

냉각제에 따른 150MWe급 TRU 연소로의 노심 핵특성 비교 분석 A Comparative Neutronic Analysis of 150MWe TRU Burner According to the Coolant Alteration

유재운, 김상지, 김영일

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

소형 TRU 연소로에서 냉각제를 소듐을 사용했을 때와 납-비스무스를 사용했을 때 노심의 핵특성과 연소능력을 비교 분석하였다. 납-비스무스 냉각제를 사용했을 때 경화된 중성자 스펙트럼의 영향으로 낮은 연소결손반응도를 보였고 냉각제기화계수는 음 또는 작은 양의 값을 보였다. 낮은 연소결손반응도와 높은 전화비로 인해 납-비스무스 냉각제를 사용할 때 MA의 소모비율은 높으나 전체 소모되는 TRU의 절대량은 소듐 냉각제에서보다 작게 나타났다. 그러나 납-비스무스를 냉각제로 사용하는 연소로가 냉각제기화계수에서 갖는 여유로 MA의 함량비를 조절하여 장전할 수 있었다. 따라서 MA 함량이 같은 경우에는 납-비스무스를 냉각제로 사용하는 것은 소듐 냉각제에서보다 TRU와 MA연소 측면에서 비효율적이지만 낮은 냉각제기화계수로 인해 MA의 함량을 탄력적으로 조절할 수 있는 잇점이 있기 때문에 MA만을 외부에서 공급할 경우 소듐 냉각제에서보다 낮은 냉각제기화계수를 유지하면서 대략 10배의 연소능력을 보였다.

Abstract

A comparative neutronic analysis has been conducted for the small TRU burner according to their coolant material. The use of Pb-Bi coolant gave a low burnup reactivity swing and negative or less positive coolant void coefficient with harder neutron spectrum. By a lower burnup reactivity swing and higher conversion ratio of Pb-Bi cooled core, the total amount of TRU consumption was found to be small compared with Na cooled core despite of the higher MA consumption ratio of Pb-Bi cooled core. However, Pb-Bi cooled reactor have a larger margin in the coolant void coefficient, so that a variable MA composition can be loaded in the core. Accordingly, even though the Pb-Bi cooled TRU burner has not effectiveness on TRU burning in the same geometry and material condition, a flexible MA loading is envisaged to result in 10 times larger MA burning amount, still preserving a low coolant void worth.

1. 서 론

원자력발전설비의 증가에 따른 사용후핵연료의 증가와 냉전중식으로 인해 해체되는 핵무기로부터 발생하는 플루토늄의 처리를 위한 TRU 연소로 설계가 국제적으로 다양하게 진행중이다. 액체 금속로는 열중성자로에서 보다 경화된 스펙트럼을 얻을 수 있기 때문에 연소로 설계의 주류를 이루고 있다. 액체금속을 냉각제로 사용하는 TRU 연소로 설계에서 주된 관건은 높은 연소결손반응도와 양의 냉각제 기화계수이다. TRU 연소로는 중성자 흡수에 의한 새로운 TRU의 생성을 막기 위해 블랑켓을 사용하지 않기 때문에 주기길이를 만족하기 위해서는 TRU의 농축도를 높여야 하며, 이로 인해 높은 연소결손반응도를 보인다. 또한 소듐을 냉각제로 사용하는 노심에서 냉각제가

기화되는 경우 양의 냉각재 기화계수를 보이게 되며 이것은 노심의 안전을 저해한다. 따라서 TRU 연소로 설계에서 냉각재기화계수를 음의 값 또는 작은 양의 값으로 유지하기 위하여 노심의 높이를 줄이거나 노심 중앙부위에 흡수체를 설치하는 방식들이 이루어져 왔다.[1]

납-비스무스 냉각재는 TRU 연소로에서 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 먼저 납과 비스무스는 원자질량이 소듐에 비해서 상당히 크기 때문에 중성자 충돌에 의한 에너지 손실이 적어 노심 내에서 경화된 중성자 스펙트럼을 보인다. Minor Actinide(MA) 핵종들이 높은 중성자 에너지 영역에서 높은 핵분열/흡수비(Fission to Capture Ratio)를 보이는 것을 감안할 때 이러한 납-비스무스 냉각재는 MA 연소 관점에서 큰 장점으로 작용하며, 경화된 중성자 스펙트럼으로 인해 낮은 연소결손반응도를 보인다. 납-비스무스 냉각재의 가장 큰 장점은 음 또는 작은 양의 냉각재기화계수를 보인다는 것이다. 납-비스무스는 냉각재 기화시 중성자 스펙트럼의 경화되는 효과가 작고, 중성자 산란 단면적이 크기 때문에 기화시 중성자 누출율이 상대적으로 커지게 된다.

