노심 구성은 그림 3과 같이 씨드 대 블랭킷 비율이 1:1, 1:3, 3:1으로 될 수 있다. 이에 대한 변수 해석 결과, 그림 4와 같이 블랭킷이 많이 장전되어 질수록 상대적으로 핵분열성 물질량이 줄어들어 충분한 잉여반응도를 유지하기 힘들었지만 U-233의 생성량은 그림 5에서와 같이 많아져서 고전환에 유리하였다. FIR값 측면에서는 블랭킷이 많을수록 각 블랭킷에 공급되는 중성자의 양이 감소하여 각 블랭킷에서 생성되는 U-233 생성량이 감소하고 표 3과 같이 FIR값도 감소하였지만 모든 블랭킷에서 생성되는 U-233은 오히려 증가하여 전체적인 FIR값은 표 4와 같이 증가하였다. 그러나 충분한 임계유지를 위해 씨드 핵연료는 고농축 UO₂를 사용하여야 한다. 이후의 변수 해석은 씨드와 블랭킷 노심 구성 비율을 1:3으로 하여 이루어졌다.

씨드 핵연료 농축도에 대한 변수 해석 결과, 씨드 핵연료의 농축도가 증가할수록 잉여반응도는 그림 6에서와 같이 증가하였으며 보다 많은 중성자가 블랭킷으로 공급됨을 알 수 있었다. 그러나 실제 U-233 생성량은 그림 7과 같이 별 차이가 없다. FIR값은 씨드 핵연료 농축도에 상관없이 블랭킷에서는 표 3과 같이 비슷한 값을 보이지만 전체적인 FIR값은 씨드 농축도가 높을수록 표 4와 같이 조금 커짐을 알 수 있다. 그 이유는 씨드 핵연료 농축도가 높을수록 씨드의 사용후 핵연료내 핵분열성 물질이 많기 때문이다. 씨드 핵연료 농축도 상승은 토륨의 이용률에는 영향을 크게 주지 못하므로 경제적인 효과가 없는 설계방법이며 씨드 핵연료 농축도는 주기초 잉여반응도와 방출연소도를 맞추기 위해서만 조정되어야 할 것이다.

블랭킷 핵연료내 UO_2 농축도에 대한 변수 해석 결과, 농축도가 증가할수록 그림 8과 같이 주기초 잉여 반응도는 증가한다. 하지만 씨드 핵연료가 한번 재장전된후부터는 잉여반응도의 차이는 거의 없다. 그 이유는 블랭킷내 핵분열성물질이 빨리 연소하고 평형상태를 이루었기 때문이다. U-233 생성량은 그림 9와 같이 낮은 농축도에서 연소 초기에 생성량이 많아지지만 1,500 EFPD이후부터는 비슷한 생성량을 보인다. FIR 값은 블랭킷내 UO_2 농축도가 낮을수록 표 3,4와 같이 커졌다. 따라서 블랭킷내 UO_2 농축도는 블랭킷 연소동안 U-233 생성량에 별 영향을 미치지 않으므로 주기초의 잉여반응도를 조절하는 선에서, FIR값 측면에서 가능한 낮게 해야할 것이다.

블랭킷 핵연료내 UO_2 함유량에 대한 변수 해석은 블랭킷 핵연료가 $(Th+U)O_2$ 혼합물임으로 동일 농축도의 UO_2 를 혼합할 경우 UO_2 함유량에 따라 블랭킷내 핵분열성 물질의 양이 달라진다. 이에 대한 변수 해석 결과, 무한증배계수는 블랭킷 핵연료내 UO_2 함유량이 많으면 그림 10과 같이 주기초에 상승한다. 그러나 씨드 핵연료가 재장전되고 연소가 계속되면서 효과가 없어진다. 그 이유는 블랭킷 핵연료내 UO_2 함유량이 많을수록 U-235량이 많아 주기초 무한증배계수를 상승시키지만 연소가 되면서 블랭킷 핵연료내 U-235는 소모되고 씨드 핵연료의 핵분열성 물질과 블랭킷에서 생성된 U-233이 무한증배계수는 영향을 미치지 때문이다. 블랭킷 핵연료내 UO_2 의 함유량이 많으면 그 만큼 토륨의 장전량이 작아 생성되는 U-233의 량도 그림 11과 같이 작다. 이런 이유에서도 무한증배계수는 블랭킷 핵연료내 UO_2 함유량이 높을수록 6주기부터는 함유량이 낮을 때보다 낮아졌다. 블랭킷에서의 FIR값은 표 3과 같이 블랭킷 핵연료내 UO_2 함유량이 작을수록 보다 많은 U-233이 생성되어 커지만 전체적인 FIR값은 표 4와 같이 별 차이가 없다. 따라서 블랭킷 핵연료내 우라늄의 함유량은 잉여반응도를 맞추어 주는 수준에서 우라늄의 함량을 정하되 가능한 낮게 설계해야 할 것이다. 또한 블랭킷내 같은 양의 핵분열성 물질을 장전하는 방법으로 UO_2 의 농축도로 조정하는 경우와 함유량으로 조정하는 경우가 있는데 농축도는 낮추고 함유량을 높이는 방법이 경제적이라 판단된다.

