'98 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고전환 압력관 모듈형 신형 경수로의 개념 설계

이경훈, 김명현
경희대학교

요 약

Th-232를 Fertile 핵연료로 사용한 압력관형 고전환 경수로심을 설계하였다. 토륨 Blanket은 10년 정도 노내에 위치시키고, 농축 우라늄 Driver는 매년 재장전하도록 설계하였다. Driver로는 UO_2 핵연료와 U-10%Zr 금속 핵연료를 사용하였고, Blanket으로는 이중 탄소 피막 핵연료를 ThO_2에 적용한 핵연료를 사용하였다. 핵연료봉의 구조는 울진 3/4호기 핵연료와 같은 재원으로 하였으며 육각형 격자 배열로 집합체를 구성하였다. Seed Bundle을 1년 단위로 교체하고 Blanket Bundle을 5년~10년간 노내에 위치시키는 경우 경수로보다는 높은 전환율을 갖는 원자로를 설계할 수 있었다.

1. 서론

여러 원자력 선진국가에서는 기존 원전에 비하여 경제성이 향상되고 안전성이 증진된 개량원전이나 피동 및 고유 안전성 원전을 개발하고 있다. 이러한 신형원자로는 다음과 같은 개선을 통하여 안전성의 증진과 경제성 향상을 개발 목표로 하고 있다. 신뢰성이 향상된 원자로의 감시·계측·제어 장치의 개선과 저 출력 밀도 노심, 피동형 안전성을 바탕으로한 안전성 향상을 추구하고, 설계 및 건설의 모듈화로 공기와 건설비를 줄이고, 고연소도·고전환의 핵연료를 사용한 장주기 운전, 시스템 수명연장, 발전소 이용률 증대를 통한 경제성 향상을 목적으로 한다.

본 연구에서는 상기 신형원자로의 개발 목표를 동시에 만족하는 새로운 개념의 원자로로서 높은 핵확산 저항성을 가진 Thorium Cycle을 사용한 고전환 압력관 모듈형 신형 경수로를 개념 설계하였다. 압력관을 사용하는 CANDU 원자로를 사용해서 각각의 Bundle을 Driver와 Blanket으로 구분된 비균질 로심으로 구성해서 원자로를 설계하였다.

2. 원자로의 설계안

노심의 고유 안전성을 위해 '열중성자로'로 설계하며, 핵확산 저항성을 높이고 사용후 핵연료내의 반감기가 긴 Minor Actinide의 발생량을 줄일 수 있는 Thorium Cycle을 핵연료로 채택하여 고전환 노심이 되도록 설계하였다. 전환율을 높이기 위해 Bundle을 Seed Bundle과 Blanket Bundle의 2가지 종류로 구분하였다. Seed Bundle은 1년을 단위로 교체하고 Blanket Bundle은 5년~10년간 노내에 위치하게 했다. 원자로의 형태는 CANDU 원자로처럼 On-power Refueling이 가능하도록 하여 이용률을 높이고, 고농축 핵연료를 사용하므로써 CANDU보다 Discharge Burnup이 더 길면서, 사용후 핵연료 발생량이 적은 주기를 택하여 핵연료 주기 경제성을 향상시켰다. 노심의 운전 및 보수, 유지를 향상시키기 위해서 무붕산 운전을 지향하며, CANDU처럼 Calandria를 사용하여 여러 가지의 다양한 반응도 제어 및 노심 정지 기구들의 설치가 가능토록 하였으며, 보수·유지가 압력관 단위로 가능하도록 Modular Design과 Modular Construction이 가능하게 하였다. 노심의 중대사고 안전성에 대해서 CANDU와 같은 압력관 냉각계통을 설치함으로 LOCA에 대해 보다 높은 안전성을 갖으며, 음의 반응도 계수 및 기포 계수를 갖도록 설계하였다. 감속재는 CANDU에서 사용되고 있는 D_2O를 사용하지 않고 Calandria가 Air로 차있는 Dry Calandria 개념을 도입하여 사고시 비상 정지 기능과 장기 노심 냉각 기능이 가능케 하였다. 그 이유는 만약 반응도 사고가 발생하였을 경우 H_2O를 주입하여 H_2O의 중성자 흡수를 통하여 반응도를 낮추기 위해서이다. 또한 압력관과 Dry Calandria 사이에 Thermal Switch의 개념을 활용하여 사고시 노심 냉각이 피동적이 되도록 설계하였다. 냉각재로는 농축 우라늄 핵연료를 사용하기 때문에 H_2O를 사용하였다.