납-비스무스는 소듐에 비하여 무겁기 때문에 좀 더 큰 펌프용량이 필요하며 열전도도와 비열이 작아 냉각재의 체적비를 증가시켜야 한다. 따라서 출력용량에 비하여 노심이 크기가 상대적으로 커지며 전체적인 무게도 커지게 된다. 이러한 이유 때문에 납-비스무스 냉각재는 대용량 노심보다는 중소형 노심에 적합한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 150MWe급 연소로에 소듐과 납-비스무스 냉각재를 사용할 때 노심의 핵특성 변화, 특히 노심의 연소결손반응도, 냉각재기화계수의 변화를 살펴보았다. 또한 각 냉각재를 사용하는 노심이 동일한 수준의 냉각재기화계수를 유지하는 상태에서 각 노심이 가지는 TRU 및 MA 연소능력을 비교하였다.

2. 계산 방법

노심의 출력분포 및 연소 계산은 현재 한국원자력연구소에서 액체금속로 계산에 사용하고 있는 K-CORE 시스템 중 핵 계산 모듈이 사용되었다. 단면적 라이브러리는 JEF2.2로부터 NJOY 코드의 처리과정을 거쳐 생산한 KAFAX-F22[2] 라이브러리를 사용하였다. KAFAX-F22라이브러리는 중성자 80군으로 구성되어 있으며 노심의 각 영역별 9군 유효 미시단면적을 생산하기 위하여 TRANSX[3] 코드와 TWODANT[4]코드가 사용되었다.

노심의 중성자속 분포 및 연소 계산은 DIF3D[5] 코드와 REBUS-3[6] 코드를 통해 이루어졌다. 이 코드들은 소격 격자 노달 방법 또는 유한차분법에 의해 노심계산을 수행한다. 연소 계산에서는 육각주(Hexagonal-Z)노드에 대한 소격격자 노달 방법이, 그리고 반응도 계수 계산에서는 삼각주(Triangular-Z)형태의 노드에 대한 유한차분법이 사용되었다.

연소 계산은 평형주기에 대해서 수행되었으며, 고정된 장전전략에 대해서 주기 초에 Inner 및 Outer Core에 장전되는 TRU 농축도를 계산하였다.

3. 150MWe급 TRU 연소로 노심 구성

냉각재에 따른 노심 핵특성 분석에 앞서 150MWe급의 TRU 연소로를 구성하였다. 표 1에 나타난 것과 같이 기본적인 핵연료집합체 제원 및 노심의 제원은 칼리머 우라늄노심[7]의 값을 참조하였다. 칼리머 우라늄노심에는 반경방향 블랑켓을 사용하고 있으나 연소로에서 블랑켓의 사용이 불필요하므로 반경방향 블랑켓을 제거하고 반경방향으로 두 개의 영역을 갖는 노심을 구성하였으며 그림 1에 반경방향 Layout을 나타내었다. 블랑켓을 제거하는 대신 늘어난 노심 영역을 감소시키고 냉각재기화계수에 대한 고려로 축방향 높이를 줄임으로써 팬 케이크형태의 노심으로 구성하였다.

표 2에 노심 높이에 따른 노심 핵특성 변화를 나타내었으며 Inner Core 및 Outer Core 영역의 TRU 농축도 탐색을 통해 최종적으로 소듐을 냉각재로 사용하는 TRU 연소로(Na Burner3)를 구

성하였다. 최종 구성된 노심은 축방향으로 50 cm의 높이를 갖고 있다. 연소결손반응도는 1962.6 pcm을 0.71719의 전환비를 보였다. 최대 선출력 밀도는 301.2 W/cm으로 설계제한값을 만족하고 있으며 한 주기동안 48.38 과 6.27 kg/cycle의 TRU 및 MA 연소능력을 가지고 있는 것으로 나타났다. 냉각재기화계수는 칼리머 증식특성노심 수준을 유지하도록 하였으며 모든 유효노심영역이 기화될 경우 평형주기초와 주기말에서 각각 1653.1 과 1747.2 pcm의 값을 보였다.

