

가연성독봉에 의한 차세대원자로 무봉산노심의 잉여반응도 제어

김종경, 김순영, 이종찬
한양대학교

권태제
한국원전연료(주)

요약

기존 가압형 경수로에서 전체 반응도가의 상당부분을 제어하고 있는 봉산수를 사용하지 않고 노심 잉여반응도를 보상하기 위해 1300MWe급 차세대원자로(KNGR)를 대상으로 무봉산노심 반응도 제어기법 연구를 수행하였다. 다양한 종류의 가연성독봉에 대한 무봉산노심 적용가능성을 분석하고 새로운 개념의 Enriched WABA를 도입하였다. Enriched WABA는 전 주기동안 무봉산노심에 적합한 반응도 제어능력을 나타내었고, 18개월 주기의 무봉산 차세대원자로 개념설계에 효과적으로 사용되었다. 핵연료집합체 균정수 생산 및 노심해석에는 Westinghouse사의 APA(ALPHA/PHOENIX-P/ANC) 전산코드체계를 사용하였고, 본 연구로부터 한단계 높은 안전성을 제공하는 무봉산운전은 충분한 가능성이 있다고 판단된다.

1. 서론

현재 가동중인 가압형 경수로의 노심반응도 제어는 봉산수가 주 기능을 담당하고 있다. 그러나, 봉산수의 사용은 가압형 경수로의 설계, 운전 및 보수에 있어 다음과 같은 많은 단점들을 지니고 있다.

- 1차 냉각수로부터 봉산수의 농도를 감시하고 조절하는 계통의 복잡성
- 빈번한 봉산수 농도조절로 인해 발생하는 액체폐기물
- MTC를 양(positive)의 값으로 만들기 때문에 갖는 불리한 안전성 확보
- 봉산수로 인한 부품들의 부식 문제 등

이와 같이, 봉산수의 사용은 보다 안전하며 출력제어가 쉬운 신형로의 개발에 장애가 되고 있는 바, 가압형 경수로 설계에 있어 봉산수를 가능한 제거하려는 필요성이 대두되었다. 기존의 가압형 경수로에서는 전체 노심반응도가의 70% 이상을 봉산수가 제어하고 있기 때문에, 무봉산 운전을 달성하기 위해서는 봉산수가 담당하고 있는 기능들을 대체할 방법들이 고안되어야 하고, 이를 위하여 본 연구에서는 기존 가압형 경수로 기술에 바탕을 둔 새로운 노심관리개념에 대한 연구가 1300MWe급 차세대 원자로(Korean Next Generation Reactor, KNGR)를 대상으로 수행되었다.

2. 전산코드 체계 및 검증계산

2.1 APA(ALPHA/PHOENIX-P/ANC) 전산코드 체계

본 연구 수행에는, Westinghouse사에서 개발한 APA 전산코드 체계가 사용되었다. APA 코드체계는 균정수 생산용 코드와 노심설계코드간의 연계가 매우 편리하고, Westinghouse형 노심 뿐만 아니라 CE형 노심계

산을 위한 특별한 입력자료를 제공하는 장점을 가지고 있기때문에 한국원전원료주식회사 노심설계실을 계속적으로 방문하여 연구를 수행하였다.

· ALPHA(Automatic Linkage between PHOENIX-p and ANC)^[1]

ALPHA는 반응단면적 생산코드인 PHOENIX-P모델을 생산해주고 3차원 Nodal코드인 ANC의 핵단면적 자료를 자동으로 편집해주는 연계 코드이다.

· PHOENIX-P^[2]

PHOENIX-P는 ENDF/B-V파일로부터 도출된 42군 미시단면적 자료를 사용하여 ANC에서 필요한 2군 단위 집합체 반응단면적을 계산하여 주는 2차원 다군 수송이론 코드이다.

· ANC(Advanced Nodal Code)^[3]

ANC는 Nodal Expansion Method를 사용하여 다양한 연소 모델과, 궤환 모델을 통해 노심반응도, 중성자속 분포, 출력 분포 등과 같은 노심 특성을 계산하는 3차원 노달 코드이다.

