



KR0101263

KAERI/TR-1785/2001

제어봉반응도 특성 파라메타 분석체제 수립

Establishment of Analysis Procedure for Control Rod

Reactivity Worth

2001. 3.

한국원자력연구소

32 / 48

## 제출문

한국원자력연구소장 귀하

이 보고서를 원자력연구개발 중, 장기계획사업 과제인 "노심설계 기술개발" 과제의 연구내용 2000년도 기술보고서로 제출합니다.

제목: 제어봉반응도 특성 파라메타 분석체제 수립

Establishment of Analysis Procedure for Control Rod Reactivity Worth

2001년 3월

주저자 : 송훈

공저자: 김영일

김상지

김영인

## 요약

고속로에서 일반적으로 사용되고 있는 육각형 집합체 형태의 제어봉 반응도가 계산방법에 대하여 3차원 확산이론계산을 기본으로 하여 제어봉시스템을 포함한 제어봉 반응도가 계산방법 및 계산방법 적용에 따른 문제점, 계산 정도, 계산모델링 개선 등에 대하여 살펴보고, 현재 K-CORE System 내 구비되어있는 유효단면적 생산체제 TRANSX/TWODANT와 중성자속계산체제인 확산이론계산코드 DIF-3D를 사용하여 계산방법 적용에 따른 결과 비교.분석을 통하여 계산방법의 적용성을 평가하고, 기본계산방법을 설정하고 현재 K-CORE System 적용에서의 문제점 및 향후 개선사항 등을 도출하였다. 액체금속로 노심핵계산체제 K-CORE System에 적용 가능한 몇 가지 아이템에 대하여 계산을 수행한 결과, 제어봉 간 상호효과에서는 인접한 2개의 제어봉인 경우 7.0% 적게 나타났으며 6개 제어봉에 대하여서는 5.9% 크게 나타났다. 제어봉 특성곡선의 계산인 경우 제어봉 삽입위치에 따라서 제어봉 변화량에 큰 차이를 보이고 있으며 노심중심에서 최대 4.2(cent/cm)의 반응도 삽입효과를 보이고 있다. 슈퍼셀을 이용한 비균질 계산에서는 균질모델과 비교하여 비균질모델이 8% 정도 제어봉 효과를 감소시키는 것으로 나타났다.

## Abstract

As to the calculation method of control rod reactivity relating to hexagonal assembly, which are used generally in fast reactor, we have investigated the calculation method, the problems to rise during calculation, the degrees of calculation and the enhancement of calculation modeling so on, and estimated the application of calculation method through comparison and analysis of calculation result using the effective cross section generation system, TRANSX/TWODANT, and neutron flux calculation system, diffusion theory code DIF-3D, which are belonged to K-CORE System, and determined the basic calculation method, and extracted the present calculation problem in case of application in K-CORE System and the future improvement items so on. The K-CORE system calculation results show that the interaction between the adjacent rods reduces the reactivity worths by about 7%. On the other hand, two clusters (consisting of 6 rods) interact as to increase the reactivity worths of the rods by about 6.0%. In case of control rod characteristics curve, the large variation of control rod worths is observed according to the position of control insertion and the insertion effect of control rod is shown the maximum value to be 4.2 (cent/cm) at the core center. In case of the heterogeneity effect of control rod, the super cell calculation shows that the heterogenous model is estimated to reduce the control worths by about 8% compared to the homogenous model.

## 차례

제출문	i
요약	ii
요약(영문)	iii
그림목차	v
표목차	vi
1. 서론	1
2. 계산방법	4
2.1 일반적인 계산방법	4
2.2 노심계산에서의 기하학적 모델링	5
2.3 제어봉의 균질화	7
2.4 제어봉 채널에 대한 유효확산계수	9
2.5 제어봉 반응도가 계산값에서의 유한차분메쉬 효과	10
2.6 에너지 군수 효과	11
2.7 확산이론계산에서의 근사방법	11
2.8 기하학적 모델링 근사	12
2.9 제어봉 반응도가 계산의 정도	13
2.10 계산방법에 대한 실험적 검증	15
2.11 제어봉 상호효과	16
2.12 제어봉 특성곡선	16
3. K-CORE 시스템에 적용	18
3.1 Breakeven 노심	18

3.2 계산절차	19
4. 계산결과	25
4.1 제어봉 상호효과	25
4.2 제어봉 특성곡선	25
4.3 슈퍼셀을 이용한 비균질 계산	26
5. 결론	28
참고문헌	29

## 그림목차

그림 1. Breakeven 노심 배치도 -----	30
그림 2. 노심핵설계 계산절차-----	31
그림 3. Breakeven 노심 (RZ 모델)-----	32
그림 4. 비균질 계산모델 -----	33
그림 5. 제어봉의 삽입위치에 따른 위치별 반응도가 -----	34
그림 6. 제어봉 반응도가 특성곡선-----	35
그림 7. 슈퍼셀 계산에 의한 중성자 분포 -----	36

## 표목차

표 1. 노심설계 제원 및 가동 조건	37
표 2. 구동핵연료 제원	39
표 3. 블랑켓 연료 제원	40
표 4. 반사체 제원	41
표 5. B <sub>4</sub> C 차폐체 제원	42
표 6. 반경방향 차폐체 제원	43
표 7. 제어봉 제원	44
표 8. 체적분율	45
표 9. 영역별 원자수 밀도(cold 조건)	49
표 10. 영역별 원자수 밀도(hot 조건)	50
표 11. 균구조	51
표 12. 노심물질 영역에서의 원자수 밀도	52
표 13. 제어봉 상호효과	53
표 14. 제어봉 비균질 효과(BOEC)	54
표 15. 제어봉 비균질 효과(EOEC)	54



## 1. 서론

고속로 설계에서 제어봉은 정상운전시 출력 준위를 조정하고, 핵연료 연소에 따른 반응도가 감소 및 노정지(shutdown) 상태에서 전출력으로의 출력준위 변화에 따른 반응도 감소를 보상하고, 전출력 운전에서 노정지로의 전환에 따른 반응도 증가 등을 낮추는 역할을 한다. 이에는 우연적 혹은 우발적 상황 발생시 원자로 출력 감소 혹은 정지 보장을 위하여 음의 반응도 삽입의 안전 기능을 포함한다. 일반적으로 제어봉은 그 기능면에서 조정봉(regulating rod)과 노정지(안전)봉(shutdown rod)으로 구분되어진다. 조정봉은 정상운전시 노심 내 출력준위와 반응도를 조정하며, 노정지봉은 통상 정상운전시에는 노심 밖에 위치하며 과도현상 발생시 신속하고 안전하게 원자로를 정지하도록 하는 기능을 갖는다. 통상 고속로 설계에서는 이 두 가지 기능의 제어봉들을 조합, 연계하여 다양한 운용계획을 수립한다.

일반적으로 제어봉은 노심을 구성하는 집합체들과 기하학적으로 그 크기나 모양이 동일하도록 설계된다. 안내관(guide-tube) 내에서 움직이도록 설계된 육각형의 스테인레스강 wrapper 관에 중성자 흡수가 매우 큰 물질로 만들어진 핀들의 다발이 장전되어 있는 구조이다. 일반적으로 중성자 흡수재로는 탄화 붕소(boron carbide)가 사용되며, 이의 대체물질로서 europia, 탄탈륨(Ta), europium boride 등이 있다. 제어봉은 방사선 조사에 의한 팽윤(swelling) 및 휨 현상을 수용하고 진동 현상이 발생하지 않도록 설계한다. 또한, 탄화붕소의 경우, 감마가열 및 붕소의  $(n, \alpha)$  반응에 의한 개스생성물의 운동에너지의 집적에 의한 생성열에 대한 냉각을 고려하여야 한다. Super-Phenix의 안전제어봉 설계에서는 중성자 흡수 부분을 절골봉(articulated rod) 형태로 설계하여 지진 발생 등으로 변형된 안내관에서도 안전하게 제어봉이 삽입하여 노정지가 이루어지도록 하고 있다.

제어봉이 보상하여야 하는 반응도가 항목들로는 연소결손반응도가 및 이의 부

정확도, 온도결손반응도가(운전상태에서 핵연료재장전 상태로의 변환) 및 이의 부정확도, 임계도 예측 부정확도, 핵분열성 물질의 농축도 부정확도, 노정지 여유도 등이 있다. 제어봉 필요반응도가는 일반적으로 노심 핵특성 분석과 상기 반응도가 항목들에 대한 부정확도 크기 평가를 기초로 하여 평가된다. 상기와 같이 제어봉 반응도가와 제어봉 필요반응도가를 예측하기 위한 정도는 경제성을 고려하여 결정되어야 한다. 주어진 부정확도를 수용하기 위해서는 여분의 제어봉을 설치하거나 제어봉 성능을 향상시켜야 한다. 그러나, 이러한 방안들은 모두 큰 비용이 소요되므로, 결과적으로 필요반응도가와 제어봉 성능 예측에 대한 정도를 높여야 한다. 여분의 제어봉 설치에 제어봉 구동장치와 원자로 크기 증가에 따른 부담 증가를 가져오며, 붕소 농축도 증가 등을 통한 제어봉 성능 향상은 제어봉의 제작비용 증가 및 수명 단축을 초래한다.

제어봉 삽입에 따른 노심출력분포 예측도 또한 중요하다. 제어봉 반응도가는 제어봉 follower 반응도가의 상대적인 값으로 주어지므로, 제어봉 follower 반응도도 정확히 예측하여야 한다.

영출력 임계시설(zero power criticality facility)을 이용한 여러 실험계획들에서 제어봉 반응도가 측정실험들이 수행되었다. 이러한 측정실험들에서는 증성자 흡수영역내의 반응을 분포와 다양한 구조의 제어봉을 가진 노심에서의 핵분열을 분포가 함께 측정되어졌다. 이러한 측정실험 결과들은 상기의 필요조건들을 만족하는 계산 정도를 가지는가에 대한 계산방법의 검증자료를 제공하여 준다.

일반적으로 제어봉 반응도가 계산절차는 제어봉을 위시한 주위 노심구성물질에 대한 자세한 구조를 모사하는 쉘 계산 및 적절히 균질화된 단면적을 사용한 전 노심 계산으로 크게 구분된다. 제어봉이 보상하여야 하는 반응도가 항목들로는 연소결손반응도가 등 여러 가지가 있다. 주어진 부정확도를 수용하기 위해서는 여분의 제어봉을 설치하거나 제어봉의 성능을 향상시켜야 한다.

본 보고서에서는 고속로에서 일반적으로 사용되고 있는 육각형 집합체 형태의

제어봉 반응도가 계산방법에 대하여 기술현황을 분석하고, 이들 계산방법의 액체금속로 노심핵계산체제 K-CORE System에의 적용가능성을 파악하고, 문제점 및 개선사항 등을 도출하였다.

제어봉 반응도가 계산에 대한 기술현황 분석에서는, 3차원 확산이론계산을 기본으로 하여 제어봉시스템을 포함한 제어봉 반응도가 계산방법 및 계산방법 적용에 따른 문제점, 계산 정도, 계산모델링 개선 등에 대하여 살펴보았다. 현재 K-CORE System 내 구비되어있는 유효단면적 생산체제 TRANSX/TWODANT와 중성자속계산체제인 확산이론계산코드 DIF-3D를 사용하여 계산방법 적용에 따른 결과 비교. 분석을 통하여 계산방법의 적용성을 평가하고, 기본계산방법을 설정하고 현재 K-CORE System 적용에서의 문제점 및 향후 개선사항 등을 도출하였다.