씨드 핵연료 소결체 반경에 대한 변수 해석 결과, 반경이 작아질수록 무한증배계수는 그림 12와 같이 주기초에서 커졌다. 그 이유는 씨드 핵연료봉 굵기를 줄이면 V_m/V_f 비가 증가하여 고속중성자가 열중성자로 감속이 많이 되어 핵분열이 많이 일어나 열중성자로인 경우 임계도가 증가되기 때문이다. 하지만 장전되는 핵분열성 물질량이 작아져서 씨드의 방출 연소도가 감소된다. 씨드 핵연료 소결체 반경이 작아질수록 중성자 에너지 스펙트럼은 softening되어 주기초에서 주기말까지의 반응도 변화가 커진다. 그러나 블랭킷 핵연료내의 U-233 생성량은 그림 13과 같이 거의 변화가 없다. FIR값은 표 3,4와 같이 씨드 핵연료 소결체 반경이 작아질수록 감소하는 경향을 보여주었다.

블랭킷 핵연료 소결체 반경에 대한 변수 해석 결과, 블랭킷 핵연료 소결체 반경이 커질수록 무한증배계수는 그림 14와 같이 1주기에서는 핵원료성 물질의 증가로 인한 중성자 흡수량이 커지면서 감소하지만, 연소가 진행될수록 블랭킷 핵연료내에 U-233 생성이 많아지면서 후속 주기로 갈수록 증가하는 효과를 볼 수 있다. 또한 블랭킷 핵연료 집합체에서 핵연료 반경이 증가하면 스펙트럼의 경화(Spectrum Hardening)가 일어나 Th-232의 열외중성자 영역 흡수량이 커지므로 더 많은 핵변환이 일어나 그림 15와 같이 U-233의 생성량이 크게 증가한다. FIR값은 표 3,4와 같이 블랭킷 핵연료봉 크기가 증가할수록 증가한다. 결론적으로 고전환에 유리한 설계안은 가능한 두꺼운 블랭킷 핵연료봉을 가져야 한다.

5. 최적 설계안 분석

변수 해석을 통한 설계 변수들의 전환 특성을 고려하여 고전환에 유리한 최적 설계안을 마련하였다. 최적설계안은 로심내 블랭킷 핵연료 집합체를 증가시키고 블랭킷 핵연료봉 크기를 증가시켜, 장전되는 토륨이 많은 것이 유리함으로 로심내 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체 구성비를 1:3으로 선택하였고 블랭킷 핵연료 반경은 씨드 핵연료 반경보다 20 % 정도 크게 설정하여 0.496 cm로 정하였다. 토륨이 너무 많이 장전되면 핵분열성 물질의 장전량이 상대적으로 적어져 주기길이는 짧아지게 되어 씨드 핵연료 집합체의 농축도를 높여 약 15 w/o로 하였다. 주기초 씨드 핵연료 집합체와 블랭킷 핵연료 집합체간의 심한 열출력 차이를 줄이기 위해 블랭킷내 핵분열성 물질(U-235)을 장전하는데, U-235 장전에 있어 고농축된 우라늄을 사용하는 것과 비교적 낮은 농축의 우라늄을 많이 함유하는 방법 중 후자가 더 경제적이다. 씨드 핵연료 집합체는 잉여반응도 조절을 위해 가연성 독봉을 사용하였으며 블랭킷에는 사용하지 않았다. 씨드 핵연료 집합체내 가연성 독봉은 독물질을 Boron으로 선택하여 IFBA(Integral Fuel Burnable Absorber) 형태로 사용하였으며 가연성 독봉의 위치는 가연성 독봉을 사용하지 않았을 때 열출력이 높은 곳을 선정하여 총 120개 사용하였다.

표 5는 최적 설계안의 설계변수이다. 최적 설계안의 격자해석을 통해 핵적 특성을 살펴보았다. 가연성독봉을 사용함으로써 그림 16과 같이 주기초 잉여 반응도를 낮출 수 있었다. 최적 설계안의 FIR 값은 표 6에서와 같이 기존의 가압경수로의 전환율 0.6보다 높은 전환율을 보이고 있다.

최적 설계안은 12주기동안 107,600 MWD/MT(3,600 EFPD)의 연소도를 가지며 약 10,134 GWD의 열출력을 얻을 수 있다. 이러한 출력을 얻기 위해 요구되어지는 핵연료 수요량을 아래의 표 7과 같이 나타내었다. 최적 설계안의 경우, 우라늄의 소모량은 울진 3/4호기에 비해 약 56 % 감소하여 사용후 핵연료의 발생량을 크게 줄일 수 있었으나, U-235의 소모량은 오히려 2배가 증가하였다. 그 이유는 고전환을 위해 토륨을 이용하였고 임계를 이루기 위해 고농축의 핵연료를 사용하였을 뿐만 아니라 비순환 토륨 핵주기를 목표로 하였기 때문에 이러한 결과가 도출되었다.