3. 핵연료의 설계안

Seed Bundle은 Blanket Bundle에서 전환이 일어나도록 중성자를 공급해주는 역할을 하므로 Blanket Bundle에 많은 중성자를 공급해주기 위해 고농축도의 우라늄 핵연료를 사용한다. 본 연구에서 핵연료 형태는 UO_2 핵연료와 U-10%Zr 금속 핵연료 모두 고려하였다. Blanket Bundle은 Seed Bundle에서 중성자를 공급받아 전환이 되는 핵연료로서 장시간 노내에 존재해야 하므로 기계적 건전성이 좋은 탄소 피막 핵연료를 ThO_2에 적용하였다.

3.1 Driver(Seed) 핵연료의 설계안

Seed Bundle은 가능한 한 많은 양의 중성자를 Blanket Bundle에 공급하고 장주기 운전이 가능해야 하므로 탄소 피막 핵연료를 사용하지 않고 UO_2 핵연료를 사용하였으며, 아울러 더 많은 핵

연료를 장전 할 수 있는 금속 핵연료를 사용하여 Bundle을 구성하였다. 금속 핵연료는 핵연료내의 Fissile 물질의 조성, 함유된 금속 물질의 조성에 따라 그 특성이 매우 다르다. 합금 제조에 사용되는 금속으로는 Al, Be, Zr, Mo등이 있으나 본 연구에서는 우라늄과 지르코늄을 혼합한 U-10%Zr 금속 핵연료를 사용하였다. 이 두 가지 핵연료에 대해 U-235의 농축도를 5 w/o, 10 w/o, 20 w/o로 변화시키면서 Seed Bundle에 대한 계산을 하였다.

3.2 Blanket 핵연료의 설계안

Thorium Cycle을 이용해서 높은 전환율을 얻기 위해 핵연료봉의 배열을 육각형 격자구조로 사용해서 최대한 많은 양의 Fertile 물질을 장전하였다. 또한 Blanket Bundle은 장시간 노내에서 존재해야 하므로 열전도도가 높고 Swelling이 적어 열적 안전여유도가 증가되고 고연소도를 실현할 수 있는 탄소 피막 핵연료를 Graphite Matrix에 충진한 핵연료를 사용하였다.[1] 계산시, 핵연료 입자는 완벽한 구형이며 이 입자들은 Closed Packing인 HCP로 이상적으로 집적되었고, 소결체 안에 채워지는 UCO Fissile 입자와 ThO_2 Fertile 입자의 두 핵연료 입자는 모두 같은 크기로 제작된다고 가정하였다. 순수하게 Th-232로만 구성하면 주기초에 Blanket Bundle에서 열출력이 너무 낮게 되므로 이를 보상하기 위해 5 w/o로 농축한 UCO 입자를 일부 섞어 장전하였다. 핵연료 입자를 최대로 장전시키기 위해서 변수 분석을 한 결과, Buffer의 두께가 30 μm, SiC Coating Layer의 두께가 20 μm인 Biso-Coating의 경우 Kernel의 반지름이 605 μm, 즉 핵연료 입자의 반지름이 655 μm인 경우 핵연료의 장전량이 최대가 되었다. 이 핵연료 입자를 사용하였을 때 하나의 소결체(울진 3/4호기 기준)에는 총 259개의 핵연료 입자가 장전될 수 있다. 그중 UCO 입자의 개수는 50개로 하고 ThO_2 입자의 개수는 209개로 해서 최대한 Fertile 물질의 양을 늘렸다.