## 2. 계산방법

### 2.1 일반적인 계산방법

일반적으로 제어봉 반응도가 계산절차는 1) 제어봉을 위시한 주위 노심구성물질에 대한 자세한 구조를 모사하는 쉘 계산 및 2) 적절히 균질화된 단면적을 사용한 전노심 계산으로 크게 구분된다.

셸이나 부영역에 대한 계산은 제어봉을 포함한 주위의 연료집합체와 같은 노심구성물질에 대하여 자세히 그 구조가 모사 되어진 쉘모델이나 슈퍼셸모델(supercell)을 대상으로 수행한다. 이 계산에서는 육각형 격자구조의 제어봉 및 연료 집합체에 대한 균질화 단면적세트를 구한다. 구하여진 균질단면적세트를 사용하여 전노심 계산을 수행한다. 전노심 계산은 일반적으로 유한차분메쉬(FDM; finite difference mesh)를 사용한 3차원 확산이론계산이다. 최근에는 이러한 FDM방법을 사용한 확산이론계산의 문제점을 줄여주는 근사방법들이 개발되어 실제 일반계산코드에 적용되고 있다. 최근에는 육각형 집합체를 한 개의 노드로 취급하여 노달근사방법이 개발되었으며, 이 방법에서는 FDM 적용에 따른 메쉬크기효과 등이 매우 작다. 이외에도 보다 정확한 전노심 계산방법으로는  $P_N$ 수송이론계산, 확산합성수송이론(diffusion synthetic transport theory)계산 등이 있다.

한편, 소듐 냉각재는 밀도가 낮은 물질로서, 확산계수가  $D = 1/3 \Sigma_{tr}$ 로 정의되어지는 전형적인 확산이론계산에서는 제어봉 follower 채널과 같이 낮은 밀도의 영역에 대하여 중성자 수송효과를 과대 예측한다. 따라서, 확산이론계산에서는 제어봉 인출로 소듐으로만 채워지는 제어봉 follower 채널을 정확히 취급하기 위하여 여러 근사계산방법들이 제안되었다. 상세한 제어봉 내 반응분포 계산은 제어봉 구조를 자세히 모델링하는 중성자속 계산과 전노심 중성자속 계산 결과를 이용하여 구한

다.

몬테카를로(Monte Carlo) 계산방법을 사용하면 전노심에 대한 상세계산이 가능하다. 그러나, 원하는 계산 정도(accuracy)를 얻기 위해서는 많은 계산 시간 및 비용이 소요되는 반면에, 확산이론근사계산을 사용하는 경우 보다 저렴한 비용으로 수용가능 계산 정도를 얻을 수 있기 때문에, 아직까지도 일반적인 노심계산에서는 사용하지 않고 있다. 현재, 이 계산방법은 계산 결과에 대한 검증연구에 사용되고 있으며, 앞으로 전산기 성능 향상에 따라 노심계산 표준방법으로서 그 사용 범위가 증대되리라고 예상된다.

실제로 원자로 운용시에는 핵연료관리 및 출력준위 변동을 위하여 제어봉 삽입 위치를 변화시켜야 하며, 이러한 제어봉 삽입 위치 변화에 따른 출력분포에의 영향, 제어봉 간의 연계효과(interaction effect) 변화 등을 예측하는 근사계산방법으로서 증성자 합성법(flux synthesis method), 영향인자법(influence factor method) 등이 제안되었다.

제어봉 반응도가 계산방법으로서 확산이론계산방법을 기본으로 하는 경우에는 대상노심 모델 및 제어봉 설계에 대하여 확산이론 적용에 따른 근사 오차, 에너지 균축약 및 유한메쉬 크기에 대한 효과 등에 대한 조사가 필요하다. 현재 제어봉 반응도와 증성자 흡수율 예측에 대한 목표 정도는  $\pm 5\%$ (1 표준편차)이다. 따라서, 적용계산방법에 대한 검증작업을 통하여 계산 정도를 확인하고 그 적용가능성을 타진하여야 하며, 또한 적용계산방법에 대한 계산정도 향상을 도모하여야 한다.

## 2.2 노심계산에서의 기하학적 모델링

고속로 노심계산에서는 일반적으로 육각형 집합체에 대하여 균질단면적을 사용하여 노심계산을 수행한다. 그러나, 도플러효과와 소듐 void 반응도를 정확히 계

산하기 위해서는 집합체의 wrapper관과 핵연료핀의 구조에 따른 비균질효과를 고려하여 셀 평균 단면적을 구하여야 한다. 일반 설계에서는 제어봉을 포함한 이들 구조를 육각형 격자셀에 대하여 균질화하여 육각형 집합체에 대한 균질단면적을 구한 다음, 이를 이용하여 3차원 노심계산을 수행한다.

이러한 노심계산에서는 다음과 같은 기하학적 모델들이 사용된다.

- 1) 육각형 집합체가 1개의 노드(메쉬)로 대표하는 육각주(hex-z) 모델
- 2) 육각형 집합체가 6개 또는 24, 96 개 등의 작은 삼각형으로 대표하는 삼각주(tri-z) 모델,
- 3) 육각형 집합체의 위치와 면적이 동일한 직사각형으로 대표하는 xyz 모델. 이 모델은 1 개의 육각형 집합체를 4 개의 직사각형으로 나눈다. 이 직사각형은 x, y 방향으로 한변의 길이가 격자 피치의 1/2인 정사각형이며, z 방향은 피치의  $(\sqrt{3}/2)$ 를 한 변으로 한다. 이러한 직사각형 모델은 필요에 따라 더 세분화하기도 한다.

제어봉 반응도가 계산에 필요한 균축약 단면적은 전노심 및 슈퍼셀(supercell)에 대한 RZ 모델을 사용하여 구한다. RZ 전노심 모델에서 노심중앙에 위치하는 제어봉의 경우에는 동일한 단면적의 영역으로 대표할 수 있다. 그러나, 노심중심이 아닌 곳에 위치하는 제어봉들의 경우에는, 이들을 포함하는 띠모양의 영역에 대하여 주위의 노심물질들과 균질화를 통하여 단면적을 적절하게 구하여야 한다. 이러한 균질화 과정에는 슈퍼셀모델을 사용하기도 한다. 이 슈퍼셀모델에서는 제어봉 주위의 노심 집합체의 체적비에 비례하여 제어봉 주위영역을 모델링한다. 이 RZ 모델계산은 2차원 평면계산에 필요한 축방향 buckling 값을 구하는데 사용하기도 한다. 균질계산은 등가 흡수량이나 등가 축방향 buckling을 구하여 이를 축방향 중성자 누출로 대체하는 1차원 원통형 모델계산을 수행하기도 한다. 좀더 자세한 균질계산에서는 핀다발 구조에 대한 충돌확률 계산코드를 사용하여 편별로 반응률을 계산하여 균질단면적을 구한다. 몬테카를로 계산은 노심 내에서의 제어봉 구조에 대하여 자

세한 모델링이 가능하며, 이 때문에 근사계산방법에 대한 검증작업에 사용한다.

### 2.3 제어봉의 균질화

일반적으로 노심계산에서는 제어봉 단면적을 제어봉을 포함하는 격자셀에 대한 체적평균으로 단순히 구하여 균질화한다. 그러나, 좀더 자세한 균질화 방법으로 노심영역 물질로 둘러싸인 제어봉 구성을 자세히 기술하는 슈퍼셀모델 계산을 수행한다. 이 슈퍼셀은 제어봉 영역(내부: 흡수재, 외부: 소듐이나 스테인레스강)과 이를 둘러싸고 있는 노심물질영역의 2개 영역으로 구성되며, 전반사 경계조건(white boundary condition)을 사용한다.

이외의 또 다른 균질화 방법으로는 중성자속 제어봉 영역에 대한 반응단면적을 (중성자속  $\times$  체적) 방법으로 평균화하여 구하며, 수송단면적은 (중성자류(neutron current)  $\times$  체적) 방법으로 평균화하는 방법이다. 이 방법은 단순한 체적 평균법에 비하여 개선된 것이나, 제어봉의 평균적인 중성자특성을 정확히 재생산해 내지 못하는 단점이 있다. 일반적으로 전노심 계산에서 제어봉 영역의 모든 특성을 재생산해내지는 못한다. 개선된 등가특성을 구하려면 전노심 계산과 슈퍼셀 계산의 반복적인 계산 절차를 수행하여야 한다. 이러한 균질 파라미터들은 확산이론계산이나 수송이론계산과 같은 적용계산방법과 전노심 계산에서 허용 가능한 유한메쉬 크기에 따라 결정된다. 열중성자로 균질화에서는 일반적으로 유한메쉬를 사용하는 전노심 확산이론계산을 위한 파라미터를 생산한다.

수송이론계산을 사용한 슈퍼셀계산에서 제어봉 반응도가를 생산해내는 균질화 방법들로는 여러 가지가 있다. 이 방법들은 균질모델 계산으로 구하여진 부수중성자속(adjoint flux)을 사용하여 (중성자속  $\times$  체적) 방법으로 가중 평균화하여 단면적을 구한다. 이 균질단면적들을 사용한 반복적인 계산과정을 통하여 균질모델의 부수중

성자속 해를 구하기 위한 균질단면적을 개선한다. 처음 단계 계산에서는 부수중성자속을 (중성자속 x 체적)방법으로 가중하여 평균 단면적을 구한다. 다음 단계 계산에서는 (중성자속 x 부수중성자속(처음 단계에서 구함) x 체적)으로 가중평균하여 균질단면적을 구한다. 이러한 두 단계의 계산을 통하여 구한 제어봉 반응도가와 반응률은 비균질모델을 사용하여 구한 값들과 비교하여 1 % 이내 차이로 얻을 수가 있다고 한다.

반경방향과 축방향 수송단면적을 각 방향별로 중성자류와 각 방향에 대한 균질모델로 구한 부수중성자류로 평균하여 구하기도 한다. 이 방법을 사용한 예로서 반경방향과 축방향의 양 방향으로의 에너지 군별로 주요 반응률에 대한 등가인자를 구하여 이를 이용하여 균질단면적을 생산하는 방법이 있다.

등가 반응도를 구하는 방법은 여러 가지가 있다. 예로서, (중성자속 x 체적) 가중 평균한 균 포획단면적과 감속단면적에 동일한 scaling 인자를 적용하고, 중성자류로 평균한 축방향 및 반경방향 수송단면적에는 다른 scaling 인자를 적용한다. 제어봉에 대한 균질모델과 비균질모델 간에 섭동이론계산을 수행하여 scaling 인자를 구한 다음, 이를 비균질모델 계산에서의 반응도를 갖도록 균질모델계산에서의 단면적에 적용하여 등가균질단면적을 구한다. 이 방법은 제어봉 반응도가와 흡수율을 비교적 정확하게 예측한다. 그러나, 이러한 방법들은 수송이론계산에 필요한 균질단면적을 생산한다.