그림 17은 설계안의 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수이다. 이 값들 모두 전 주기에 걸쳐 음의 값을 유지하였으므로 로심 설계시 요구되어지는 내재적인 안전성을 확보함을 알 수 있었다.

최적 설계안은 로심에 장전되는 총 177개 핵연료 집합체중 45개 씨드와 132개 블랭킷 핵연료 집합체로 구분된다. 씨드 핵연료의 3Batch 재장전 전략을 고려하면 45개 씨드 핵연료 집합체 중 주기마다 교체되는 씨드 핵연료 집합체수는 15개이며 로심에 장전된 132개의 블랭킷 핵연료 집합체는 토륨의 전환 특성을 고려하여 12주기마다 교체되며 그 때 방출연소도는 107,600 MWD/MT이다. 최적 설계안의 로심 재장전 전략을 고려한다면 사용후 핵연료 발생량은 일반적인 PWR보다 3 배정도 감소하였다. 각 핵연료 집합체별 사용후 핵연료내의 주요 핵종을 살펴보면 표 8과 같이 Pu 생성량은 PWR과 비교하면 씨드 핵연료 집합체에서 많지만 매년 방출되는 핵연료 집합체수를 고

려한다면 오히려 PWR보다 약 2.4배 적게 생성되어 비핵확산 측면에서 유리하고 장수명 액티나이드 핵종 발생량은 1.8배 감소하여 보다 환경 친화적임을 알 수 있다.

6. 결론 및 향후과제

토륨 핵연료를 사용하는 가압경수로심에서의 전환 특성을 살펴보았으며 변수 해석을 통해 고전환에 유리한 최적 설계안을 마련하였다. 최적 설계안은 토륨 핵연료에 의해 생성되는 U-233을 재처리하지 않는 비순환 토륨 핵연료주기를 사용하였기 때문에 높은 전환율을 얻을 수 없었지만, 일반 상용로보다는 높은 전환율을 얻을 수 있었다. 최적 설계안은 찌드 핵연료의 26,900 MWD/MT와 블랭킷 핵연료의 107,600 MWD/MT 방출연소도를 가지며, 사용후 핵연료 발생량을 크게 감소시킬 수 있었으며 Pu 및 장수명 액티나이드 핵종 생성량도 일반 가압경수로보다 작아 비핵확산 측면에서 유리하고 환경 친화적이었다. 그러나 임계에 도달하지 못하는 블랭킷 핵연료가 많이 장전되고 비순환 토륨 핵연료 주기로 원자로의 임계를 유지하려 하였기 때문에 높은 농축도의 찌드 핵연료의 사용이 필요하였다. 따라서 기존의 PWR에 비해 많은 양의 U-235가 사용되었다. 설계안은 안전성 측면에서 음의 냉각재 온도계수와 핵연료 온도계수를 가짐으로써 내재적인 안전성을 확보할 수 있었다.

최적 설계안에 대한 열수력학적 조건은 아직 고려하지 않았으므로 찌드와 블랭킷사이에서 예상되는 열출력 차이를 극복하는 방안을 모색하여야 한다.

본 연구에서는 찌드 핵연료로 UO_2 만을 고려하여 전환 특성을 알아보았지만 금속 핵연료인 U/Zr alloy에 대한 전환 특성 연구도 되어야 할 것이다. 금속 핵연료를 사용하면 장전되는 핵분열성 물질의 증가로 실제 연소하는 일수인 Effective Full Power Day(EFPD)를 증가시키는 효과는 있겠지만 UO_2 를 고려한 경우와 비슷한 전환 특성을 보일 것으로 예상된다.

본 연구는 전환 특성에 대해서만 알아보았는데, 추가적으로 핵확산 저항성 측면에서 사용후 핵연료내 Pu 생성량, Pu 동위원소의 함유량 및 장수명 액티나이드 핵종의 소멸관점에서 연구가 되어야한다.

참고 문헌

1. M. Lung, "A Present Review of The Thorium Nuclear Fuel Cycle," Nuclear Science and Technology, European Commission, 1997
2. V. Arkhipov, H. J. Rutten, and A. Galperin, "Progress Summary of the IAEA Coordinated Research Program on the Potential of Thorium-based Fuel Cycles to Constrain Pu and to Reduce Long-lived Waste Toxicity," ICENES'98, The 9th International Conference of Emerging Nuclear Energy System, Tel-Aviv, Israel, June 28 - July 2, 1998.
3. R.J.J. Stamm'ler, J.J. Casal, E.A. Villarino, HELIOS Method, HELIOS Documentation Rev. No. 2, Scandpower A/S, 1993
4. A. Galperin, P. Reichert, and A.Radkowsky, "Thorium Fuel Cycle for Light Water Reactor-Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle," Science & Global Security, Vol.6, 265-290, 1997
5. 김명현, 임재용, "고전환 압력관형 경수로심의 최적 노심 설계," '98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998