4. 계산 방법

토륨이 들어간 핵연료에 대한 계산은 Library와 Decay-Chain Module의 부족으로 기존의 Lattice Code인 CASMO-3a나 WIMS/D등을 통한 결과는 신뢰도가 떨어지게 된다. 이에 본 연구에서는 HELIOS Code를 사용하였는데, HELIOS는 토륨이 고려된 Library와 Decay-Chain을 사용하므로 토륨이 들어간 핵연료의 연소계산에도 신뢰성과 계산의 정확성을 지닌다. 또한 HELIOS는 ENDF/VI를 기본으로한 190 Group Master Library와 190 Group Library에서 축약한 89 Group과 34 Group의 Library를 가지고 있다.[2] 사전연구에서 34 Group의 Library를 사용하더라도 정확성이 크게 떨어지지 않음을 확인하였으므로 본 연구에서는 계산시간의 단축을 위해 34 Group Library를 사용하였다.[3]

기하학적 모델은 그림 1과 같으며 Driver Bundle을 10번 재장전하는 동안 Blanket Bundle을 1

번 교체하면서 무한증배 계수의 변화와 U-233 생성량의 변화를 여러 가지 핵연료 농축도에 대하여 비교하였다.

5. 핵연료 종류와 농축도에 따른 핵설계 타당성 분석

Driver 핵연료로는 UO_2 핵연료와 U-10%Zr 금속핵연료를 사용하였다. 이 두 가지 핵연료의 농축도를 5 w/o, 10 w/o, 20 w/o로 증가시키면서 무한증배 계수의 변화와 Blanket Bundle내에서 U-233의 생성량 변화를 살펴보았다.

5 w/o로 농축한 UO_2 핵연료와 U-10%Zr 금속 핵연료를 사용하였을 경우에는 Driver를 계속 재장전 할수록 전체적인 무한증배 계수의 감소로 임계를 유지할 수 없었고, U-233의 생성량도 Saturation Level을 유지하지 못하고 감소했다. 이 경우 전환율이 매우 낮아서 Blanket에 중성자의 공급을 증가시켜야했다. 따라서 핵연료의 농축도를 10 w/o, 20 w/o로 증가시켜 계산하였다. 10 w/o, 20 w/o로 농축한 UO_2 핵연료와 U-10%Zr 금속 핵연료를 사용하였을 경우에는 Driver를 계속 재장전 할수록 전체적인 무한증배 계수의 감소는 있었으나 충분히 임계를 유지할 수 있었다. U-233의 생성량은 농축도가 증가함에 따라 평탄한 Saturation Level을 유지 할 수 있었고, U-233의 생성량이 지속적으로 유지되었다.(그림 2, 그림 3) 전환율(FIR, Overall Fission Inventory Ratio)은 주기말에서 핵연료의 양을 주기초의 핵연료의 양으로 나눈 값이다. 전환율은 표 1과 같이 농축도가 높아짐에 따라 증가되었고, UO_2 핵연료를 사용했을 때 보다 U-10%Zr 금속 핵연료를 사용했을 때의 전환율이 더 높았다.

6. 결론 및 향후과제

토륨 핵연료에 탄소피막 기술을 적용하여 고전환이 가능한 신형경수로를 설계하여 보았다. 핵연료의 종류와 농축도를 변화시켜가며 이 원자로의 핵설계 타당성을 조사하였고 이스라엘의 RTR(Radkowsky Thorium Reactor)과 비교할 때 전환율은 아직 우수하게 높지는 않지만 10 년의 Blanket 재장전 주기를 만족함으로서 핵설계 타당성이 있음을 확인하였다.[4] 따라서 전환율을 더욱 증가시키는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