상기의 방법들은 수송이론계산에서 사용할 균질단면적을 생산하는 방법들로서, 확산이론계산에 사용하기 위한 균정수를 생산하기 위해서는 조정이 더욱 필요하다. 이외에도 전노심 계산에 사용된 메쉬에 대하여 확산이론계산에서 제어봉 표면 중성자류를 재생산해내는 단면적을 구하는 방법이 있다. 이 방법에서는 구하여진 단면적을 사용하여 비균질효과, 확산이론계산 적용 효과, 유한메쉬크기 효과를 보정한다. 그러나, 고속로에서는 노심-블랑켓 경계 효과와 같이 수송이론을 적용하여야 하는 효과들이 있다. 3차원 노달 수송이론계산코드가 개발됨에 따라 균질화 방법에서는



확산이론이나 유한메쉬크기 효과를 고려할 필요가 없게 될 것이다.

비균질모델에서는 밀도가 큰 흡수재가 제한된 체적내에 담겨져 있어 대부분의 흡수재가 외부로부터 들어오는 중성자로부터 차폐되기 때문에, 비균질모델은 일반적으로 균질모델의 경우보다 반응도가가 낮게 구하여진다. 슈퍼셀에서 비균질모델을 적용하여 구한 셀평균 단면적조차도 전노심계산에서 비균질효과를 적절히 나타낼 수 있는지는 확실치 않다. Super-Phenix의 경우, 처음에는 이 효과를 무시하여 제어봉과 안전제어봉의 반응도가를 19% 정도 과도예측하였다.

#### 2.4 제어봉 채널에 대한 유효확산계수

고속로 스펙트럼으로 평균한 소듐의 거시적 단면적은 약 0.07 barn(MeV 에너지 범위에서는 약 0.03 barn)으로서, 이는 노심물질에 대한 평균 거시적 단면적 0.2 barn에 비하여 매우 작다. 따라서, 제어봉이 인출된 제어봉 채널에 대하여 확산이론계산에서 표준적으로 정의되고 있는 확산계수에 대한 표준 정의( $D = 1/3 \Sigma tr$ )를 적용하면 축방향 중성자 누출을 과도 예측하게 된다. 이는 소듐이 채워진 채널에 상대적으로 제어봉 반응도가 계산값을 과소평가하게 된다. 따라서, 제어봉 채널 또는 제어봉 follower 영역에 대한 확산계수를 수정하여 이들 채널관에서의 축방향 누출을 보다 정확히 평가하는 개선된 계산방법들이 제안되고 있다.

이 계산방법들에서 확산계수 수정은 균일 매질이나 슈퍼셀에서의 채널에 대한 기하학적 단순모델에 대한 수송이론계산을 통하여 확산계수 수정식을 유도하고 있다. 여기에서 수정된 확산계수는 스칼라 중성자속의 구배에 대한 순 중성자류의 비로 정의되며, 축방향별로 각각 다르게 정의된다. 원통형 채널에 대하여, Rowland와 Eaton(1980)은 소듐이 void된 경우와 소듐밀도가 낮은 경우에 대하여 축방향 및 반경방향 확산계수에 대한 근사식을 유도하였다. 다른 방법으로는 공간 및 각도의 함

수인 적분식을 근사하기 위하여 해석식을 도입하여, 수송이론 해에 주어진 근사를 미분하여 구하는 방법들이 제안되고 있다.

## 2.5 제어봉 반응도가 계산값에서의 유한차분메쉬 효과

일반적으로 확산이론식과 각분할(discrete ordinate) 수송이론식의 해를 구하기 위하여 선형 유한차분근사법을 적용하면 주어진 메쉬 크기에 대하여 1차적으로 정확하게 그 해를 구할 수 있다. 그러나, 메쉬 크기의 홀수 승에 비례하는 항목들은 균일 메쉬 크기를 가지는 균질문제에서는 상쇄한다. 결과적으로, 전노심계산모델에서 전 방향으로 메쉬 크기가 균일하게 변한다면, 메쉬 크기가 충분히 작고 경계효과가 작은 경우에는 유효증배계수( $k_{\text{eff}}$ ) 계산값이 메쉬 크기의 자승에 선형적으로 비례한다. 제어봉이 인출된 원자로 모델보다는 제어봉이 삽입된 원자로 모델의 경우 유한차분법에 의한 오차가 크며, 이에 따라 제어봉 반응도가 계산값에 메쉬 크기에 따른 오차가 발생한다. 또한, 이러한 유한차분법 적용에 따른 오차는 원자로 전체뿐만 아니라 제어봉 근처의 출력 분포를 구하는데도 발생한다.

일반적으로 오차의 부호와 크기는 유한차분근사법을 적용하는 방법에 따라 서로 다르다. 메쉬 중심을 계산노드로 하는 근사법을 사용하는 확산이론계산코드들은  $k_{\text{eff}}$  값을 과대 예측하는 반면에, 메쉬 경계를 계산노드로 하는 확산이론계산코드나 각분할수송이론 계산코드들은  $k_{\text{eff}}$  값을 과소예측한다. 각분할수송이론 계산에서는 적용하는 각분할(angular ordinate) 수에 따른 오차가 있다. 상기와 같은 메쉬 크기에 따른 오차는 몇 개의 다른 메쉬 크기를 가지는 계산 결과를 외삽하여 메쉬 크기가 0인 경우의 값을 구함으로써 배제할 수가 있다.

육각형 집합체를 1개의 메쉬로 취급하고 축방향 메쉬 크기를 11.5cm로 하는 메쉬중심의 확산이론계산을 사용하여 300 MWe 고속로의  $k_{\text{eff}}$  값을 구하는 경우, 제

어봉 인출시에는 0.8%, 삽입시에는 1.9% 각각 과대평가하였다. 또한, 기하학적 모델에 따른 차이를 보면, 제어봉 반응도가 계산에서 축방향 메쉬 크기를 3.38cm로 하고 육각형 집합체를 1개의 육각형 메쉬로 취급하는 hex-z 모델 계산값이, 육각형 집합체를 6 개의 삼각형으로 취급하는 tri-z 모델 계산값보다 13% 작게 구하여졌다. Tri-z모델을 사용한  $k_{eff}$  계산값을 비교하여 보면, 제어봉 인출시 0.11%, 삽입시 0.23% 만큼 각각 오차를 보인다.

제어봉 반응도가 계산에서, 대부분의 경우 표준 메쉬 크기를 사용한 수송이론 계산값에서의 메쉬크기 오차는 확산이론계산 값에서의 오차보다 작다고 보고되고 있다. CDFR(1200 MWe) 설계에서, 표준 메쉬(7.5 x 6.5cm)의 경우 평균적으로 2% 정도 과소 평가한 반면에, 메쉬 크기를 1/2로 줄이는 경우에는 0.5% 오차 정도로 과소 평가하였다.

## 2.6 에너지 군수 효과

제어봉 반응도가 계산에서 사용하는 에너지 군수에 따른 영향은 에너지 군구조, 군축약 스펙트럼의 생산방법 및 군수에 따라 다르다. 일반적으로 에너지 군수에 비례하지는 않지만, 에너지 군수를 크게 할수록 계산 오차는 감소한다고 한다. 노심 핵연료 영역, 블랑켓 영역 및 제어봉 영역 등, 각 영역에 대한 군축약 스펙트럼을 사용하는 경우 계산 오차를 줄일 수가 있다.

## 2.7 확산이론계산에서의 근사방법

메쉬 크기 보정을 한 확산이론계산과 고차의  $S_N$  수송이론계산 결과를 비교하면, 확산이론계산이 슈퍼셀계산을 포함한 노심중앙에서의 제어봉 반응도를 과대

평가하고 있다. 노심중앙이 아닌 제어봉의 경우에는, 확산이론계산과 수송이론계산 간에 구하여지는 중성자속 형태 차이가 제어봉 반응도가 차이에 영향을 준다. 일반적으로 제어봉 follower와 연관된 축방향 누출을 취급하는 데 있어서, 각분할 근사와 메쉬 크기 뿐만 아니라 RZ모델과 XY모델의 차이도 값의 결정에 영향을 준다. 몬테카를로 계산의 부정확도가 상기의 차이들과 비슷하더라도, 확산이론계산으로 주어지는 반응도가가 몬테카를로 계산으로 구하여지는 것보다 큰 것으로 밝혀져있다.

## 2.8 기하학적 모델링 근사

### 2.8.1 축방향 buckling 을 사용한 2 차원평면모델 계산

제어봉 반응도가 계산에서 제어봉과 그 주위 영역을 보다 정확히 근사하고자 하는 기하학적 모델링 근사방법으로는 다음과 같은 모델링이 사용된다. 우선, 2차원 평면모델 계산으로서 이 계산에서는 중성자 축방향 누출은  $D_g B_g^2$  형태로 표시되는 등가흡수양으로 대표한다. 좀더 정확한 계산에서는 제어봉 영역과 제어봉 follower영역 뿐만 아니라 다른 영역들에 대하여 영역과 에너지군 별로 각각의 buckling 값을 사용하기도 한다.

### 2.8.2 원통형과 직사각형 모델링

노심중앙의 제어봉 반응도가 계산에서 1차원 원통형 모델과 2차원 XY모델을 비교하여 보면, 이들 모델 간의 차이는 계산수렴조건과 메쉬 보정에 따른 부정확도

보다 그 크기가 작아 일반적으로 두 계산모델은 잘 일치한다.

### 2.8.3 중성자속 합성법(Flux synthesis method)

중성자 합성방법을 이용한 계산에서의 계산 정도는 시도함수 (trial function)를 어떻게 적절하게 선택하여 적용하는가에 크게 좌우된다. 이 계산방법은 핵연료관리 분석과 같이 한 원자로를 대상으로 하여 그 특성이 크게 변하지 않아 어느 정도 기본적인 특성 모드를 가지는 계산을 여러 번 수행하여야 하는 계산에서 매우 유용하다.

## 2.9 제어봉 반응도가 계산의 정도

현재 제어봉 반응도가 및 제어봉 반응률 계산에서의 목표 계산정도는  $\pm 5\%$  이다[1]. 그러나, 제어봉 반응도가 계산에서 핵자료가 미치는 영향이 핵연료 반응도가 나 전노심 중성자속 계산 등과 비교하여 상대적으로 크게 나타난다. 따라서, 실험 결과를 분석함으로써 계산 방법에 대한 정도를 확인할 필요가 있다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 계산 절차 및 방법은 다음과 같다. 여기에서 주어진 계산 절차 및 방법은 2차원 수송이론계산으로부터 얻어진 보정값들을 사용하여 전노심확산이론계산을 수행하는 것을 기본으로 하고 있다.

(1) 우선 제어봉 구조를 자세히 모델링하는 슈퍼셀계산을 수행하여 전노심계산과 상세한 반응률 계산에 필요한 균질단면적을 생산한다. 이 과정에서는 핀다발 구조에 대한 충돌확률계산코드나 원통형 모델에 대한 각분할근사 수송이론계산을 이용할 수 있다.

(2) 제어봉이 삽입되어있지 않고 소듐 만이 채워져있는 제어봉 채널에 대한 유

효 확산계수를 계산한다.

(3) 확산이론계산으로 에너지 군수를 5개에서 10개를 군축약하기 위하여 사용할 제어봉 중성자 흡수영역과 제어봉 채널을 포함한 원자로 내부 영역에 대한 가중 스펙트럼을 구한다. 이 계산 과정은 다수의 계산을 필요로 하거나 25군 정도의 계산 소요시간이 매우 클 경우에 수행된다.