표 1. 변수 해석에 사용된 설계 변수 조합

Core Configuration [seed to Blanket]	Seed		Blanket			Pin pitch [cm]
	Enrichment	Pellet Radius	Enrichment	UO ₂ Content	Pellet Radius	
	[w/o]	[cm]	[w/o]	[%]	[cm]	
1 to 3	10 w/o	0.413	10 w/o	10 %	0.413	1.285
	13 w/o	0.372	15 w/o		0.454	
	15 w/o	0.351	20 w/o		0.475	
	20 w/o	0.330			0.496	

표 2. 변수 해석에 사용된 설계안

Case #	Core Configuration [Seed to Blanket]	Seed		Blanket			Pin pitch [cm]
		Enrichment [w/o]	Pellet Radius [cm]	Enrichment [w/o]	UO ₂ Content [%]	Pellet Radius [cm]	
1	1 to 3	5	0.413	20	10	0.413	1.285
2	3 to 1						
3	1 to 3						
4		10					
5		15					
6		20					
7				5			
8				10			
9				15			
10				10		0.454	
11						0.475	
12						0.496	
13							
14		0.372	10		0.413		
15		0.351					
16	0.330						

표 3. 변수 해석에 사용된 설계안의 블랭킷에서의 FIR 값

Case #	Cycle									AVG.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0.9275	0.9699	0.9746	0.9955	0.9889	0.9930	1.0068	0.9969	0.9976	0.9834
2	0.9370	0.9696	0.9719	0.9949	0.9848	0.9886	1.0058	0.9941	0.9953	0.9824
3	0.9093	0.9625	0.9731	0.9937	0.9903	0.9957	1.0069	0.9981	0.9990	0.9809
4	0.9216	0.9674	0.9744	0.9927	0.9892	0.9938	1.0055	0.9978	0.9987	0.9823
5	0.9285	0.9708	0.9761	0.9920	0.9892	0.9932	1.0040	0.9978	0.9986	0.9833
6	0.9333	0.9734	0.9776	0.9908	0.9896	0.9930	1.0030	0.9978	0.9987	0.9841
7	1.8814	1.2952	1.1336	1.0779	1.0445	1.0313	1.0275	1.0147	1.0107	1.1685
8	1.1986	1.1409	1.0766	1.0513	1.0299	1.0218	1.0220	1.0110	1.0082	1.0622
9	1.0079	1.0376	1.0224	1.0217	1.0107	1.0088	1.0136	1.0053	1.0042	1.0146
10	1.2209	1.1581	1.0939	1.0640	1.0421	1.0331	1.0294	1.0197	1.0165	1.0753
11	1.2316	1.1675	1.1034	1.0707	1.0490	1.0394	1.0340	1.0247	1.0212	1.0823
12	1.2428	1.1778	1.1134	1.0780	1.0564	1.0463	1.0391	1.0301	1.0264	1.0900
13	1.0218	1.0376	1.02951	1.0263	1.0200	1.0183	1.0185	1.0145	1.0138	1.0222
14	1.1915	1.1385	1.0756	1.0522	1.0287	1.0210	1.0224	1.0103	1.0076	1.0608
15	1.1882	1.1374	1.0749	1.0525	1.0281	1.0205	1.0228	1.0099	1.0071	1.0601
16	1.1852	1.1361	1.0741	1.0529	1.0275	1.0199	1.0232	1.0095	1.0065	1.0594

표 4. 변수 해석에 사용된 설계안의 전체적인 FIR 값

Case #	Cycles									AVG.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0.8458	0.8559	0.8606	0.8611	0.8594	0.8644	0.8621	0.8604	0.8651	0.8594
2	0.8451	0.8420	0.8383	0.8503	0.8425	0.8391	0.8502	0.8426	0.8392	0.8432
3	0.8486	0.8849	0.9024	0.8847	0.8956	0.9133	0.8877	0.8981	0.9149	0.8922
4	0.8709	0.8879	0.8921	0.8917	0.8922	0.8966	0.8928	0.8930	0.8969	0.8904
5	0.8898	0.9002	0.9004	0.9043	0.9024	0.9027	0.9048	0.9026	0.9025	0.9010
6	0.9039	0.9110	0.9100	0.9148	0.9124	0.9112	0.9150	0.9123	0.9109	0.9112
7	0.9303	0.9320	0.9249	0.9217	0.9179	0.9160	0.9177	0.9147	0.9130	0.9209
8	0.9169	0.9233	0.9197	0.9197	0.9163	0.9147	0.9170	0.9140	0.9125	0.9171
9	0.9086	0.9164	0.9146	0.9173	0.9145	0.9131	0.9161	0.9133	0.9118	0.9139
10	0.9279	0.9332	0.9301	0.9295	0.9266	0.9257	0.9273	0.9248	0.9239	0.9276
11	0.9322	0.9382	0.9356	0.9335	0.9311	0.9308	0.9314	0.9295	0.9292	0.9323
12	0.9365	0.9434	0.9415	0.9376	0.9356	0.9362	0.9357	0.9344	0.9347	0.9372
13	0.9289	0.9344	0.9339	0.9344	0.9334	0.9339	0.9347	0.9338	0.9343	0.9335
14	0.8990	0.9037	0.8990	0.9040	0.8981	0.8950	0.9015	0.8960	0.8927	0.8987
15	0.8873	0.8923	0.8872	0.8938	0.8867	0.8830	0.8913	0.8845	0.8806	0.8874
16	0.8742	0.8793	0.8743	0.8825	0.8739	0.8699	0.8799	0.8716	0.8673	0.8747