그러나 토륨 핵연료의 사용으로 인해 우라늄 농축도를 20 w/o까지 올려야 하는 점은 경제적으로는 불합리하다. 가능한 농축도를 적게 올리고 전환율을 증가시킬 수 있는 방법, 예를 들어 Bundle의 격자 형태나 크기를 바꾸거나 Driver와 Blanket의 배열을 바꾸는 것에 대한 연구가 필요하다. Driver와 Blanket에서 약 2~3 배의 상대적인 열출력 차이로 인해 열수력학적 안전성이 결여되어 이를 해결하기 위한 방법이 고려 되야 할 것이다. 또는 이 열출력의 차이를 유지하면서 냉

각재가 같은 열수력학적 조건을 만족하도록 하는 방법 등이 고려 되야 할 것이다. 10년간 노내에 장전되는 Blanket Bundle의 재료적인 건전성에 대한 연구도 필요할 것이다.

참고 문헌

1. M.H.Kim, K.M.Bae, Y.J.Kim, "The Use of Carbon-Coated Particle Fuels in PWR Assemblies," *Trans.Am.Nucl.Soc.* 77, 396, (1997)

2. R.J.J.Stamm'ler, J.J.Casal, E.A.Villarino, HELIOS Method, SCANDPOWER A/S (1993)

3. 김명현, 임재용, 주형국, "토륨 핵연료의 핵적 타당성 연구," '97 추계학술발표회 논문집(I), 한국원자력학회, 171~176, (1997)

4. Alex Galperin, Ben-Gurion University of Negev, Private Communication, Sep. (1997)

표 1. 핵연료 농축도 변화에 따른 전환율의 변화.

Fuel	Enrich.	Cycle									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
UO_2 Fuel	5 w/o	0.6264	0.6326	0.6321	0.6303	0.6276	0.6243	0.6207	0.6167	0.6125	0.6081
	10 w/o	0.7293	0.7333	0.7332	0.7325	0.7315	0.7302	0.7287	0.7270	0.7252	0.7234
	20 w/o	0.8274	0.8290	0.8289	0.8286	0.8282	0.8277	0.8271	0.8265	0.8259	0.8252
U-10%Zr Fuel	5 w/o	0.6627	0.6667	0.6462	0.6632	0.6601	0.6566	0.6527	0.6486	0.6443	0.6398
	10 w/o	0.7543	0.7570	0.7565	0.7555	0.7543	0.7528	0.7519	0.7494	0.7476	0.7457
	20 w/o	0.8425	0.8436	0.8433	0.8429	0.8424	0.8418	0.8412	0.8406	0.8399	0.8392

