

상업용 가압경수로의 무붕산 운전 가능성 연구

김 종채, 김 명현

경희대학교

이 은철

서울대학교

요 약

600MWe급 상업용 가압경수로의 무붕산운전 가능성을 핵설계 측면에서 검토하였다. 기본 원자로 핵연료 형태는 AP600 기준으로 무붕산 노심이 가능하도록 핵연료 농축도, BP 재질/갯수/위치/농도, 제어봉의 재질/ 위치/갯수등의 설계 변수등을 변화시켰다. 핵연료 농축도는 1.95w/o, 2.9w/o, 3.5w/o를 사용하였으며, BP의 갯수는 8개에서 24개까지 사용하였으며, 재질은 Gd_2O_3 , 농도는 축방향 출력분포를 평탄화 시키기 위하여 10w/o-14w/o를 사용하였다. 제어봉 설계에서 재질은 경제적이며, 제어봉가가 큰 B₄C를 사용하였으며, 반응도 제어에는 weak 제어봉을 사용하여 출력분포에 대한 영향을 최소화 하도록 설계하였다. 또한 출력분포제어에는 독립적으로 작동되는 고반응도가의 제어봉을 설정하여 노심 상부에서 동작하게 함으로써 반응도에 미치는 영향이 적도록 설계하였다. 설계 결과 아직 안전성 확보 여부에 대한 연구가 수행되지 않은 상태이나 주기초에서 주기말까지 잉여반응도를 1% 미만으로 유지하고, 축방향 BP zoning이 이루어지면 현재의 상업용 원자로에도 무붕산 운전이 가능할 것으로 판단된다. 또한 주기초 A.O.가 -14%, 제어봉의 삽입과 인출에 따른 국부 침투치가 2.16으로 나타나 안전성 확보에도 큰 어려움은 없을 것으로 생각된다.

1. 서 론

최근 자원의 이용을 극대화 시키며, 경제성을 향상시키고, 안전성을 획기적으로 증진 시킬 수 있는 신형원자로에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 아울러 붕산을 사용하지 않고 제어봉만으로 반응도를 제어하는 무붕산 원자로에 대한 가능성도 검토되고 있다. 무붕산 운전은 액체 방사선 폐기물 발생량을 줄이고, CVCS를 제거하여 발전시설을 간단하게 할 뿐만 아니라 음의 감속재 온도계수를 크게

하여 안전성을 증진시키는 장점을 가지고 있다. 따라서 잠수함이나 선박용 원자로, 소형원자로등의 적용가능성에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔었다. 그러나 무봉산 노심은 잉여반응도를 가연성 독봉과 제어봉만으로 상쇄해야 하므로 노심내 출력분포를 심하게 변화시키고 안전한계를 위반할 가능성이 높아 상업용 원자로에서는 설계와 운전이 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 주기길이, 안전도 확보 여부, 운전의 용이성 유지 여부등에 주안점을 두고 제어수단으로 봉산을 사용하지 않고 제어봉만으로 반응도를 제어하는 600MWe급 상업용 가압경수로의 무봉산 운전 가능성을 검토하고자 한다.

2 설계 전제 조건 및 설계 목표

본 연구에서는 현재의 CRDM의 설치 가능한계내에서 반응도 제어수단으로 제어봉을 이용한 600MWe급 가압경수로 노심의 무봉산 운전 가능성을 검토하고자 한다. 따라서 실현가능하고 상용화된 원자로의 핵적 설계 기술을 최대로 이용하는 것을 전제조건으로 하였으며, 기본 원자로형은 부하추종운전이 가능하며, 저출력 밀도, 저누설 장전모형등 신형원자로의 특성을 가지고 있는 AP600 노심을 바탕으로 설계하였다. 즉, S/G, RCP, Pzr등 2차계통과 열수력 특성은 AP600과 동일하며, 2차계통이 노심내 핵적특성에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 또한 1차계통의 열수력 특성과 Guide tube의 모양과 배치, pitch등을 포함한 핵연료 집합체 모양은 AP600과 동일하다고 가정하였다. 그러므로 핵연료 농축도, BP의 재질/갯수/위치/농도, 제어봉의 재질/위치/갯수등의 설계 변화만을 이용하여 600MWe급 가압경수로 노심의 무봉산 운전 가능성을 검토하였다.

핵적 설계 목표는 무봉산 운전이 가능하고 주기길이는 18개월로 설정하였다. 주기길이를 24개월로 설정할 경우 주기초 잉여반응도가 너무 높아 제어봉에 의한 반응도 제어에 큰 부담이 예상되기 때문이다. 또한 부하추종운전이 가능하도록 목표하였고, 강철봉을 배치하는 반사집합체를 채택하는 등 AP600 설계 특성을 그대로 활용하였다..