표 5. 최적 설계안의 설계 변수

Parameter	Seed	Blanket
Fuel Assembly Size, cm	20.56	
Fuel Material Composition	UO ₂ Enrichment 15 w/o	(U+Th)O ₂ U Enrichment 10 w/o U Content 20 %
Initial Fuel Weight (kg H.M)	U - 426.8 Th - 0.0	U - 123.7 Th - 450.5
Pellet Radius (cm)	0.413	0.496
Moderator to Fuel Volume Ratio, cm	2.0	1.0
No. of guide tubes	4 + 1 central	
Reactivity Control	Control rods + Burnable poisons	none

표 6. 최적 설계안의 FIR 값

	Cycle												AVG.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Blanket	0.9997	1.0242	1.0193	1.0097	1.0057	1.0054	1.0095	1.0066	1.0061	1.0095	1.0063	1.0054	1.0089
Core	0.9140	0.9226	0.9233	0.9227	0.9192	0.9193	0.9226	0.9195	0.9197	0.9224	0.9193	0.9195	0.9203

표 7. 같은 에너지 생산을 위해 필요한 핵연료 수요량 (for 10,134 GWD)

	Designed Rx.	UCN-3/4
운전 년수 (Year)	12.33	12.33
토륨 장전량 (Ton)	59.464	0
우라늄 장전량 (Ton)	105.946	245.05
U-235 장전량 (Ton)	14.612	7.35
사용후 핵연료내 U-235 량 (Ton)	6.596	0.94
U-235 소모량 (Ton)	8.016	6.41

표 8. 최적 설계안의 핵종 조성

초기 핵종 조성 (kg)			
Nuclide	Seed	Blanket	PWR (3.34)
Th232	-	450.486	-
U235	64.017 (15) [*]	12.372 (10)	14.327 (3.34)
U238	362.767	111.356	414.641
사용후 핵연료내 핵종 조성 (kg)			
Nuclide	Seed ^a	Blanket ^b	PWR (3.34)
Th232	-	413.412	-
U232	-	0.066	-
U233	-	9.771	-
U235	35.573 (9.15)	1.467 (1.5)	2.709 (0.67)
U238	353.022	95.876	401.756
Np237	0.410	0.368	0.153
Pu238	0.097 [2]	0.344 [9]	0.063 [1]
Pu239	3.890 [73]	1.866 [48]	2.273 [52]
Pu240	0.756 [14]	0.654 [16]	1.133 [26]
Pu241	0.546 [10]	0.661 [17]	0.627 [14]
Pu242	0.068 [1]	0.376 [10]	0.286 [7]
Am241	0.016	0.050	0.018
Am243	0.012	0.188	0.065
Cm242	0.003	0.013	0.007
Cm243	0	0.00006	0.0003
Cm244	0.003	0.154	0.023
Cm245	0.0001	0.025	0.001
Total Pu	5.357	3.901	4.382
Total MA ^d	0.444	0.798	0.267
Total Mass ^e	5.801	4.699	4.649

a : 900 EFPD (26,900 MWD/MT) b : 3,600 EFPD (107,600 MWD/MT)

c : 1,085 EFPD (40,500 MWD/MTU)

d : MA = Np237+Am241+Am243+Cm242+Cm243+Cm244+Cm245

e : Total mass of transuranic nuclides * : Weight % of U in () and Pu in []