(4) 상기 계산에서, 영역별로 에너지군별 축방향 buckling값을 구한다. 이 계산 과정은 2차원 평면 각분할근사 수송이론계산과 확산이론 계산 결과를 비교하고, 보다 적은 계산시간으로 다양한 확산이론계산을 수행하기 위하여 필요하다.

(5) 기본적인 제어봉 배치에 따른 분석은 3차원 확산이론계산으로 수행하며, 제어봉 삽입 배치에 따른 상호작용효과(interaction effect) 등을 자세히 분석하기 위해서는 에너지군 및 영역별 축방향 buckling값을 사용하는 2차원 평면모델 계산을 수행한다.

(6) RZ 모델과 축방향 buckling값을 사용한 평면 모델을 사용하여, 표준 메쉬 크기를 사용한 확산이론계산과 메쉬 크기를 보정한 수송이론계산 결과를 비교하여, 계산을 통하여 구하여지는 제어봉 반응도가, 제어봉 흡수율 및 노심내 핵분열율 분포에 대한 보정효과를 평가한다. 여기에서 보정에는 각분할근사에서의  $S_N$ 의 차수 및 메쉬 크기에 대한 효과도 포함된다.

상기와 같은 계산절차는 다른 계산방법을 적용함으로써 보다 단순화할 수 있다. 최근에는 계산 비용이나 시간을 절약하여주는 3차원 다군확산이론계산 방법이 많이 개발되었다. 예를 들면, 3차원  $P_N$  수송이론계산법, 횡방향 중성자 누출이 결합된 1차원 노달계산법, 또한 자동적으로 에너지 군구조를 재균형하여 주는 방법 (automatic energy group rebalanc method) 등이 있다. 이러한 방법들을 적용함으로써 확산이론계산 적용시 필요한 에너지 군축약, 계산방법 검증 및 확산이론계수의 제정의 등이 필요하지 않게 되었다. 적절한 계산 비용으로 요구되어지는 계산 정도를 제공하여 줄 수 있는 몬테카를로 계산방법 개발이 예상되며, 이러한 개발로 상기와

같은 균질화 과정단계를 생략할 수 있을 것이다.

## 2.10 계산방법에 대한 실험적 검증

현재의 계산방법과 핵자료 라이브러리를 사용한 단위 제어봉이나 제어봉 다발에 대한 반응도가 측정 결과에 대한 계산값은 측정값과 약  $\pm 10\%$  정도 오차 이내로 주어지고 있다. 제어봉 간의 상호작용효과는 일반적으로 잘 예측되어지며, 개별적으로 전부 삽입된 제어봉들의 경우보다는 부분적으로 삽입된 제어봉들의 경우보다 잘 예측되어진다. 한편, 수송이론계산, 제어봉에 대한 균질화 및 제어봉 follower 영역에 대한 축방향 누출에 대한 개선 등을 통한 계산 결과들은 측정값과 더 일치하고 있다. 제어봉 반응도가에 대한 계산값과 측정값과의 오차는 일반적으로 제어봉 위치가 노심 중앙에서 멀어짐에 따라 증가한다. 이러한 경향은 반경방향 핵분열을 분포 계산에서의 오차와 관련이 있으며, 또한 핵자료의 부정확성 또는 전 노심계산에서의 확산이론계산에 따른 결과이기도 하다.

제어봉과 제어봉 follower의 내부 및 근처에서의 반응을 측정에 대한 분석결과들은 확산이론계산과 단순균질화 방법은 제어봉 내부의 반응률과 제어봉 follower에서의 고에너지 중성자속을 과대평가함을 보이고 있다.

제어봉이 인출된 경우와 비교하여 상대적으로 노심 전체의 중성자속 분포에 대한 제어봉 삽입효과는 3차원 확산이론계산을 사용할 경우 그 오차가  $\pm 1\%$  이내로 일반적으로 잘 예측하고 있다.

현재 확산이론계산에서 제어봉 균질화 및 제어봉 follower 취급, 3차원 전노심 수송이론계산을 위하여 개선된 방법들이 제안되어져 사용되고 있으며, 이러한 개선된 방법들은 제어봉 효과 예측에 대한 목표 계산정도를 달성하는데 크게 기여하리라고 예상된다.

## 2.11 제어봉 상호효과

노심 내에서의 제어봉 삽입은 노심 전체 및 국소적으로 중성자속 분포의 교란을 초래한다. 일반적으로 제어봉 주위에서의 국소적인 중성자속의 급격한 감소(dip)는 노심 중앙에서 약 40% 정도로 가장 크게 나타나며, 노심 중앙에서 멀리 위치하는 핵연료 영역 근처에서는 약 10% 정도 나타난다. 한편, 대칭 배치가 아닌 제어봉의 삽입은 노심 내부 전반에 걸쳐 2배 이상의 중성자속 경사(tilt)를 초래하며, 이러한 중성자속 경사의 크기는 제어봉 반응도가 크기 및 노심 크기에 비례한다. 이러한 중성자속의 급격한 감소(국소적 현상) 및 중성자속 경사(전체적 현상)는 제어봉 간의 상호작용을 일으킨다. 즉, 인접한 2개의 제어봉 반응도가는 단위 제어봉 반응도가의 합보다 작다. 한편, 노심 내 서로 다른 평에 배치되거나 충분히 격리되어 있는 경우에는 이와 반대로 크게 나타난다. 일반적으로 이러한 제어봉 위치에 따른 제어봉간 상호효과는 노심 크기에 비례하여, 250 MWe 출력 규모의 고속로의 경우 10% 정도이며, 상용로 규모의 경우에는 2배 정도의 크기로 나타난다.

실제로 노심 운전 중 반응도 및 출력 제어를 위하여 제어봉시스템 운용은 제어봉/클러스터의 조합으로서 삽입 또는 인출로써 이루어진다. 따라서, 제어봉시스템 설계에서는 제어봉 인출 뿐만 아니라 삽입에 따른 사고 등에 대하여도 이러한 상호효과를 고려하여 여유도를 가지도록 하여야 한다. 이러한 분석에서도 제어봉간 상호효과는 매우 중요하게 취급되어진다.

## 2.12. 제어봉 특성곡선

제어봉 특성곡선은 제어봉의 완전 삽입으로부터 완전 인출까지 제어봉/클러스



터의 삽입 거리에 따른 반응도가 변화율을 나타낸다. 일반적으로 제어봉 특성곡선은 제어봉 삽입 거리에 대하여 sine커브 형태를 가진다. 이에 따라 제어봉 삽입 거리에 따른 총 반응도 변화율을 나타내는 특성곡선은 s자 커브 형태를 가진다 (일명 s커브). 특히, 이러한 특성곡선에서 노심 높이가 작은 노심에서는 단위 제어봉반응도가 상대적으로 커서 노심 삽입 및 인출에 따른 변화율도 상대적으로 커진다. 특성곡선들은 운전 중 제어봉의 부분적인 삽입이나 제거시 중요한 반응도 변화량 예측을 제공하여 줄뿐만 아니라 제어봉 이탈이나 삽입사고시 반응도 변화량 제한치 설정자료를 제공하여 준다.

### 3. K-CORE 시스템에 적용

이상에서 살펴본 제어봉 계산방법 중에서 현재 K-CORE 시스템에 적용 가능한 계산방법을 적용하여 계산하였다[2-5]. 계산대상 노심으로는 본 과제에서 KALIMER(150 MWe) 노심설계 개발의 일환으로 수행중인 breakeven 노심을 대상으로 하였다[6]. 본 보고서에서는 breakeven 노심을 대상으로 제어봉 상호효과, 제어봉 특성곡선, 슈퍼셀을 이용한 비균질 계산에 대하여 K-CORE 시스템에 적용하여 계산한 결과를 기술한다.

#### 3.1 Breakeven 노심

Breakeven 노심은 정상상태 금속연료 핵주기에서 외부의 핵연료 공급이 없이 계속 발전할 수 있다는 목표를 가지고 개발 중인 노심이다.

Breakeven 노심의 구성은 그림 1에서 보인다. 노심의 형태는 내부블랑켓과 핵연료 집합체로 이루어진 반경방향 비균질 노심이다. 노심은 54개의 핵연료 집합체, 24개의 내부블랑켓 집합체, 48개의 반경방향 블랑켓 집합체, 6개의 제어봉, 1개의 USS(Ultimate Shutdown System) 노정지 시스템, 6개의 가스팽창모듈(GEM, Gas Expansion Modules), 48개의 반사집합체, 126개의 차폐집합체, 54개의 노내핵연료저장조(IVS: Inner Vessel Storage)로 구성되어 있다. 노심은 48개의 반경방향 블랑켓 집합체로 둘러싸여 있다. 중심 집합체는 USS 제어봉 집합체이다. 바깥쪽 반경방향 노심 부분은 각각 한 개 열의 B<sub>4</sub>C, 한 개 열의 IVS, 최외각에 차폐집합체로 구성되어 있다. 6개의 GEM이 핵연료영역과 반경방향 블랑켓영역 사이에 위치한다. 노내핵연료저장조는 스테인레스강 차폐영역사이에 위치한다. 노심의 유효높이는 100cm이며

반경방향 노심등가직경은 155.8cm이다. 최외각노심등가직경은 337.3cm이다. 두 개의 제어봉 클러스터(총 6 개의 제어봉)이 중심으로부터 48.3cm에 위치한다. 노심구조재의 물질은 낮은 조사팽윤 성격을 가지는 HT9이다.

주요 노심과 핵연료집합체에 대한 노심설계 제원 및 가동조건을 표 1에 표시한다. 덕트핏치는 161mm이다. 구동핵연료집합체는 271개의 연료핀을 포함하며 U-Pu(TRU)-10% Zr 삼원합금의 형태의 연료를 사용한다. 구동핵연료와 블랑켓은 각각 75%와 85%의 smeared 밀도를 가진다. 감손우라늄(0.2% U235) 이원합금은 핵연료와 블랑켓 집합체에서 사용된다. 85%의 capacity factor를 가지고 18개월 재장전기간을 가진다. 핵연료와 다른 집합체의 설계제원은 표 2에서 표 7에 자세하게 보인다. 이 표에서 모든 온도는 낮은 상태(cold) 즉 실험실 조건 온도를 나타낸다. 표 8에 온도가 낮은 상태와 온도가 높은 상태(hot) 즉 가동온도 상태의 체적분율을 표시한다. 계산에 필요한 원자수 밀도는 온도가 높은 상태와 온도가 낮은 상태 각각에 대하여 계산되었다. 표 9와 표 10에 원자수 밀도를 표시한다.

## 3.2 계산절차

계산절차는 크게 나누어서 3개의 부분으로 구성된다. 즉 단면적 생산, 연소계산, 제어봉반응도 계산으로 나누어진다. 계산절차는 그림 2에 간략하게 나타낸다. 자세한 계산절차는 각 항목별로 아래에서 자세히 보인다.