3. 무봉산 노심 설계 방법

3.1 분석 코드 시스템

3.1.1 CASMO-3/NECTA-C 전산체계

신형원자로의 다양한 설계 조건을 수용하며, 자유로운 제어봉 구동이 가능하고 안전변수 한계의 위반 여부 확인등 본 연구를 수행하기 위하여 새로운 CASMO-3/NECTA-C 전산체계를 마련하였다. CASMO-3에서 생산된 등가단면적을 바탕으로 3차원 노심 분석 계산을 수행하는 NECTA-C 코드의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

NECTA-C (Nodal Expansion Core Transient Analysis - Cartesian geometry)는 중성자 확산방정식과 그에 따른 지발중성자 선행방정식을 기본으로 하고 Nodal Expansion Method(NEM)를 적용한

Coarse Mesh Finite Differential Method(CMFDM)을 수치해법으로 사용하여 계산을 수행한다. 그리고 노심의 정특성 해석 뿐만 아니라 quasi-static 분석이나 kinetic 분석 등의 동특성 해석까지도 수행할 수 있는 코드이다. NECTA-C에서 사용되는 거시적 2군 반응단면적은 균질화된 노드의 함수로서 연소도, 제어봉, 화학적 독물질, Xe이나 Sm등의 핵분열 생성물, 열교환 효과 등에 종속되어 변화된다. 또한 노심의 경계 조건은 내부경계조건과 외부경계조건, 그리고 축방향으로 상단 경계 조건과 하단 경계조건을 주어 횡방향과 축방향으로 자유롭게 노심을 가정하여 계산을 수행할 수 있는 3차원 노심 분석용 코드이다. 반응도 변환모델은 보론농도, 감속재 온도, 냉각재 밀도, 핵연료 온도 등의 변환 효과가 선형적으로 변한다고 가정하는 선형 반응도 변환 모델을 사용한다.

3.1.2 CASMO-3/NECTA-C 검증계산

새로운 CASMO-3/NECTA-C 전산체계를 검증하기 위하여 Westinghouse가 EPRI 설계 요건에 따라 설계한 전기출력 600MWe급 피동형 원자로인 AP600의 노심 분석을 수행하였다. AP600 노심이 기존 원자로 노심에 비해 특히 다른 점인 저출력 밀도, 장주기 운전, 고가 및 저가제어봉이 결합된 제어봉 체계, Stainless Steel 반사체 사용등의 특성이 CASMO-3/NECTA-C 전산체계를 검증하는데 적합한 검증 대상으로 판단되기 때문이다.

노심분석시 특이한 사항은 반사체부분의 단면적 생산이다. 반사집합체에 대한 제원을 Westinghouse가 밝히지 않아 확실히 알 수는 없었으나, Stainless Steel과 경수가 차지하는 부피비를 0.8 : 0.2로 가정하고 이를 균질화 시켜 CASMO-3를 이용하여 반사체 단면적 계산을 수행하였다. 검증계산은 주기초 보론농도 요구조건, 평면출력분포, 임계보론농도, 주기초 개별제어봉가 등에 대하여 수행되었으며, 표준 안전성 분석 보고서의 분석 결과와 '94년도에 원자력 연구소에서 수행된 CASMO-3/MEDIUM체계의 분석 결과⁽¹⁾등과 비교하여 비교적 만족할 만한 결과를 얻었다. 표1과 표2는 AP600 제어봉가와 수용성 보론농도 요구조건에 대한 CASMO-3/NECTA-C 전산체계의 검증 결과를 나타내고 있다. 또한 그림1은 AP600의 임계 보론 농도 결과를 나타내고 있는데 SSAR 결과에는 여전히 미치지 못하나 CASMO/MEDIUM 분석 결과보다는 약 500MWD/MTU 정도 크게 나타나고 있다.

3.2 핵설계 방법

3.2.1 정특성 분석

집합체별 농축도는 방출시 산존량과 배치간 농축도차 0.5 - 0.7w/o를 고려하여 CASMO-3를 이용하여 결정하였으며, 이를 바탕으로 BP의 갯수와 농도에 대한 민감도 분석을 수행한 후 잉여반응도를 1% 미만으로 유지시킬 수 있는 BP의 갯수 및 농도를 결정하였다. 현재 국내에서 독물질로는 분리형인 WABA와 일체형인 Gd₂O₃가 널리 사용되고 있다. 그러나 WABA는 제어봉이 삽입될 thimble cell에 위치하는 단점이 있어 본 연구에서는 독물질 Gd₂O₃를 사용하였다. 일체형 독봉은 CE 설계 형태를 기본으로 하였으나, bottom 부분의 19.05cm는 독물질과 농축우라늄이 섞여 있는 것으로 설계하였다. 또한

무봉산 운전시 큰 MTC에 의한 축방향 출력분포의 찌그러짐을 막고 A.O.를 안전 한계내로 유지시키기 위하여 축방향으로 독물질 농도를 10w/o와 14w/o로 zoning하여 계산을 수행하였다. 그림2는 핵연료 집합체별 무한증배계수를 나타내고 있으며, 그림3과 그림4, 그림5는 NECTA-C 계산에 사용된 장전모형, 잉여반응도, A. O.를 각각 나타내고 있다.