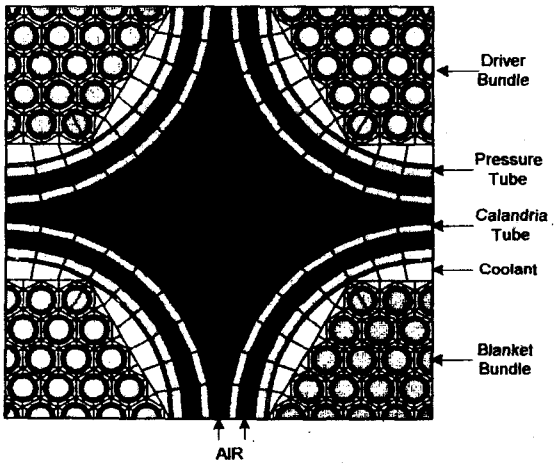

그림 1. HELIOS 기하학적 모델

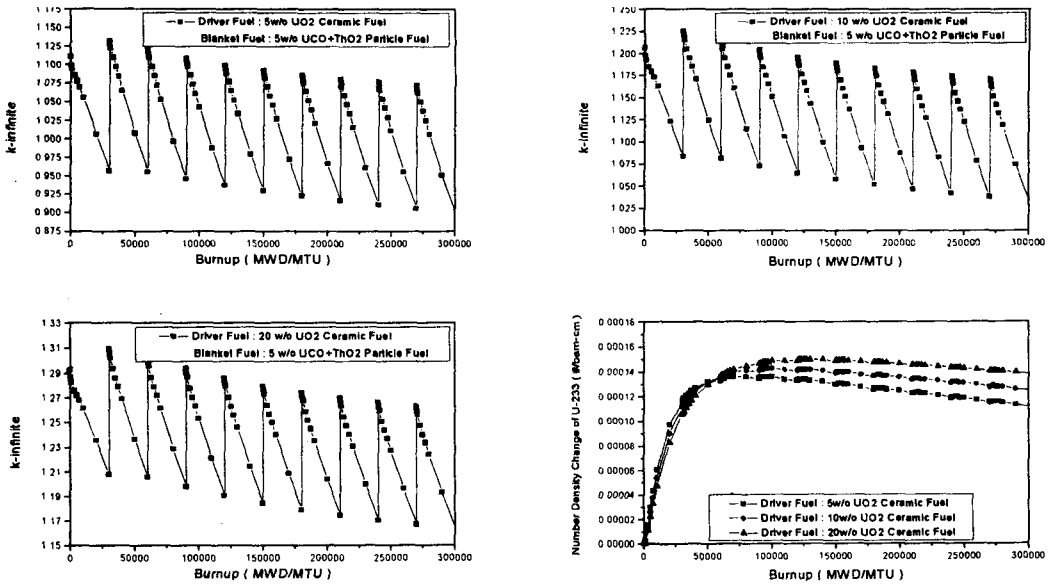

그림 2. UO_2 Ceramic Fuel의 농축도 변화에 따른 무한증배 계수 변화와 U-233 생성량 변화.

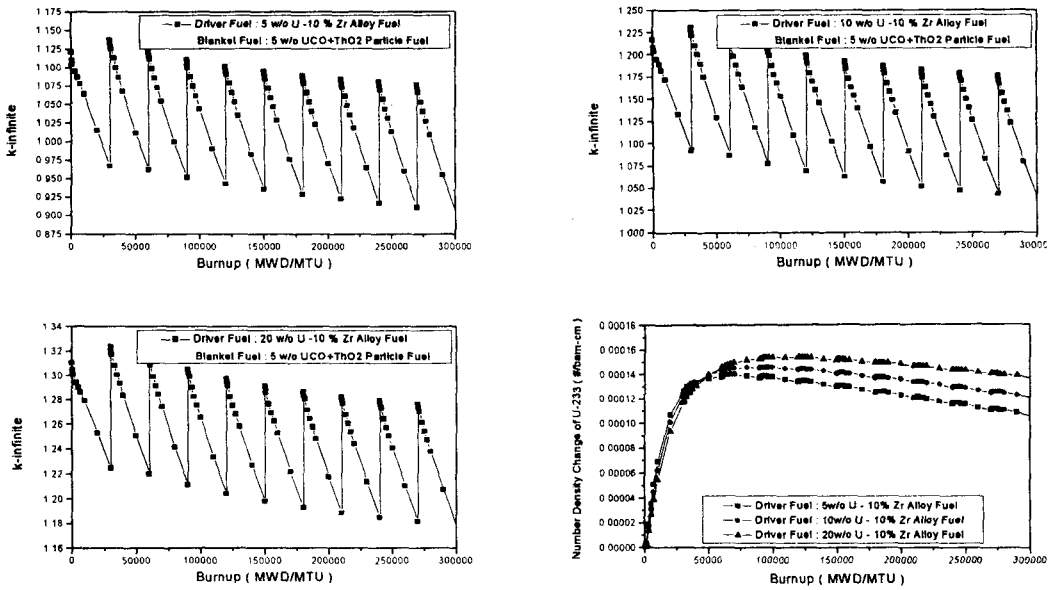

그림 3. U-10%Zr Alloy Fuel의 농축도 변화에 따른 무한증배 계수 변화와 U-233 생성량 변화.