4. 납-비스무스 TRU 연소로의 핵특성 변화

최종적으로 설계된 TRU 연소로에서 노심의 구성 및 제원을 그대로 유지한 상태에서 냉각재만을 소듐에서 납-비스무스로 교체할 때 나타나는 노심 핵특성 변화를 살펴보았다. 경화된 중성자 스펙트럼으로 인해 연소결손반응도가 1806.9 pcm으로 감소하였으며 전환비가 0.76976로 증가하였다. 낮은 연소결손반응도로 인하여 노심에 장전되는 TRU 농축도가 Inner 와 Outer Core 영역에서 19.2 %와 25.6 %로 감소하였다. 연소로의 연소능력은 노심에 장전되는 TRU의 양에 의해 결정된다. 납-비스무스를 냉각재로 사용할 때 경화된 스펙트럼으로 인해 소멸되는 핵종의 비율은 크지만 낮은 연소결손반응도로 인해 노심에 장전되어야 할 TRU의 총량은 감소하기 때문에 실제 노심에서 소멸되는 TRU의 절대량은 작아지게 된다. 또한 높은 전환비로 인하여 U-238의 중성자 흡수에 의해 새롭게 생성되는 TRU의 핵종들이 역시 증가하기 때문에 실제로 감소하는 양은 작아진다. 결과에서 보듯이 납-비스무스를 냉각재로 사용했을 경우 MA의 소멸되는 비율은 3.29 %로 소듐에서보다 높지만 TRU가 소모되는 비율은 2.56 %로 작은 값을 보이게 된다. 또한 TRU가 장전되는 양이 작기 때문에 노심에서 소모되는 TRU와 MA의 총량은 39.5kg과 5.10kg으로 소듐 냉각재에서 보다 작은 값을 보였다.

유효노심영역 전체가 기화되는 경우 냉각재기화계수는 평형주기초에서 -4.7 pcm으로 음의 값을 보였으며 평형주기말에서 45.2 pcm으로 작은 양의 값을 보였다. 이것은 소듐 냉각재를 사용하는 연소로 결과와 비교되는 양이다.

TRU 핵연료에서 MA의 양은 연소결손반응도와 냉각재 기화계수에 영향을 준다. MA 핵종은 높은 에너지 영역에서 핵분열/흡수비가 다른 TRU핵종보다 높기 때문에 TRU내에서 MA 비율을 높일 경우 연소결손반응도는 작아지고 스펙트럼 경화효과가 커서 냉각재기화계수를 증가시킨다. 소듐을 냉각재로 사용하는 경우는 대부분 양의 냉각재기화계수를 보이므로 TRU에서 MA의 함량을 높이는 것이 큰 제약으로 작용한다. 그러나 납-비스무스를 냉각재로 사용할 때에는 냉각재기화계수에 여유가 있기 때문에 MA의 양을 TRU내에서 증가시키는 것이 가능하다.

표 3은 TRU내의 MA와 그 외 핵종의 조성비는 고정된 상태에서 External Feed로 공급되는 TRU내의 MA함량만을 조정하였을 때 나타나는 노심 핵특성 변화를 보여주고 있다. MA 함량이 증가함에 따라 연소결손반응도는 감소하였으며 냉각재기화계수는 증가하였다. 이때 장전되는 MA 함량이 증가됨으로 인해 TRU 및 MA 연소능력은 증가하는 모습을 보였으며 External Feed로 MA만 공급할 경우 TRU와 MA연소능력은 각각 53.09 와 51.01 kg/cycle로 나타났다. 즉, 소듐을 냉각재로 사용하는 경우에 비해 낮은 냉각재기화계수를 유지하면서 MA 연소량은 10배 증가시킬 수 있었다.