3.2.2 반응도 제어용 제어봉 설계

무봉산 운전에서 가장 중요한 설계 변수는 잉여반응도 제어와 축방향 출력분포를 안전한계내에 유지시키는 것이다. 본 연구에서는 그림6에서 보여지는 것같이 두개의 제어봉군을 기능적으로 분리함으로써 효율적으로 반응도 및 출력분포를 제어할 수 있도록 설계하였다. 잉여반응도 제어용 제어봉으로는 W-Bank(Weak Bank)를 사용하였으며, 축방향 출력분포에 대한 영향이 축방향 출력분포 제어용에 비해 영향이 적으면서 노심내에서 깊숙히 삽입되어 자유롭게 움직일 수 있도록 설계 하였다. 출력분포 제어용으로는 AO-Bank(Axial Offset Bank)를 사용하였다. AO-Bank는 W-Bank와는 독립적으로 작동되며, 큰 제어봉가를 가지고 노심 상부에서 동작하게 함으로써 W-Bank의 부족한 제어봉가를 보상하면서 축방향 출력분포를 조절할 수 있도록 설계하였다. 주기초 제논 과도상태 분석을 수행한 결과 W-Bank는 94%, AO-bank는 5% 삽입된 상태에서 임계를 유지시킬 수 있었으며, 이때의 A.O.는 -14%를 나타냈다. A.O.가 다소 크게 나타났으나 제어봉 위치와 축방향 BP zoning에 대한 최적화 작업을 수행하면 충분히 안전한계내로 유지 시킬 수 있을 것이다. 그리고 고가제어봉이 삽입됨에 따라 국부 출력 첨두치가 2.16으로 크게 나타났으나, HFP 조건에서의 설계 제한치 2.6을 고려하면 아직 여유가 있는 것으로 판단된다. 제어봉 물질은 shutdown margin이나 부하추종운전에 필요한 반응도가를 위하여 Ag-In-Cd나 Hafnium보다 방사선 측면에서는 단점을 가지고 있지만 경제적이며 제어봉가가 큰 B₄C를 사용하였다.

4. 결 과

CASMO-3/NECTA-C 전산체계를 이용하여 600MWe급 상업용 가압경수로의 무봉산운전 가능성을 검토하였다. 기본 원자로 형태는 AP600을 바탕으로 설계하였으며, 핵연료 농축도, BP 재질/갯수/위치/농도, 제어봉의 재질/위치/갯수등의 설계변수등을 변화시켰다. 핵연료 농축도는 1.95w/o, 2.9w/o, 3.5w/o를 사용하였다. 그리고 BP의 갯수는 8개에서 24개까지 사용하였으며, 10w/o-14w/o Gd₂O₃를 사용하였다. 제어봉 설계에서 재질은 경제적이며, 제어봉가가 큰 B₄C를 사용하였으며, 잉여반응도 제어용의 W-Bank와 출력분포제어용에는 고반응도가의 AO-Bank 제어봉 체계로 나누어 설계 하였다.

주기초 제논 과도상태 분석을 수행한 결과 W-Bank는 94%, AO-Bank는 5% 삽입된 상태에서 임계를 유지시킬 수 있었으며, 이때의 A.O.는 -14%를 나타냈다. 그리고 제어봉의 삽입과 인출에

따른 국부 침투치가 2.16으로 나타났으나, 전출력 조건에서의 설계 제한치 2.6을 고려하면 아직 여유가 있는 것으로 판단된다 따라서 핵설계 측면에서 살펴보면, 아직 안전성 확보 여부에 대한 연구가 수행되지 않은 상태이나 주기초에서 주기말까지 잉여반응도를 1% 미만으로 유지하고, 축방향 출력분포를 평탄화 시키기 위한 축방향 BP zoning이나 constant Tavg control mode에 대한 연구가 이루어지면 현재의 상업용 원자로에도 무봉산 운전이 가능하며, 안전성 확보에도 큰 어려움은 없을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