### 3.2.1 단면적 생산

핵계산에 사용되는 기본적인 단면적 자료가 포함되어있는 평가핵자료 파일 JEF-2.2와 ENDF/B-VI를 가지고, NJOY 자료처리코드시스템[7]을 이용하여 일반적인

노심계산에서 사용하기 위한 다군정수 단면적 라이브러리를 생산한다. 현재는 JEF-2.2 핵자료 파일[8]에 기초한 MATXS 라이브러리 형식으로 80군 중성자 단면적 라이브러리 파일인 KAFAX(KAERI FAsT XS)/F22 라이브러리를 마련하여 이용하고 있다. 이것은 액체금속로용 군정수세트 KFS(Korean Fast Set)의 한 버전으로서 여러 온도에서의 무한희석 단면적(infinite dilute cross section)과 Bondarenko 자기차폐인자(self-shielding factor)들을 수록하고 있다.

물질조성에 따른 영역별 미세단면적들은 유효단면적 생성모듈과 예비 처리된 80군 라이브러리를 이용하여 생산한다. 유효단면적 생성모듈은 중성자속을 얻기 위한 확산이론계산과 분할좌표근사계산(discrete ordinate approximation)에서 바로 이용할 수 있는 형식으로 다군단면적 자료를 생산한다. 유효단면적 생성은 공명자기차폐와 쉘 중성자속 계산, 그리고 군축약이 포함되어 있다. 각 영역에서의 공명자기차폐 보정은 NR(narrow resonance) 근사에 기초한 Bondarenko f-인자(Bondarenko f-factor) 방법을 사용한다. 전형적인 균질화 혼합물에 대한 반응 단면적을 얻기 위해 각 영역에 대해 쉘 균질화 과정을 거치며, 이 쉘 균질화에 사용되는 중성자속은 수송이론계산을 통해 얻는다. 또한, 군정수의 에너지군수를 줄여주는 군축약 과정에서도 수송이론계산으로 얻어진 중성자속을 비중함수로 사용한다.

쉘 계산은 본 과제를 통하여 개선된 유효반응단면적 생성모듈의 주요 구성요소인 TRANSX[9]를 이용하여 각 물질영역들의 9군 구조의 군정수들을 구하였다. 표 11은 계산에서 사용한 군정수의 군 구조를 보여준다. 쉘 계산은 공명자기차폐보정, 쉘 균질화, 군축약으로 이루어진다. 공명자기차폐보정은 18개의 물질영역에 대하여 80군 계산을 수행하여 CCCC 표준형식의 ISOTXS 파일 내장형태로 핵분열 스펙트럼( $\chi_g$ )과 각 영역의 유효 미시적 단면적을 구하였다. 이러한 단면적세트 생산에서  $P_N$  계산 단면적을  $S_N$ 계산 단면적으로 변환하기 위하여 필요한 산란단면적 행렬(scattering matrix)에 대한 비등방성(anisotropy) 보정방법으로는 BHS(Bell-Hansen-Sandmeier) 수송근사법을 사용하였으며, 초기 중성자속으로는

TRANSX 코드의  $P_0$  라이브러리 가중합수를 사용하였다. 2차원 거친망사형(coarse meshed) RZ-모델(그림 3 기준모델 참조)에 대하여 SN 수송이론계산코드인 TWODANT[10]를 사용하여 균축약 과정에서 가중합수로 사용하는 중성자 스펙트럼을 구하였다. 계산 모델은 RZ-모델(18개의 물질영역)에 대하여 80군 계산을 행하였다. 유효증배계수  $k_{eff}$ 를 구하기 위한  $P_3S_8$  계산을 하였고, 균축약에 사용할 영역평균 가중중성자속을 수록한 CCCC 표준파일 RZFLUX를 생산하였다. 80군 셀 계산에서 구한 중성자속을 가중합수로 이용하여 9군 단면적 세트를 ISOTXS형식으로 구하였다. 영역평균 가중 중성자속은 미리 수행된 중성자 스펙트럼 계산을 통해 RZFLUX 파일 형식으로 주어졌다.

### 3.2.2 연료주기 계산

제어봉 반응도가 계산에 필요한 주기초(BOEC)와 주기말(EOEC)의 원자수 밀도를 구하기 위하여 연료주기 계산이 수행되었다. 연료주기 계산은 REBUS-3코드를 기본계산코드로 사용하였다[11]. REBUS-3 코드는 중성자속 계산과 연소계산으로 구성되어 있다.

중성자속 계산조건은 반경방향 메쉬수는 연료봉 당 1개이며 축방향 메쉬수는 핵연료 영역에서 25개 이다. 반향 메쉬 크기(노드 간격)는 핵연료봉 피치인 16.1cm이며 축방향 메쉬 크기(노드 간격)는 핵연료 영역에서는 4.2cm이다. 계산 option은 노달근사방법을 사용했으며 기하학적 모델은 육각주(hex-z) 모델, 노심 모델은 1/6 대칭 모델이다. 중성자속 계산방법은 반경방향으로 quadratic flux approximation, 축방향으로 cubic flux approximation/quadratic leakage approximation을 사용하였다. 경계조건은 반경방향과 축방향으로 외삽길이(extrapolated length) 경계조건(단,  $a=0.4692$ )을 사용하였다. 사용 균정수는 9군 균구조를 사용하였다.

연소계산은 비희토류(non-rare earth)와 희토류(rare earth) 핵분열편(fission product)

를 개별적으로 취급한 U-Pu 연소체인을 사용하였다. 연료주기는 18개월 동안 IVS에서 생각하는 것으로 가정하였고 8개월의 화학적 분리(reprocessing), 8개월의 재가공(refabrication), 2개월의 저장기간을 가지는 것으로 가정하였다. 그러므로 노심에서 분리(discharge)와 재장전(reloading) 사이의 간격은 36개월로 가정하였다. 노심물질은 99.9%의 TRU가 회수되며 희토류 핵분열편의 5%만이 회수된다고 가정하였다.

### 3.2.3 제어봉반응도가 계산

제어봉 계산은 앞서 언급한대로 제어봉 상호효과, 제어봉 특성곡선, 슈퍼셀을 이용한 비균질 계산을 수행하였다. 각각의 항목에 대한 자세한 계산방법을 아래에서 항목별로 보인다.

#### 3.2.3.1 제어봉 상호효과

제어봉 상호효과에 대한 제어봉 반응도가는 DIF-3D[12] 코드의 삼각주(trigonal-z) 기하학적 모델, 전노심(full core) 모델을 대상으로 9군 균정수를 사용하여 확산이론계산으로 구하였다. 제어봉 간의 상호효과를 계산하기 위하여 한 개의 제어봉, 서로 인접한 두 개의 제어봉, 제어봉 클러스터간의 효과를 보기 위해 한 개의 클러스터, 두 개의 클러스터 등, 이상 총 4가지 경우에 대하여 제어봉 간의 상호효과를 조사하였다.

연소계산 결과와 연소계산 입력파일을 이용하는 프로그램 R2DIF3D을 이용하여 주기초(BOEC)와 주기말(EOEC)의 제어봉 반응도가 계산에 필요한 입력파일을 구하였다.

### 3.2.3.2 제어봉 특성곡선

계산은 KALIMER breakeven 평형노심에서의 6개의 제어봉 중에서 1개의 제어봉이 삽입한 경우를 가정하여 계산을 수행하였다. 제어봉 특성곡선을 계산하기 위해 가급적 축방향으로 많은 영역을 가져야 하므로 앞서의 제어봉 상호효과에서 계산한 모델보다 축방향 영역을 5배로 세밀하게 나누었다.

### 3.2.3.3 슈퍼셀을 이용한 비균질 계산

그림 4에 이번 계산에서 사용한 슈퍼셀의 개략도를 보여주고 있다. 이 계산의 목적은 제어봉에 관한 상세모델인 비균질 모델과 제어봉을 단순화시킨 균질 모델간에 모델 차이에서 오는 반응도가를 평가하는데 목적이 있다. 계산에 사용된 비균질 모델은 내부 흡수체, 외부 소듐, 스테인레스 강 그리고 이를 둘러싼 노심물질 영역으로 구성된 4개의 영역을 가진다. 반면에 균질모델인 경우는 내부 흡수체, 외부 소듐, 스테인레스 강으로 구성된 3개의 영역이 1개의 영역으로 균질화되었다. 노심물질 영역의 크기를 정하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 breakeven 노심은 구동핵연료가 54개, 내부 블랑켓이 24개 이므로 1/6 대칭을 고려하여 구동핵연료 9개, 내부 블랑켓 4개의 체적으로 구성된다고 가정하였다. 따라서 노심물질 영역에 들어가는 원자수 밀도는 이 체적의 비로써 다시 생성하였다. 표 12는 노심물질 영역을 각각의 체적비로 다시 생성한 노심물질 영역에서의 원자수 밀도를 나타내고 있다. 내부 흡수체, 외부 소듐, 스테인레스 강의 체적은 breakeven 노심에서 사용한 체적비를 그대로 사용하였다.

단면적 축약에 사용되는 영역별 중성자 속을 구하기 위하여 TWODANT 계산

을 수행하였다. 구해진 영역별 중성자속을 사용하여 전노심 계산에서 사용가능한 1 영역 단면적으로 축약하여 앞서의 제어봉 상호효과에 대하여 계산한 것과 동일 조건에서 계산을 수행하여 비균질모델과 균질모델과의 차이를 비교하였다.



## 4. 계산결과

### 4.1 제어봉 상호효과

표 13은 KALIMER breakeven 평형노심의 제어봉시스템에서의 상호효과 계산 결과를 보여준다. 제어봉 반응도가는 삼각주 (trigonal-z) 기하학적 모델을 사용한 전 노심 (full core) 모델을 대상으로 9군 균정수를 사용하여 확산이론계산으로 구하였다. 표에서 보는 바와 같이 서로 인접한 2개의 제어봉 반응도가는 단위 제어봉반응도가의 합보다 7.0% 작는데, 이는 인접한 2개의 제어봉이 중성자속이 감소하는 범위내로 인접하고 있기 때문이다. 반면에, 2개의 클러스터(총 6개의 제어봉) 간의 상호효과는 반응도가를 5.9% 증가시키고 있다.

실제로 제어봉시스템 운용은 제어봉/클러스터의 조합으로 이루어진다. 따라서, 이러한 제어봉간 상호효과는 제어봉 삽입 (음의 반응도 삽입)이나 제어봉 이탈 (양의 반응도 삽입) 등의 제어봉 운용과 관련하여 광범위하게 취급되어진다. 즉, 상호효과는 노정지시 제어봉 삽입 실패 (stuck rod condition)사고로 인한 노정지 여유도 (shutdown margin) 변화, 노정지 상태에서의 제어봉 이탈사고에 의한 반응도 삽입량 예측 등에서 매우 중요하게 취급되어진다. 상기 breakeven 평형노심을 대상으로 한 상호효과 계산은 제어봉시스템 운용계획과 관련하여 가능한 제어봉의 조합 운용을 대상으로 확대 분석되어야 할 것으로 보인다.