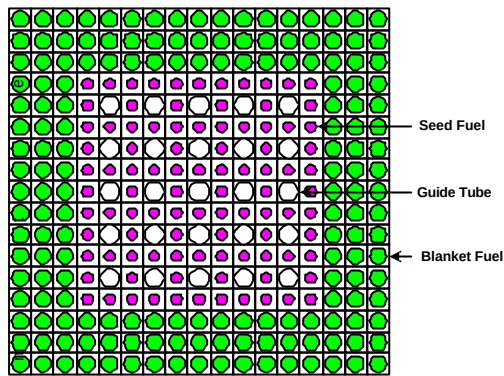


그림 1. Seed-Blanket Unit(SBU) 형태

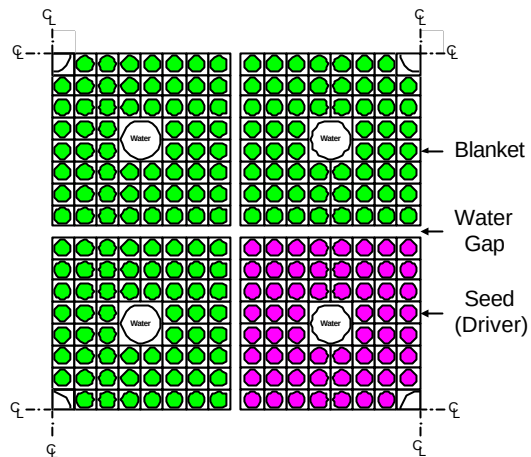


그림 2. HELIOS Model (1/4 Assembly)

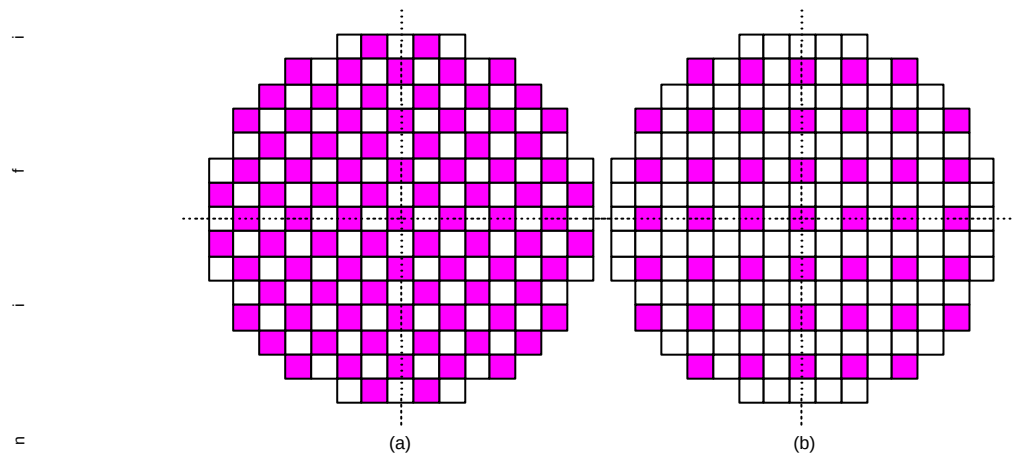


그림 3. 씨드와 블랭킷 핵연료 집합체의 노심 구성비에 따른 노심 형태
(a) 씨드 : 블랭킷 = 1 : 1 , (b) 씨드 : 블랭킷 = 1 : 3 or 3 : 1