2.2 검증계산

APA 전산코드체계의 검증계산을 수행하기 위해 차세대원자로 1주기 노심을 선정하였다. 차세대 원자로 1300MWe급 개량형 가압경수로로서 ABB-CE사의 System 80+를 참조 발전소로 하여 현재 한국원자력연구소에서 개발중이며, 18개월 주기와 15% 운전여유도 확보를 기본 설계요건으로 하고 있다. 그리고, 핵연료 집합체와 핵연료에 대한 설계 인자는 기본적으로 영광 3·4호기 자료에 기반을 두고 있다. 검증계산을 위해 먼저 ALPHA코드 및 PHOENIX-P코드를 통해 PSEUDO집합체와 Baffle/Reflector영역에 대한 단면적 자료를 생산하였으며, 이를 바탕으로 차세대원전 1주기 1/4노심에 대해 연소도에 따른 임계 보론 농도와 주기초, 주기중, 그리고 주기말에서의 평면 출력 분포를 ANC를 통하여 계산한 후 한국원자력연구소에서 수행한 MASTER 및 ROCS 코드계산 결과와 비교하였다. 임계보론농도는 약 3,000MWD/MTU에서 약간의 차이를 보일 뿐 비교적 만족할 만한 결과를 얻었으며, 평면 출력 분포에서는 MASTER와 ROCS결과에 대해 각각 상대오차 0.735%, 2.441%이내의 정확한 결과를 보였다.

3. 무봉산노심에 적합한 가연성독봉 분석

3.1 차세대원자로의 핵연료집합체 설계변형

무봉산노심은 잉여반응도 제어를 위해 가연성독봉과 제어봉을 사용한다. 제어봉의 과다 사용은 축방향 출력분포를 심하게 변형시키므로, 노심 전주기동안 연료연소로 인한 반응도 보상에 가급적 제어봉 사용을 억제하는 전략^[4]이 필요하고, 이를 위하여 무봉산노심에 적합한 가연성독봉의 핵적특성을 분석하는 작업은 매우 중요할 뿐 아니라, 가장 먼저 수행되어야 할 작업이다. 본 연구에서는, APA 전산코드체계의 검증대상으로 사용한 1300MWe급 차세대 원자로에 무봉산 노심설계 개념을 적용하여 그 가능성 연구를 수행하였다. 차세대 원자로의 기본설계사양은 대부분 그대로 유지하였으나, 가연성독봉의 종류 및 갯수의 선택에 있어 자유도(degree of freedom)를 높이려는 목적으로 전형적인 ABB-CE사의 안내관(guide thimble) 크기를 Westinghouse사의 작은 안내관으로 대체하였다. 변형된 16×16 핵연료집합체 형태를 그림 1에 나타내었고, 안내관 및 계측관(instrumentation thimble)의 특성은 표 1에 나타내었다.

3.2 다양한 가연성독봉의 핵특성 분석

무봉산노심에 적합한 가연성독봉은 제어봉의 사용억제를 위해, 목표로하는 노심 전 주기동안 상당히 낮은

잉여반응도를 유지해야만 하므로, 본 연구에서는 다양한 종류의 가연성독봉들을 검토하고 무봉산노심내에서의 핵특성을 분석하였다. 사용되어진 가연성독봉들에 대한 특징 및 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

· WABA(Wet Annular Burnable Absorber)

새롭게 변형된 16×16 핵연료집합체의 안내관에 16개와 20개의 WABA를 장전하였고, 장전위치는 Westinghouse사의 16×16 핵연료집합체 표준배치를 사용하였다. 무봉산노심에서 가연성독봉의 반응도 억제(reactivity holddown)능력은 매우 커야하기 때문에 4개, 8개, 12개의 WABA 장전모형은 본 계산에서 제외되었다. WABA의 경우, 비록 주기초의 잉여반응도가 높기는 하지만, 핵연료집합체의 농축도가 증가할수록 주기초 연소도에 따른 무한증배계수의 변화량이 적으면서 전 주기동안 평평한(flat) 분포를 얻을 수 있었다.

· Enriched WABA

WABA가 비교적 무봉산노심에 적합하다는 판단아래, 주기초의 잉여반응도를 낮추려는 목적으로 WABA에 사용되는 B₄C의 B¹⁰ 양을 2배(0.012g/cm) 및 3배(0.018g/cm)로 각각 농축시켜 계산을 재 수행하였다. 예상대로 B¹⁰의 농축도가 증가함에 따라 주기초의 잉여반응도는 줄어들어, 연료연소로 인한 반응도제어만의 측면에서 볼 때 기존의 WABA보다 무봉산노심에 더 적합함을 알 수 있었다. 그러나, WABA는 안내관에 장전되기 때문에 모든 핵연료집합체에 사용하게 되면 제어봉의 사용이 불가능해지는 단점이 있으므로 Checkerboard형태의 제어봉 배열을 갖는 노심에 국한될 가능성이 높다고 할 수 있다.