### 4.2 제어봉 특성곡선

그림 5는 KALIMER breakeven 평형노심에서의 6개의 제어봉 중에서 1개의 제

어봉을 삽입한 경우에 대한 단위 제어봉 특성곡선을 보여준다. 그림에서 노심 내 제어봉 삽입 위치에 따라서 제어봉 변화량에 큰 차이를 보이고 있으며, 전체적으로 sine 커브 형태를 보여준다. 노심 중심에서 최대 4.2/cm(제어봉 삽입)을 가지며 노심 상하부에서 그 크기가 작아, 노심 중심 부분에서의 제어봉 운용이 보다 세밀하여야 함을 알 수 있다. 그림 6은 제어봉 삽입 거리에 따른 총 반응도 변화율로서 전형적인 s 커브 형태를 보이고 있다. 단위 제어봉을 노심 상부로부터 삽입함에 따라 총 반응도가 증가하여 완전히 삽입되어지는 노심 하부에서는 총 반응도가 2.9 %를 가지고 있음을 알 수가 있다. 구하여진 제어봉 특성곡선이나 s 커브의 형태는 제어봉 클러스터나 이들의 조합 운용시에도 그 크기가 차이가 있을 뿐, 형태는 동일할 것으로 보인다. 하지만 앞으로 제어봉시스템 운용계획과 관련하여 다양한 제어봉 조합 운영에 따른 추가 계산이 수반되어야 할 것으로 보인다.

#### 4.3 슈퍼셀을 이용한 비균질 계산

단면적 축약에 사용되는 영역별 중성자 속을 구하기 위하여 TWODANT 계산을 수행하였다. 그림 7에서 단면적 축약에 사용한 중성자속의 합을 표시하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 비균질모델에 의해 계산된 중성자수가 균질모델에 의해 계산된 중성자수보다 흡수체 영역에서 더 적은 수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 밀도가 큰 흡수체가 제한된 체적 내에 담겨져 있어 대부분의 흡수체가 외부로부터 들어오는 중성자로부터 차폐되기 때문이며 일반적으로 비균질 모델은 균질모델의 경우보다 반응도가 낮게 구해진다.

구해진 영역별 중성자속을 사용하여 전노심 계산에서 사용가능한 1영역 단면적으로 축약하여 앞서의 제어봉 상호효과에 대하여 계산한 것과 동일 조건에서 계산을 수행하여 비균질모델과 균질모델과의 차이를 비교하였다. 계산결과는 표 14와

15에서 보인다.

표 14에서 보는 바와 같이 주기초(BOEC)에서 1개의 제어봉이 삽입할 경우에 균질 모델 즉 유효단면적 생성시 체적 평균한 경우와 체적과 셀 내의 중성자속으로 평균한 비균질모델로 유효단면적을 생성하여 계산한 값과의 차(비균질 효과)는 약 19cent로 앞서 제어봉 상호효과에서 계산한 반응도와 비교하여 볼 때 비균질 효과는 약 6% 정도 제어봉의 효과를 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 제어봉의 효과가 증대되는 2개의 클러스터( 총 6개의 제어봉)을 사용할 경우는 비균질 효과가 10% 정도 나타났다. 정확한 비교는 되지 못하지만 비슷한 조건에서 Super-Phenix 제어봉을 대상으로 균질모델과 비균질모델과의 차이를 계산한 경우에는 체적 평균한 경우 약 12% 정도, 체적과 중성자속으로 평균한 경우 약 4% 정도 제어봉 반응도가를 과대예측하고 있다고 보고한 바 있다[1]. 따라서 이 경우에는 비균질효과는 약 8% 정도라는 것을 의미한다. 이번 비균질 계산에서 보면 여러 경우를 평균한 경우 약 8% 정도로 비교적 일치하는 결과를 얻었다. 하지만 동일 조건에서 비교한 것이 아니기 때문에 여러 다른 경우에 대하여 꾸준한 연구가 필요하다 하겠다. 표 15의 경우는 주기말(EOEC)에서 계산한 결과로써 앞서의 주기 초의 계산 결과와 비슷한 약 8% 정도의 비균질 효과를 보이고 있다.

## 5. 결론

본 보고서에서는 고속로에서 일반적으로 사용되고 있는 육각형 집합체 형태의 제어봉 반응도가 계산방법에 대하여 기술현황을 분석하고, 이들 계산방법들 중에서 현재 액체금속로 노심핵계산체제 K-CORE System에 적용 가능한 몇 가지 아이টে에 대하여 계산을 수행하였다.

수행 결과 제어봉 간 상호효과에서는 인접한 2개의 제어봉인 경우 7.0% 적게 나타났으며 6개 제어봉에 대하여서는 5.9% 크게 나타났다. 제어봉 특성곡선의 계산인 경우 제어봉 삽입위치에 따라서 제어봉 변화량에 큰 차이를 보이고 있으며 노심 중심에서 최대 4.2(cent/cm)의 반응도 삽입효과를 보이고 있다. 슈퍼셀을 이용한 비균질 계산에서는 균질모델과 비교하여 비균질모델이 8% 정도 제어봉 효과를 감소시키는 것으로 나타났다.

이번에 수행된 제어봉 반응도가 계산은 현재 K-CORE System에서 적용 가능한 몇 가지 아이টে에 대하여 수행한 결과이며 앞으로 계속 K-CORE System를 앞질의 제어봉 계산방법에 맞추어 점차 개량하는 노력이 수반되어야 할 것으로 보인다. 특히 이번의 슈퍼셀을 이용한 비균질계산의 경우 셀 계산시 노중심부분에서 중성자의 누출이 없다고 가정하고 계산된 결과이므로 앞으로 추가계산시에는 현재 제어봉 위치에서의 중성자 누출을 감안한 셀 계산이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] J. L. Rowlands, "Physics of Fast Reactor Control Rods," Progress in Nuclear Energy, Vol. 16, No. 3, pp. 287-321(1985).
- [2] Y. C. Kim, et al, "Development of LMR Design Technology," KAERI, KAERI/RR-1396/93 (Sep. 1994).
- [3] Y. C. Kim, et al, "Development of LMR Design Technology," KAERI, KAERI/RR-1528/94 (July 1995).
- [4] H. T. Chung, et al, "Improvement of Group Collapsing in TRANSX Code," KAERI, KAERI/TR-745/96 (July 1996).
- [5] H. T. Chung, et al, "Modification of BINX Code for HP9000 System," KAERI (to be published).
- [6] Y. I. Kim, "Nuclear and Thermal-Hydraulic Characteristics of KALIMER Breakeven Equilibrium Core, " LMR/CD120-AR-01(2000).
- [7] R. E. MacFarlane and D. W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," Los Alamos National Laboratory, LA-12740-M (Oct. 1994).
- [8] J. D. Kim and C. S. Gil, "Development and Benchmark of Multi-group Library for Fast Reactor using JEF-2.2, " KAERI/TR-842/97 (1997).
- [9] R. E. MacFarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," Los Alamos National Laboratory, LA-12312-MS (Dec. 1993).
- [10] R. E. Alcouffe, et al, "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional, Diffusion-Accelerated, Neutron Transport," Los Alamos National Laboratory, LA-10049-M (Feb. 1990).
- [11] B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, Argonne National Laboratory (March 1983).
- [12] K. L. Derstine, "DIF-3D: A Code to solve One-,Two- and Three- Dimensional Finite-Difference Theory Problems, " ANL-82-64 (1984).