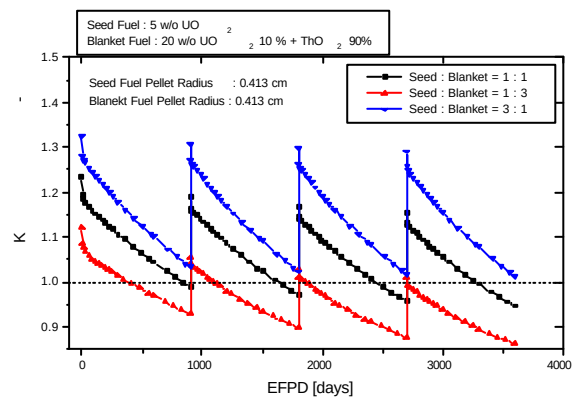


그림 4. 노심 구성비에 따른 K_{inf}

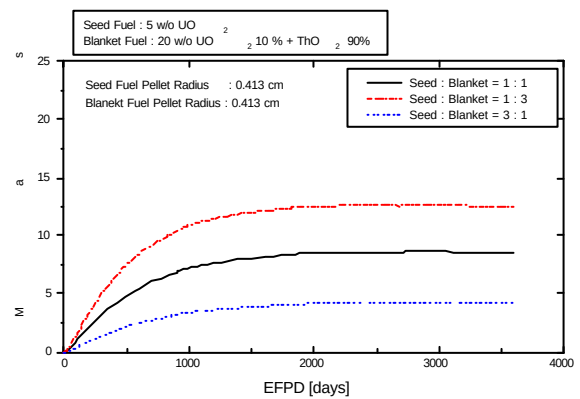


그림 5. 노심 구성비에 따른 U-233 생성량

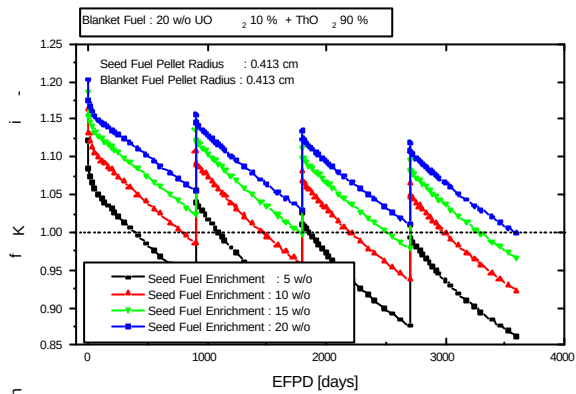


그림 6. 씨드의 UO_2 농축도 변화에 따른 $K\text{-inf}$

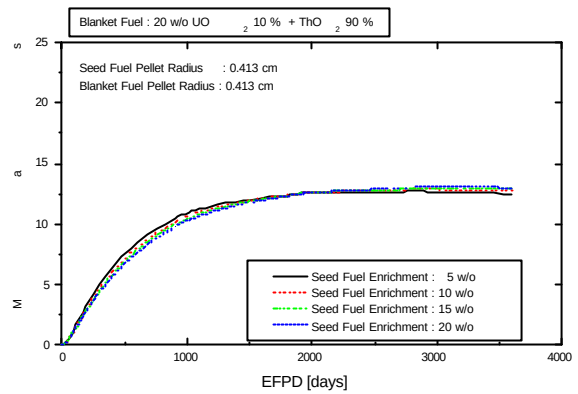


그림 7. 씨드의 UO_2 농축도 변화에 따른 U-233 생성량

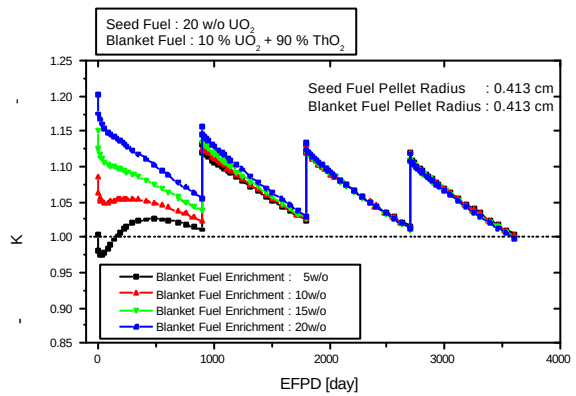


그림 8. 블랭킷의 UO_2 농축도 변화에 따른 $K\text{-inf}$

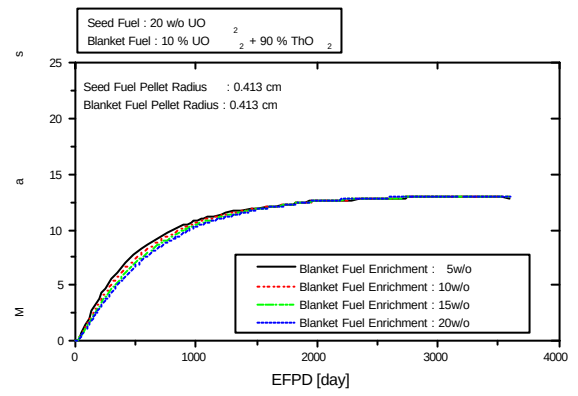


그림 9. 블랭킷의 UO_2 농축도 변화에 따른 U-233 생성량

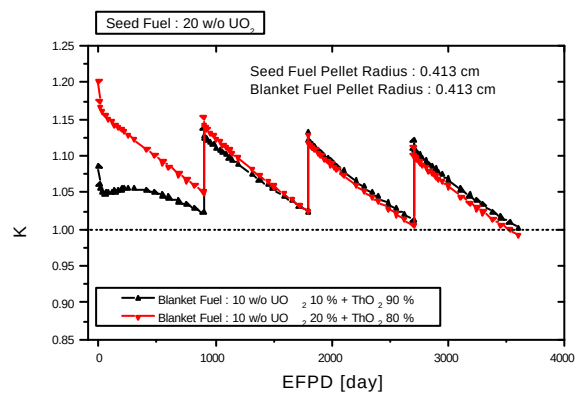


그림 10. 블랭킷의 UO_2 함유량에 따른 $K\text{-inf}$