5. 결론

소형 TRU 연소로에서 냉각재를 소듐을 사용했을 때와 납-비스무스를 사용했을 때 노심의 핵특성과 연소능력을 비교분석하였다. 납-비스무스 냉각재를 사용했을 때 경화된 중성자 스펙트럼의 영향으로 낮은 연소결손반응도를 보였고 냉각재기화계수는 음 또는 작은 양의 값을 보였다. 낮은 연소결손반응도와 높은 전환비로 인해 납-비스무스 냉각재를 사용할 때 MA의 소모비율은 높으나 전체 소모되는 TRU의 절대량은 소듐 냉각재에서보다 작게 나타났다. 그러나 납-비스무스를 냉각

재로 사용하는 연소로에서 음의 냉각재기화계수를 보이는 것은 여전히 큰 장점이며, 이로 인해 MA의 함량비를 조절하여 장전할 수 있었다. 따라서 동일한 조건하에서 납-비스무스를 냉각재로 사용하는 것은 소듐 냉각재에서보다 TRU와 MA연소 측면에서 비효율적이지만 낮은 냉각재기화계수로 인해 MA의 함량을 탄력적으로 조절할 수 있는 잇점이 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제 중 “액체금속로 노심설계기술 개발” 과제의 일환으로 수행하였다.

참고문헌

1. S. J. Kim, et al., "A Pan-Shape Transuranic Burner Core with a Low Sodium Void Worth," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 27, p 435-448, April 2000
2. 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리생산 및 검증," KAERI/TR-842/97, KAERI (1997).
3. R. E. MacFarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (1993).
4. R. E. Alcouffe, et al., "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional Diffusion-Accelerated Neutron Transport," LA-10049-M, LANL (1990).
5. K. L. Derstine, "DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion theory Problems," ANL-82-64, ANL (1984).
6. B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, ANL (1983).
7. Y. I. Kim, et al., "Conceptual Design of KALIMER Uranium Metallic Fueled Core," KAERI/TR-1279/99, KAERI (1999).

표 1 TRU Reference Burner의 주요 설계 인자

Operating Condition	
Thermal Power (MWt)	392.2
Core Electric Power(MWe)	150
Number of Batch	3
Core Configuration	Radially Homogeneous
Number of Core Enrichment Zones	2(Inner/Outer)
Feed Fuel Composition	LWR Recycled
Refueling Interval (months)	12
Effective Full Power Day (EFPD)	379
Core and Assembly Design Parameters	
Core Diameter (cm)	344.73
Core Structural Material	HT9
Fuel Material	U-Pu-10Zr
Smear Density (%)	77
Duct Pitch (cm)	16.12
Duct Gap (cm)	0.4
Duct Wall Thickness (cm)	0.37
Pins per Fuel Assembly	271
Pin Outer Diameter (cm)	0.767
Upper Fission Gas Plenum Length (cm)	100

표 2 유효노심 높이 및 냉각재에 따른 연소로의 노심 핵특성 비교

Performance Parameters	Na Burner1	Na Burner2	Na Burner3	Pb-Bi Burner
Active Core Height (cm)	70	50	50	50
TRU Enrichment (Inner/Outer) (vol%)	18.70/18.70	24.86/24.86	22.23/29.64	19.2/25.6
Burnup Reactivity Swing (pcm)	1101.7	2484.3	1962.6	1806.9
Conversion Ratio over Cycle	0.89180	0.74398	0.71719	0.76979
Maximum Power Density over Cycle (W/cm ³)	344.7	449.6	362.8	364.6
Peak Linear Power Density (W/cm)	286.2	373.3	301.2	302.7
Power Peaking Factor				
BOEC	1.968	1.841	1.486	1.490
EOEC	1.924	1.763	1.452	1.452
Average Discharge Burnup (MWD/kg)	36.71	51.41	51.46	51.52
Peak Discharge Burnup	69.38	90.33	70.89	71.11
Peak Discharge Fast Fluence (x10 ²³ n/cm ²)	2.16	2.47	1.82	2.19
TRU External Feed (kg)	19.86	44.44	48.84	39.84
MA External Feed (kg)	2.19	4.90	5.38	4.39
TRU Consumption Rate (kg/cycle)	19.51	44.04	48.38	39.50
MA Consumption Rate (kg/cycle)	3.11	5.70	6.27	5.10
Percent TRU Consumption (%/cycle)	1.10	2.65	2.71	2.56
Percent MA Consumption (%/cycle)	2.26	3.17	3.08	3.29
Coolant Void Reactivity (Inner + Outer) (pcm)				
BOEC	2129.3	1583.4	1653.1	-4.7
EOEC	2200.3	1705.2	1747.2	45.2