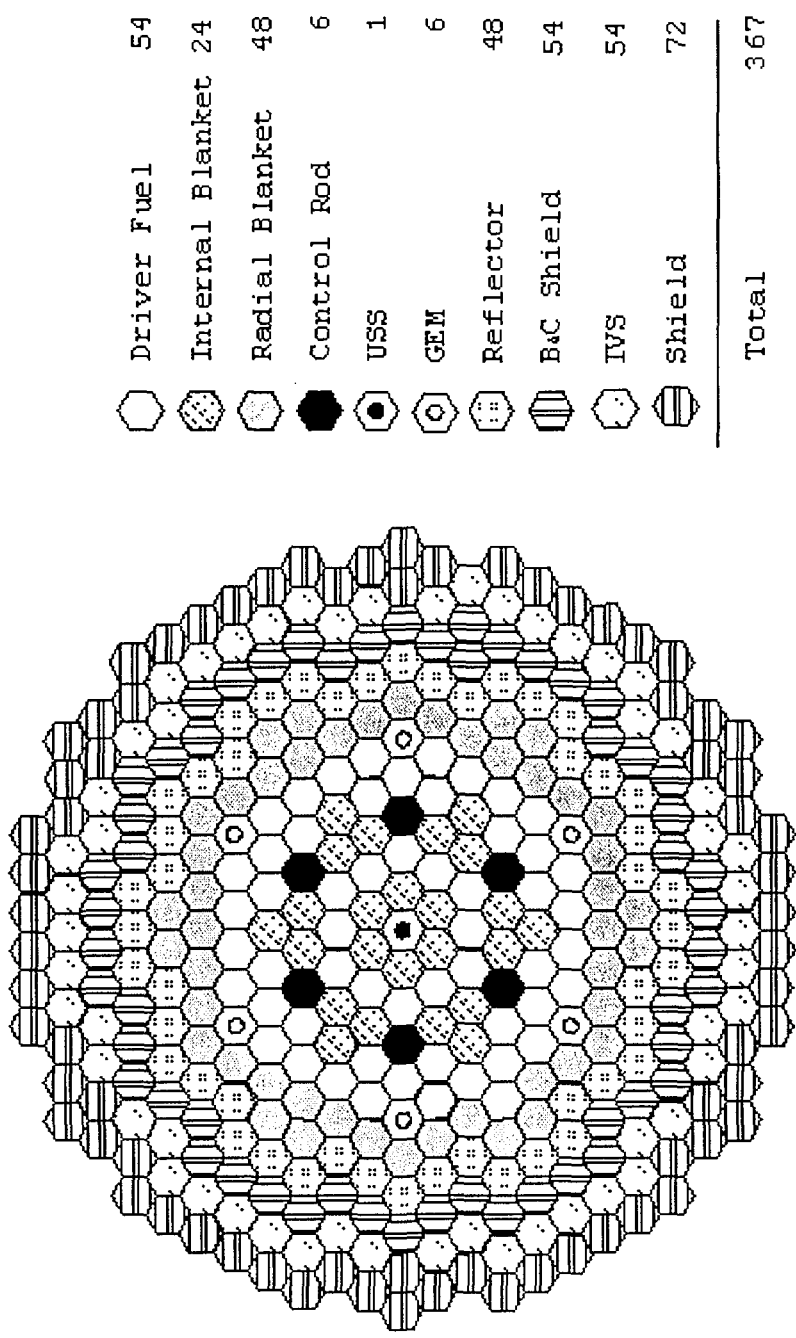


그림 1. Breakeven 노심 배치도

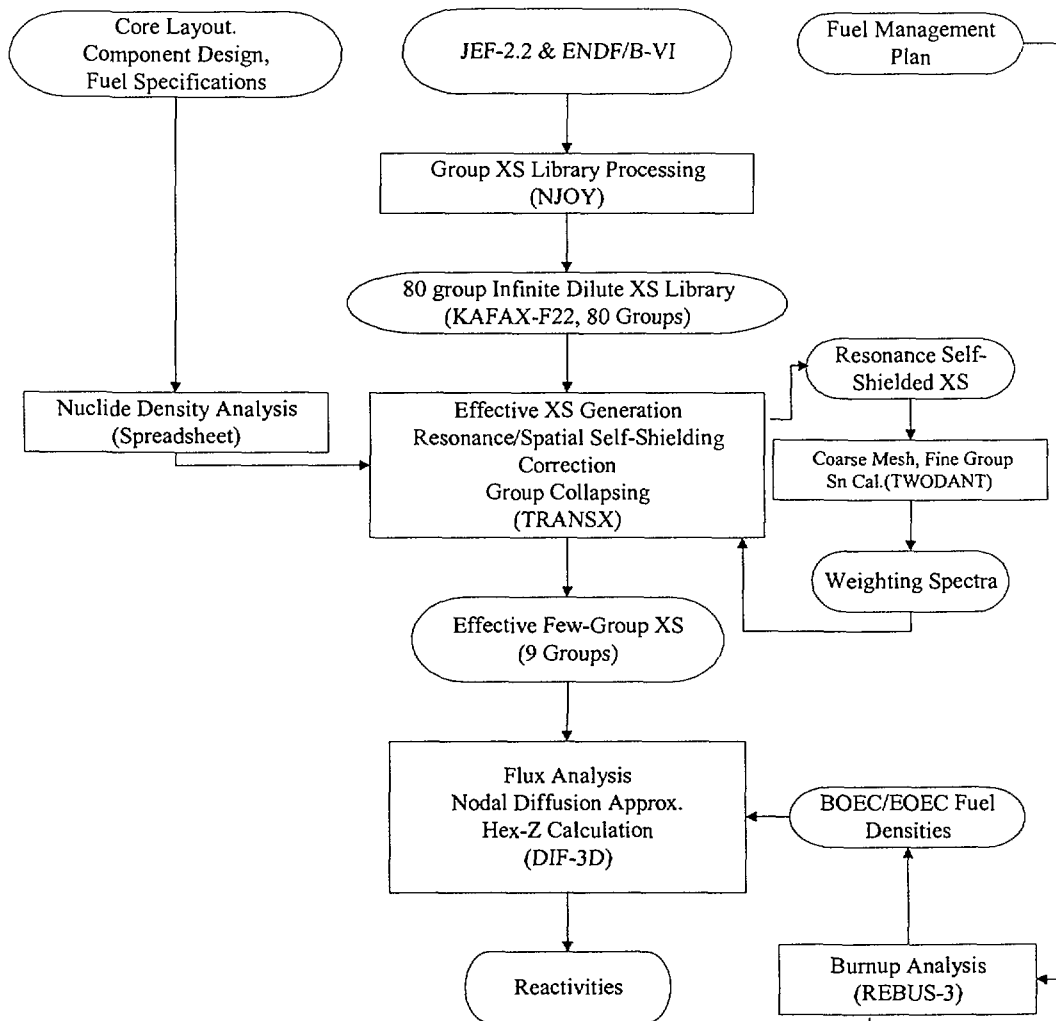
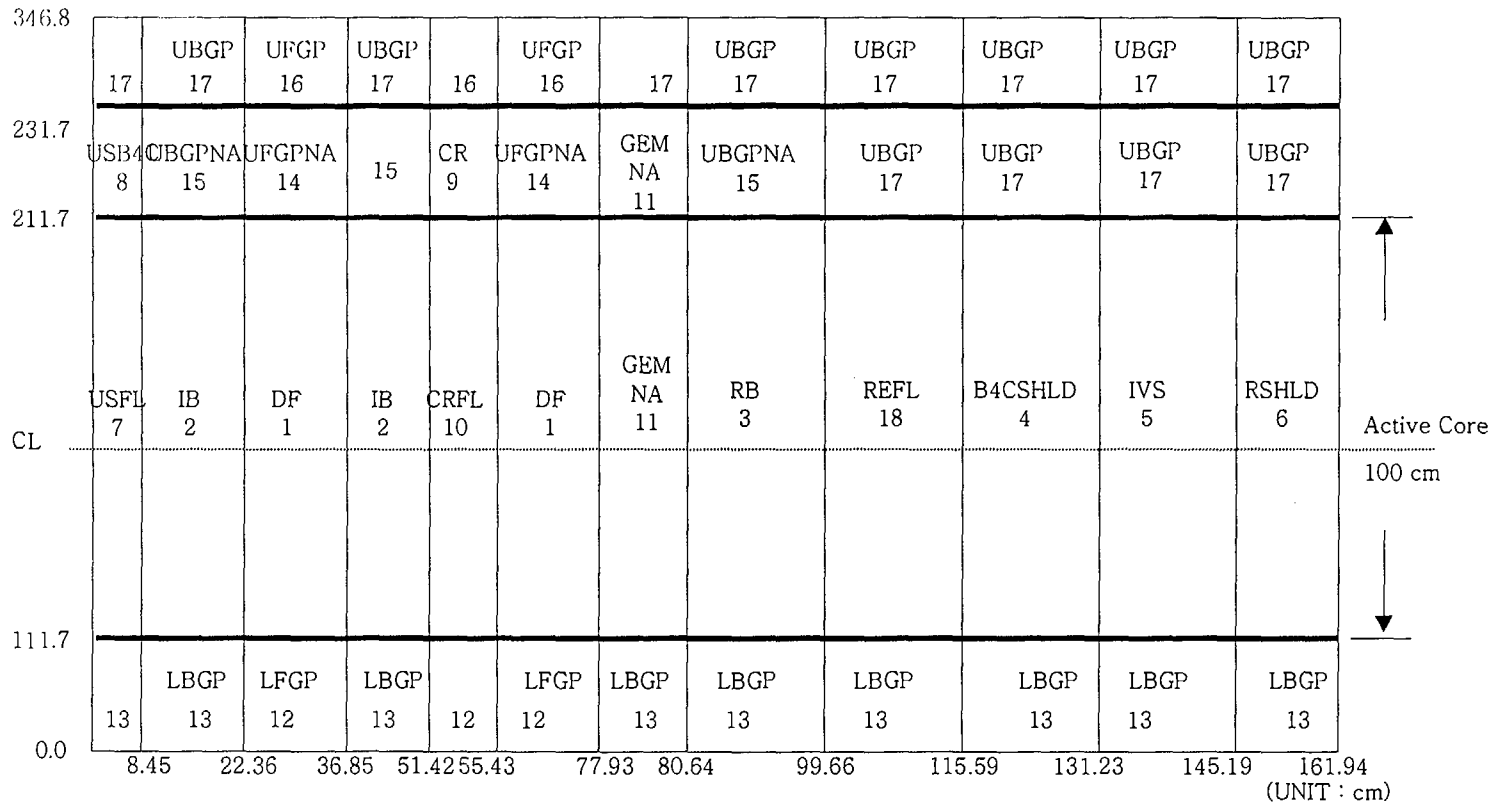


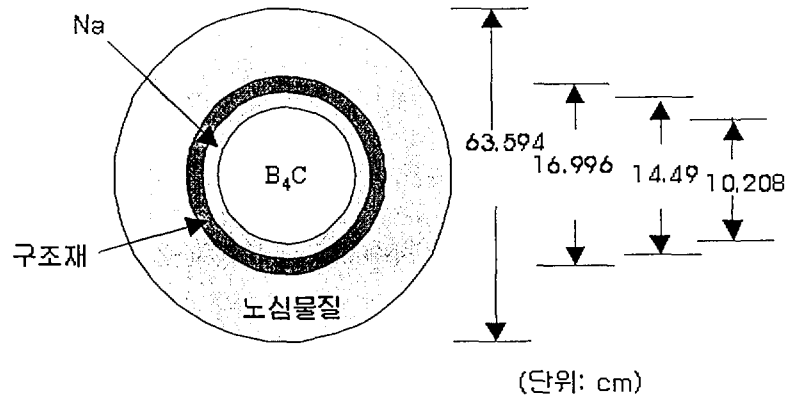
그림 2. 노심핵설계 계산절차



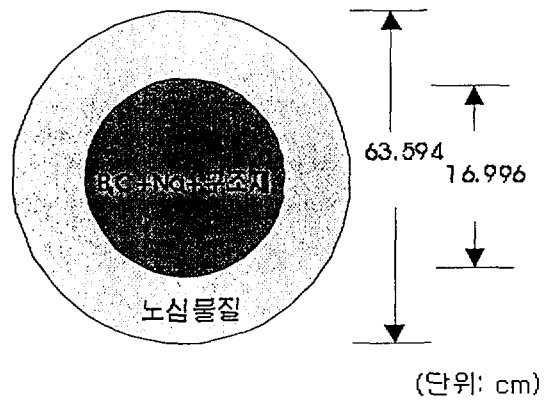
- |         |     |       |      |        |      |      |      |
|---------|-----|-------|------|--------|------|------|------|
| DF      | = 1 | RSHLD | = 6  | GEMNA  | = 11 | UFGP | = 16 |
| IB      | = 2 | USFL  | = 7  | LFGP   | = 12 | UBGP | = 17 |
| RB      | = 3 | USB4C | = 8  | LBGP   | = 13 | REFL | = 18 |
| B4CSHLD | = 4 | CR    | = 9  | UFGPNA | = 14 |      |      |
| IVS     | = 5 | CRFL  | = 10 | UBGPNA | = 15 |      |      |

그림 3. Breakeven 노심 (RZ 모델)