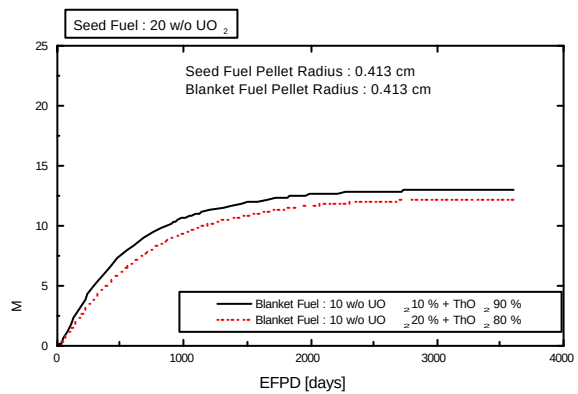


그림 11. 블랭킷의 UO_2 함유량에 따른 U-233 생성량

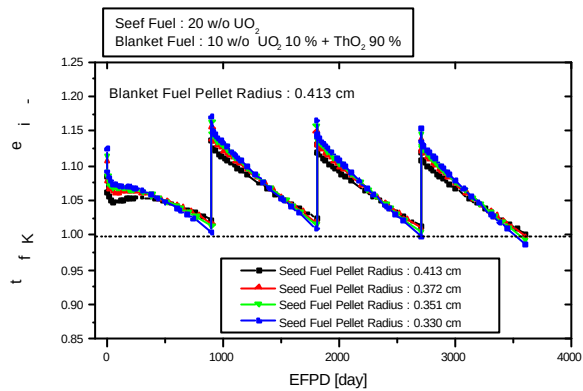


그림 12. 씨드 핵연료봉 크기에 따른 K-inf.

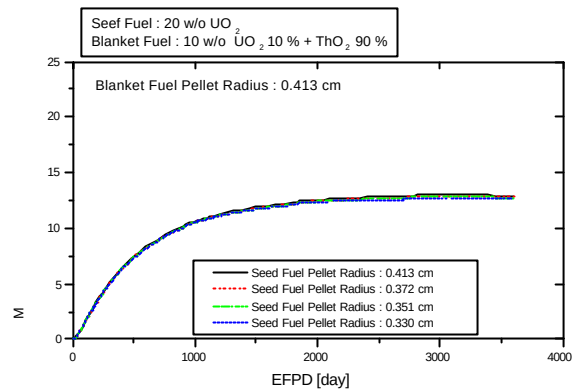


그림 13. 씨드 핵연료봉 크기에 따른 U-233 생성량

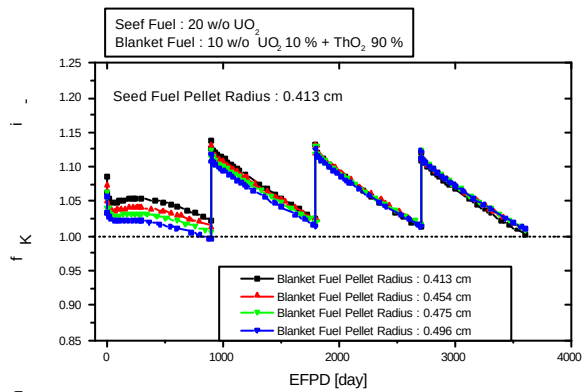


그림 14. 블랭킷 핵연료봉 크기에 따른 K-inf.

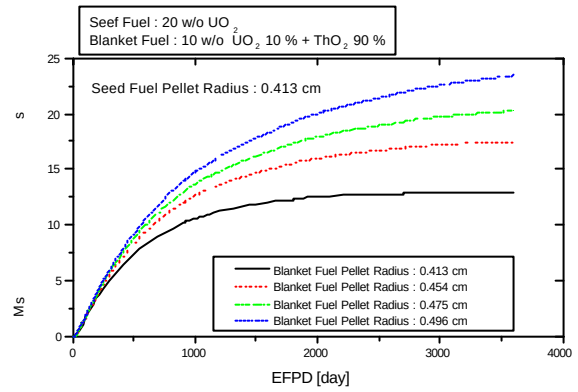


그림 15. 블랭킷 핵연료봉 크기에 따른 U-233 생성량

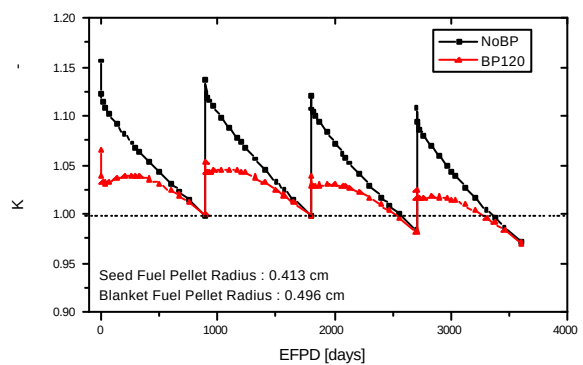


그림 16. 최적 설계안의 연소에 따른 K-inf.

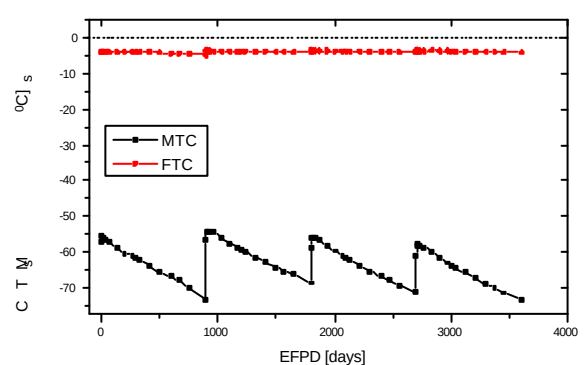


그림 17. 최적 설계안의 MTC, FTC