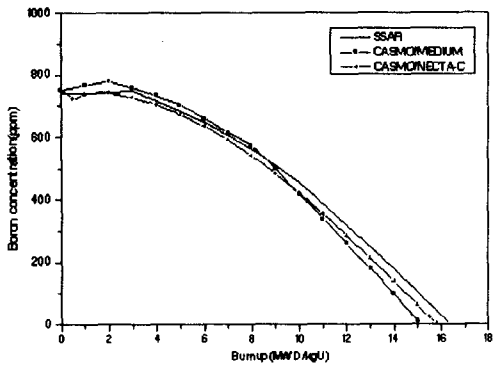
1. "고유용량 AP600 원자로 노심의 핵적 특성 분석,"RN1-703-006 Rev.00, 한국원자력연구소, 1994
2. "원자력발전소 부하추종운전 기술개발,"KAERI/RR-901/90, 한국원자력연구소, 1990.
3. "가연성 독봉 사용방법 최적화 연구,"KRC-92N-104, 한전기술연구원, 1993.
4. 최 유선, "소형 동력로의 핵적 개념 설계,"경희대학교, 1995.
5. ABB-CE, "Elimination of Soluble Boron for a New PWR Design,"EPRI Project RP-2614-24, Final Report, 1989.
6. "Load Following Capability of KWU Nuclear Power Plants with PWR,"KWU, 1986.

표1. AP600 주기초, 영출력에서 개별 제어집합체군의 제어봉가(pcm)

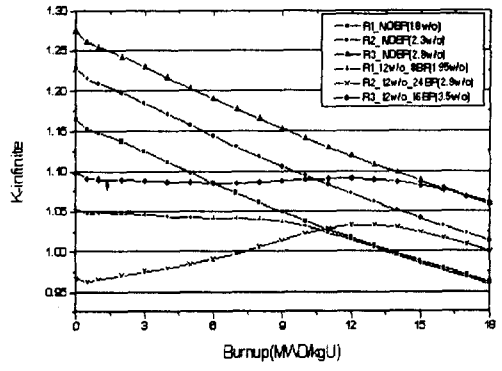
군	SSAR	CASMO/MEDIUM	CASMO/NECTA-C
M0	509	536	481
M1	602	607	557
M2	835	773	847
M3	1141	836	1089
AO	1875	1748	1913

표2. AP600 수용성 보론농도 요구조건(ppm)

	전출력, No. Xe. ARO	전출력, Eq. Xe. ARO
SSAR	1020	742
CASMO/MEDIUM	1090	751
CASMO/NECTA-C	1028	755



[그림 1] AP600 임계 보론 농도 곡선

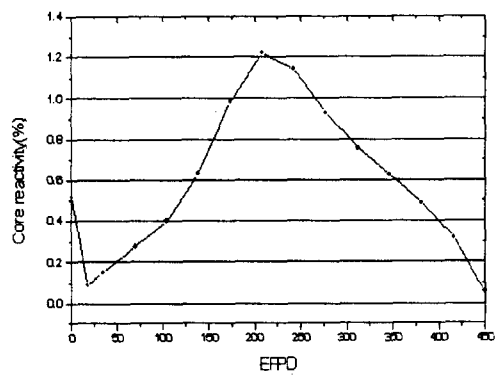


[그림 2] 핵연료 집합체별 무한증배계수

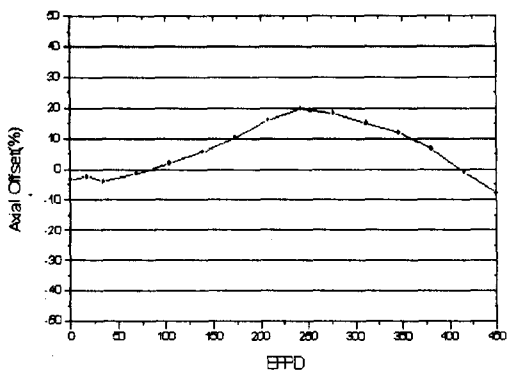
R1	R2	R1	R2	R1	R2	R3
R2	R1	R2	R1	R2	R1	R3
R1	R2	R1	R2	R1	R2	R3
R2	R1	R2	R1	R2	R3	R3
R1	R2	R1	R2	R3	R3	
R2	R1	R2	R3	R3		
R3	R3	R3	R3			

R1 : 1.95w/o, BP #8-12w/o
 R2 : 2.9w/o, BP #24-12w/o
 R3 : 3.5w/o, BP #16-12w/o

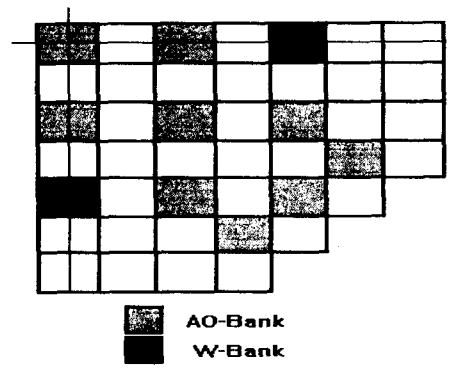
[그림 3] 핵연료집합체 노심내 장전모형



[그림 4] Core Reactivity vs. Burnup



[그림 5] Axial Offset vs. Burnup



AO-Bank
 W-Bank

[그림 6] 노심내 제어봉 위치