· IFBA(Integral Fuel Burnable Absorber)

IFBA는 상기의 WABA와는 달리 핵연료봉에 얇게 가연성독물질(ZrB₂)을 코팅(coating)해서 사용하므로 안내관의 공간을 차지하지 않아 제어봉의 장전위치에 대한 제약이 없다는 장점을 가지고 있다. IFBA의 장전위치 또한 Westinghouse사의 표준배치를 사용하였고, 32, 48, 64, 80, 92, 116, 148개로 개수를 증가시키면서 무한증배계수를 계산하였다. IFBA는 주기초의 잉여반응도를 낮추는데는 상당히 효과적이거나, 그 연소율이 매우 빨라 장주기를 목표로 하는 노심에는 독자적인 사용이 어려울 것으로 판단된다.

· Gadolinia(Gd₂O₃) Admixed with Fuel

IFBA와 마찬가지로 Gadolinia 가연성독봉은 제어봉 장전위치에 대한 제약이 없고, 핵연료와 섞여 사용되므로 우라늄 효율도 증가시킬수 있는 장점을 가지고 있다. 반면 Gadolinia가 핵연료봉에 첨가됨으로써, 혼합된 UO₂는 순수한 UO₂에 비해 낮은 열전도성과 용점을 가지게 된다^[5]. 따라서, 본 연구에서는 Gadolinia 가연성독봉의 농축도를 최대 8w/o로 제한을 두고 차세대 원자로에서 사용된 6w/o와, Gadolinia 농축도에 따른 변화를 살펴보기 위한 4w/o 및 8w/o 농축도를 선정하여 무한증배계수를 계산하였다. Gadolinia 가연성독봉의 장전위치는 가급적 대칭이 되도록 그림 2와 같이 선정하였다. Gadolinia의 주기초 반응도 억제능력은, 독봉의 개수가 증가할수록 높아지고 농축도에는 거의 무관한 결과를 나타내었다. 그러나, 무봉산노심에 적합하기 위해서는 매우 높은 농축도의 가연성독봉이 필요하다고 판단된다.

· Erbia(Er₂O₃) Admixed with Fuel

계산에 사용된 Erbium 가연성독봉의 농축도 및 장전위치는 Gadolinia 가연성독봉의 경우와 똑같이 선정하여 계산을 수행하였다. Gadolinia 독봉과 비교하여 볼때 특징으로는, 연소도에 따른 무한증배계수의 변화량이 적다는 점을 들 수 있다. 그러나, 본 연구에서 고려하고 있는 평평한 무한증배계수의 분포를 얻기 위해서는, 핵연료집합체의 농축도가 증가할수록 보다 많은 가연성독봉의 갯수와 보다 높은 농축도가 필요하다고 판단된다.

3.3 차세대원자로 무봉산노심의 잉여반응도 제어

연료연소로 인한 반응도 보상에 제어봉의 사용을 가급적 줄이고 가연성독봉을 확대 사용하는 전략측면에

서, 전체 반응도 중 제어봉이 담당하는 부분은 1.5%를 넘지않는 범위로 제한을 두었다. 본 연구에서는 가연성독봉에 의한 노심 잉여반응도 제어 관점에 주안점을 두었기 때문에 제어봉 관련 연구는 수행되지 않았고, 다양한 가연성독봉들 중 기반연구를 통하여 무봉산 운전에 효과적이라 판단되는 가연성독봉을 사용하여 노심 잉여반응도 계산을 수행하였다. 18개월주기 달성과 다량의 가연성독봉을 사용하기 때문에 핵연료집합체의 농축도를 2.4, 3.0, 3.6w/o로 높였다. 제어봉 삽입 위치에 대한 제약을 없애기 위해 Enriched WABA를 핵연료봉 위치에 핵연료봉 대신 삽입하였고, 장전위치는 Gadolinia 가연성독봉과 같다. 또한, 축방향 출력분포가 하단부로 치우치는 현상을 제어하기 위해, 반복적인 노심계산결과 중 가장 효과적이라 판단되는 가연성독봉의 축방향 zoning을 그림 3과 같이 사용하였고, 노심계산에 사용된 핵연료집합체 장전모형은 그림 4에 나타나 있다. 그림 5에는 연소도에 따른 노심 잉여반응도 결과를, 그리고 그림 6과 그림 7에는 $F_{\Delta H}$ 및 AO 값의 변화를 도시하였다.