표 3 MA 농축도 변화에 따른 노심 핵특성 비교

Performance Parameters	15MA Burner	20MA Burner	55MA Burner	100MA Burner
Minor Actinide Fraction (%)	15	20	55	100
TRU Enrichment (Inner/Outer) (vol%)	19.35/25.8	19.5/26	21.6/28.8	25.2/33.6
Burnup Reactivity Swing (pcm)	1750.4	1681.2	1118.2	248.1
Conversion Ratio over Cycle	0.77494	0.78145	0.84509	1.00160
Maximum Power Density over Cycle (W/cm ³)	364.6	364.7	365.1	375.8
Peak Linear Power Density (W/cm)	302.8	302.8	303.2	312.0
Power Peaking Factor				
BOEC	1.490	1.491	1.491	1.519
EOEC	1.452	1.453	1.458	1.534
Average Discharge Burnup (MWD/kg)	51.53	51.53	51.59	51.67
Peak Discharge Burnup	71.06	70.99	70.39	76.43
Peak Discharge Fast Fluence (x10 ²³ n/cm ²)	2.20	2.21	2.30	2.47
TRU External Feed (kg)	40.35	40.99	46.24	54.93
MA External Feed (kg)	6.07	8.14	25.58	54.93
TRU Consumption Rate (kg/cycle)	39.97	40.56	45.40	53.39
MA Consumption Rate (kg/cycle)	6.63	8.51	24.36	51.01
Percent TRU Consumption (%/cycle)	2.57	2.57	2.61	2.62
Percent MA Consumption (%/cycle)	3.75	4.19	5.63	6.05
Coolant Void Reactivity (Inner + Outer) (pcm)				
BOEC	22.9	56.8	340.4	805.6
EOEC	69.2	98.7	344.2	743.2

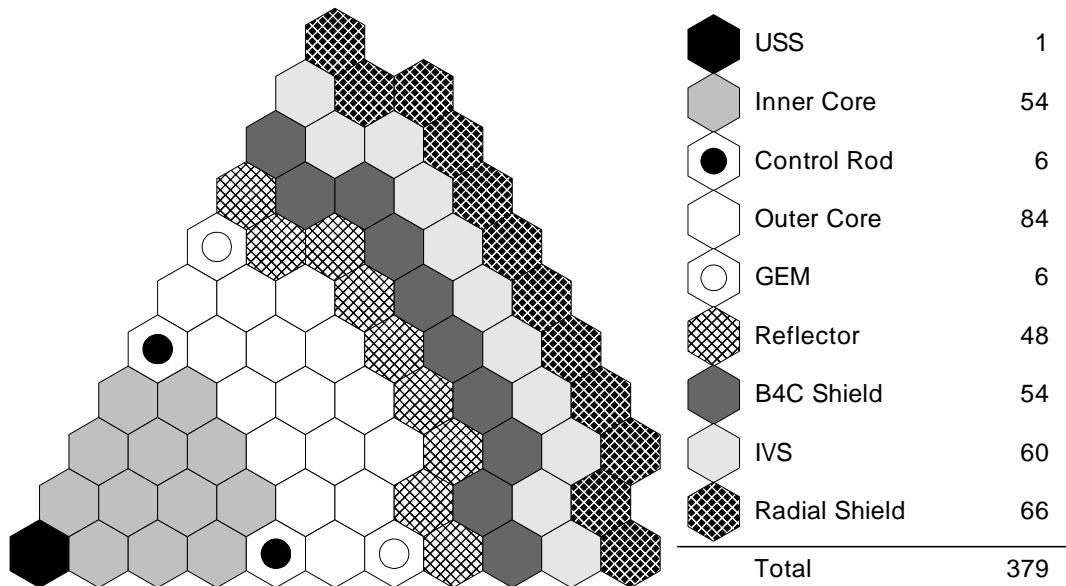


그림 1 150MWe급 TRU Burner 참조 노심의 반경방향 Layout