노심계산결과, Enriched WABA만으로 1.5% 이내의 잉여반응도 유지가 가능하면서 18개월 주기길이를 만족함을 볼 수 있었다. $F_{\Delta H}$ 와 AO값이 기존 봉산수를 사용하는 원자력에 비해 큰 값을 나타내는 것은 앞으로 해결해야 할 과제로 여겨진다. 그러나, 본 연구의 전반적인 결과로부터, 연료연소로 인한 노심 반응도 제어를 봉산수대신 가연성독봉으로 대체하는 작업은 충분히 가능하리라 판단되며, 노심을 무봉산운전에 보다 적합한 형태(예, 팬 케이크 형태)로 설계하면 불안정한 축방향 출력분포 문제를 해결하는데 보다 효과적일 것이라 여겨진다.

4. 결론

기존 가압형 경수로에서 전체 반응도가의 상당부분을 제어하고 있는 봉산수를 사용하지 않고 노심 잉여반응도를 보상하기 위해 다양한 종류의 가연성독봉에 대한 무봉산노심의 핵특성을 분석하고 이를 차세대 원자력에 적용하였다. 무봉산노심에는 보다 높은 농축도의 가연성독봉이 적합하다는 결과를 얻어내었고, 이를 토대로 도입한 Enriched WABA는 본 연구의 18개월 주기, 1300MWe급 차세대 원자로 무봉산노심의 개념설계에 적용되어 무봉산운전에 대한 가능성을 높히는데 효과적으로 사용되었다.

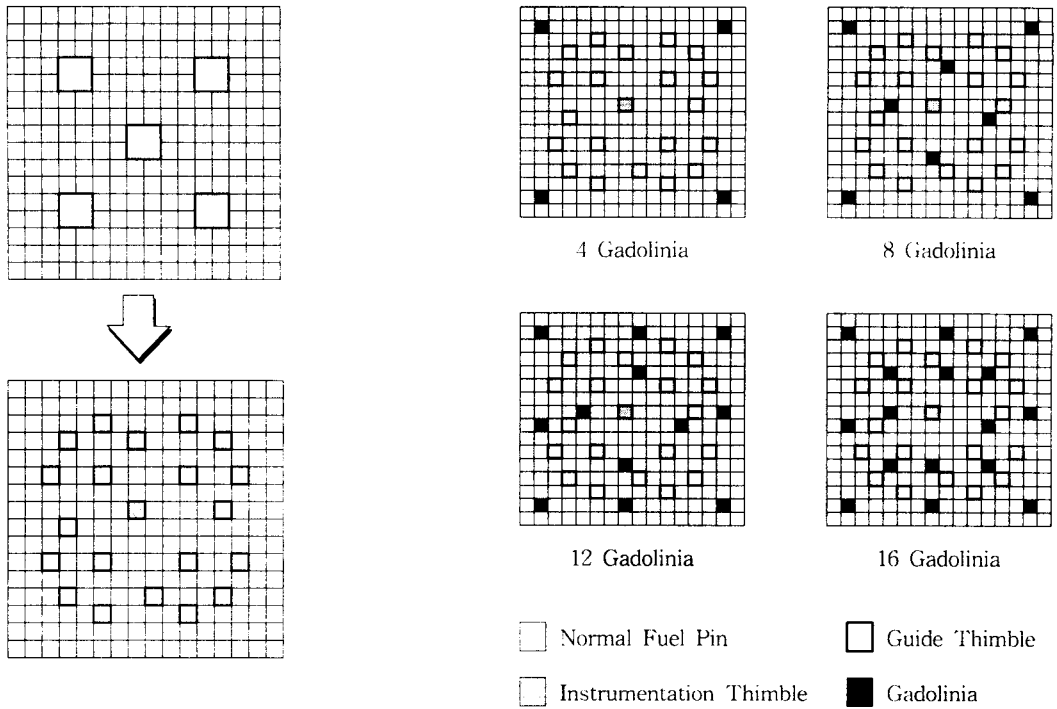
본 연구로부터, 한단계 높은 안전성을 제공하는 무봉산 운전은 충분한 가능성을 가지고 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] Westinghouse, "ALPHA 8.0.1 User Manual, "September 26, 1995.
- [2] Westinghouse, "PHOENIX-P 8.0.2 User Manual, "October 6, 1995.
- [3] Westinghouse, "ANC 8.0.3 User Manual, "April 22, 1996.
- [4] 기초전력공학공동연구소, "무봉산운전을 위한 운전방식의 개선연구," KAERI/CM -148/94, July 1
- [5] CEND-397, "Use of Godolinium in PWR Extended Burnup Fuel Cycles," DE-ACO2- 80ET34074, May 1982.

Acknowledgement

본 연구는 한국과학기술원 신형원자로연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.



4 Gadolinia

8 Gadolinia

12 Gadolinia

16 Gadolinia

□ Normal Fuel Pin □ Guide Thimble
 □ Instrumentation Thimble ■ Gadolinia

□ Normal Fuel Pin □ Guide Thimble
 ■ Instrumentation Thimble

그림 2. Gadolinia 가연성독봉 장전모형

그림 1. 차세대원자로 핵연료집합체 설계변형

Guide Thimble Material		ZIRC-4
Guide Thimble O.D.(in.)	Above Dashpot	0.482
	At Dashpot	0.430
Guide Thimble Thickness(in.)	Above Dashpot	0.016
	At Dashpot	0.0165
Instrumentation Thimble Material		ZIRC-4
Instrumentation Thimble I.D.(in.)		0.45
Instrumentation Thimble Thickness(in.)		0.016

표 1. 안내관 및 계측관의 설계특성

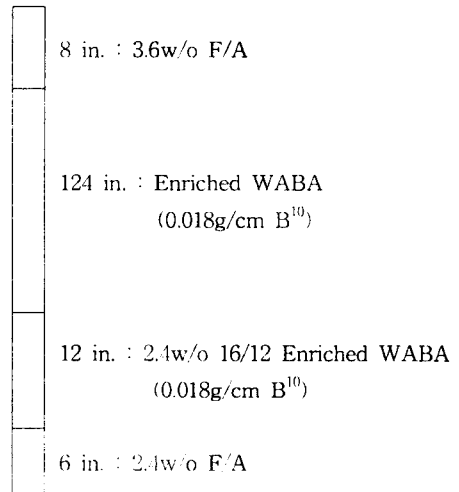


그림 3. Burnable Poison Axial Zoning

B1	A2	B2	A1	B2	A2	C3	B2	C1
A2	B1	A2	B2	A2	C3	B2	A2	C1
B2	A2	B1	A2	C3	B2	C3	B1	C1
A1	B2	A2	C3	B2	A1	B2	A1	C
B2	A2	C3	B2	A1	B2	A1	C2	
A2	C3	B2	A1	B2	A1	C3	B	
C3	B2	C3	B2	A1	C3	B		
B2	A2	B1	A1	C2	B			
C1	C1	C1	C					

A1 : 2.4w/o 8 Enriched WABA
 A2 : 2.4w/o 12 Enriched WABA
 B : 3.0w/o No Enriched WABA
 B1 : 3.0w/o 12 Enriched WABA
 B2 : 3.0w/o 16 Enriched WABA
 C : 3.6w/o No Enriched WABA
 C1 : 3.6w/o 8 Enriched WABA
 C2 : 3.6w/o 12 Enriched WABA
 C3 : 3.6w/o 16 Enriched WABA

그림 4. 차세대 원자로 1주기 무봉산노심의 장전모형

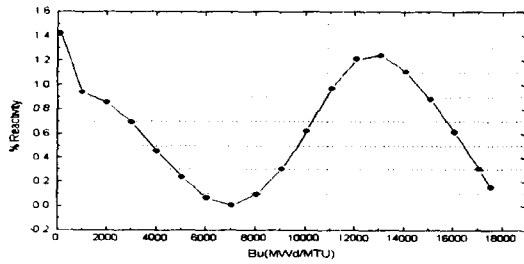


그림 5. 연소도에 따른 노심 잉여반응도 변화

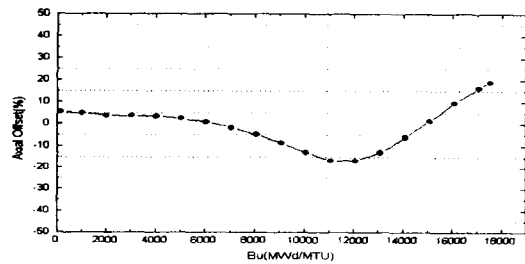


그림 6. 연소도에 따른 AO 변화

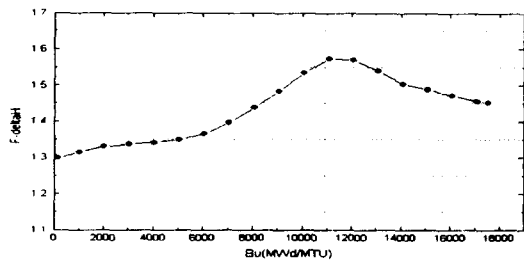


그림 7. 연소도에 따른 F-deltaH 변화