슈퍼셀모델 비균질모델



슈퍼셀모델 균질모델

그림 4. 비균질 계산모델

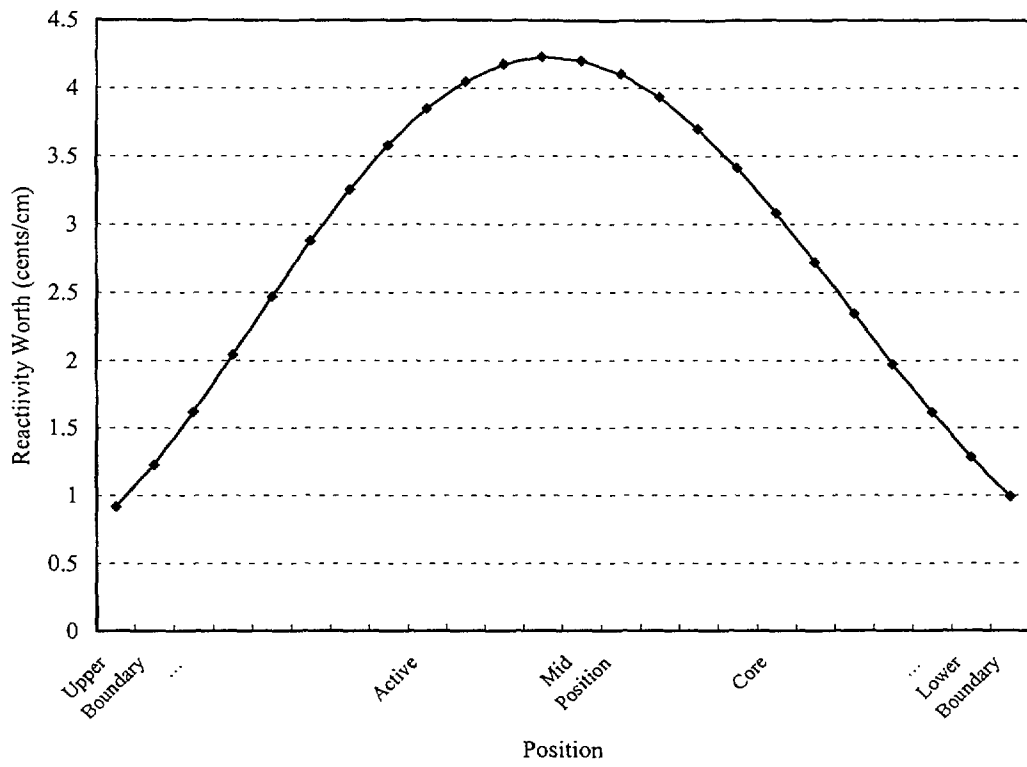


그림 5. 제어봉의 삽입위치에 따른 위치별 반응도가

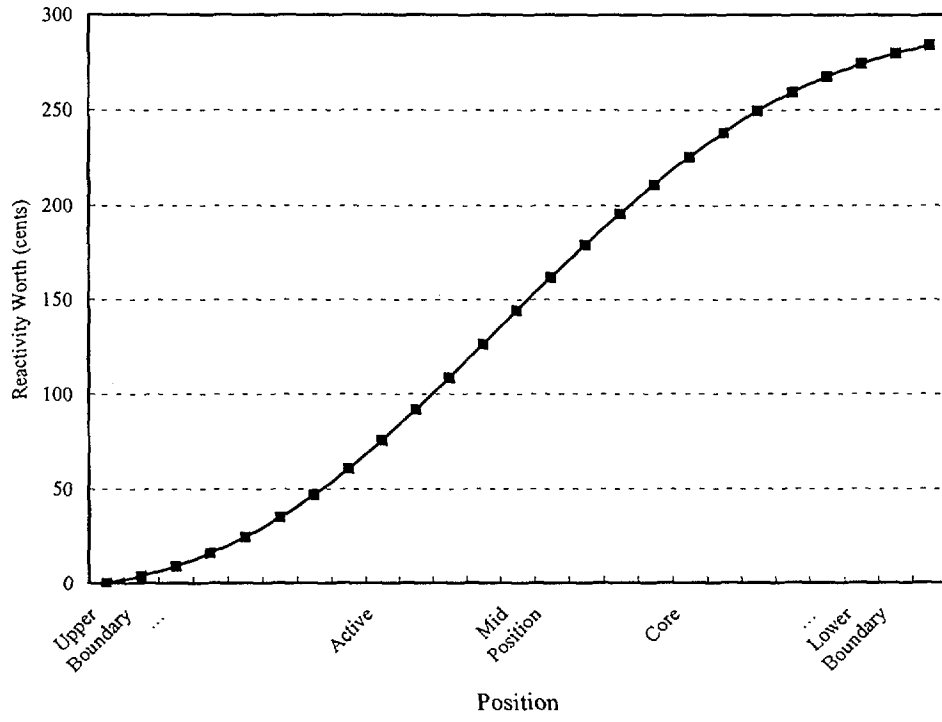


그림 6. 제어봉 반응도가 특성곡선

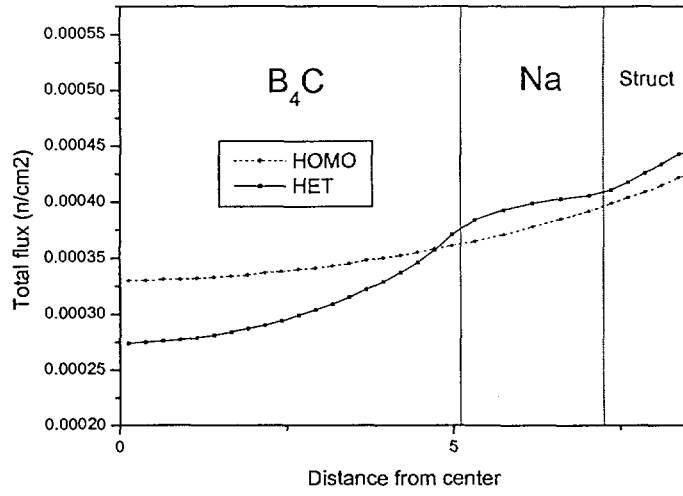


그림 7. 슈퍼셀 계산에 의한 중성자 분포

표 1. 노심설계 제원 및 가동 조건

**Operating Conditions**

Core Thermal Power(MWt)	392.2
Core Electric Power(MWe)	150.0
Plant Thermal Efficiency(%)	38.2
Core Mixed Mean Inlet Temp.(°C)	386.2
Core Mixed Mean Outlet Temp.(°C)	530.0
Coolant Temperature Rise(°C)	143.8
Plant Capacity Factor(%)	85.0
Core Configuration	Heterogeneous
Number of Core Enrichment Zones	1
Feed Fuel TRU Enrichment(%)	30.0
Number of Assemblies	
Driver Fuel	54
Internal Blanket	24
Radial Blanket	48
Reflector	48
GEMs	6
Control Rod	6
USS(SASS)	1
B <sub>4</sub> C/Radial Shield	126
IVS	54
Total	367
Refueling Interval(months)	18
Effective Full Power Day(EFPD)	465.0
Number of Batches	
Driver Fuel	3
Internal Blanket	3
Radial Blanket	6
Number of Reload Assemblies per Cycle	
Driver Fuel	18
Internal Blanket	8
Radial Blanket	8
Total	34

### Design Parameters

Active Core Height(cm)		100.00
Maximum Core Diameter(cm)		337.30
Duct Pitch(mm)		161.00
Duct Gap(mm)		4.00
Duct Wall Thickness(mm)		3.70
Pins per Fuel Assembly(Driver/Blanket)	271	127
Pin Outer Diameter(Driver/Blanket)(mm)	7.40	12.00
Pin P/D Ratio(Driver/Blanket)	1.203	1.083
Upper Fission-Gas Plenum Length(/Na Filled)(cm)	132.5	20.0
Core Structural Material		HT9

### Volume Fractions(%)

#### Driver Fuel

Fuel Slug		28.22
Coolant(including Bond)		46.88
Structural Material		24.90

#### Inner/Radial Blanket

Fuel Slug		45.04
Coolant(including Bond)		34.81
Structural Material		20.15

#### Control Rod

Pin Material		36.07
Coolant		36.61
Structural Material		27.32

#### Radial Shield(/with B<sub>4</sub>C Shield)

Pin Material(Smeared)	75.43	58.10
Coolant	15.82	18.24
Structural Material	8.75	23.66

표 2. 구동핵연료 제원

ASSEMBLY DATA

Number of Pins per Assembly		271
Fuel Smeared Density(%)		75.0
Duct Material		HT9
Duct Wall Thickness(mm)		3.70
Duct Outer Flat to Flat (mm)		157.00
Duct Inner Flat to Flat (mm)		149.60
Active Length (cm)		100.00
Fuel Element Length (cm)		346.80
Gap Distance between Ducts (mm)		4.00
Assembly Lattice Pitch (mm)		161.00
Assembly Area (cm <sup>2</sup> )		224.482
Upper Gas Plenum(/Na Filled) Length (cm)	132.50	20.00
Upper End Plug (cm)		2.54
Lower End Plug and Shielding (cm)		111.76
Overall Assembly Length (cm)		442.17

PIN DATA

Fuel Type		U-Pu-10%Zr
Fuel Fabrication Density (%TD)		100.0
Cladding Material		HT9
Pin Overall Length (cm)		346.80
Pin Outer Diameter (mm)		7.40
Pin Inner Diameter (mm)		6.30
Cladding Thickness (mm)		0.55
Fuel Slug Diameter (mm)		5.46
Fuel Cladding Gap (mm)		0.42
Pin Pitch (mm)		8.90
Pin P/D Ratio		1.203
Wire Wrap Diameter (mm)		1.40
Wire Wrap Pitch (cm)		20.49
Bond		Na

VOME FRACTIONS(%) (AT 20°C)

Fuel Slug	28.22
Fuel Slug (Smeared)	37.63
Coolant without Bond	37.47
Coolant with Bond	46.88
Structure	24.90

표 3. 블랑켓 연료 제원

ASSEMBLY DATA

Pins per Assembly		127
Smeared Density(%)		85.0
Duct Material		HT9
Duct Wall Thickness(mm)		3.70
Duct Outer Flat to Flat (mm)		157.00
Duct Inner Flat to Flat (mm)		149.60
Active Length (cm)		100.0
Fuel Element Length (cm)		346.80
Gap Distance between Ducts (mm)		4.00
Assembly Lattice Pitch (mm)		161.00
Assembly Area (cm <sup>2</sup> )		224.482
Upper Gas Plenum(Na Filled) Length (cm)	132.50	20.00
Upper End Plug (cm)		2.54
Lower End Plug and Shielding (cm)		111.76
Overall Assembly Length (cm)		442.17

PIN DATA

Fuel Type		Depleted U-10%Zr
Fuel Fabrication Density (%TD)		100.0
Cladding Material		HT9
Pin Overall Length (cm)		346.80
Pin Outer Diameter (mm)		12.00
Pin Inner Diameter (mm)		10.92
Cladding Thickness (mm)		0.54
Fuel Slug Diameter (mm)		10.07
Fuel Cladding Gap (mm)		0.43
Pin Pitch (mm)		13.00
Pin P/D Ratio		1.083
Wire Wrap Diameter (mm)		0.95
Wire Wrap Pitch (cm)		30.00
Bond		Na

VOLUME FRACTION(%) (AT 20°C)

Fuel Slug	45.04
Fuel Slug (Smeared)	52.99
Coolant without Bond	26.86
Coolant with Bond	34.81
Structure	20.15



표 4. 반사체 제원

ASSEMBLY DATA

Pins per Assembly	61
Duct Material	HT9
Duct Wall Thickness(mm)	3.70
Duct Outer Flat to Flat (mm)	157.00
Duct Inner Flat to Flat (mm)	149.60
Active Length (cm)	100.00
Fuel Element Length (cm)	346.80
Gap Distance between Ducts (mm)	4.00
Assembly Lattice Pitch (mm)	161.00
Assembly Area (cm <sup>2</sup> )	224.482
Upper Gas Plenum Length (cm)	132.50
Upper End Plug (cm)	2.54
Lower End Plug and Shielding (cm)	111.76
Overall Assembly Length (cm)	442.17

PIN DATA

Pin Material	Inconel-600
Pin Overall Length (cm)	346.80
Pin Diameter (mm)	18.80
Pin Pitch (mm)	18.85
Pin P/D Ratio	1.002

VOLUME FRACTION(%) (AT 20°C)

Pin Material	75.43
Coolant	15.82
Structure	8.75

표 5. B<sub>4</sub>C 차폐체 제원

ASSEMBLY DATA

Pins per Assembly	7
Duct Material	HT9
Duct Wall Thickness(mm)	3.70
Duct Outer Flat to Flat (mm)	157.00
Duct Inner Flat to Flat (mm)	149.60
Active Length (cm)	100.00
Fuel Element Length (cm)	346.80
Gap Distance between Ducts (mm)	4.00
Assembly Lattice Pitch (mm)	161.00
Assembly Area (cm <sup>2</sup> )	224.482
Upper Gas Plenum Length (cm)	132.50
Upper End Plug (cm)	2.54
Lower End Plug and Shielding (cm)	111.76
Overall Assembly Length (cm)	442.17

PIN DATA

Pin Material	B4C
B-10 Enrichment in Boron (wt.%)	90.0
Pellet Fabrication Density (%TD)	90.0
Pellet Smeared Density(%TD)	90.0
Bond Material	Helium
Cladding Material	HT9
Pin Overall Length (cm)	346.80
Pin Outer Diameter (mm)	54.60
Pin Inner Diameter (mm)	48.71
Cladding Thickness (mm)	2.95
Pellet Diameter (mm)	43.71
Pellet-Cladding Diametral Gap (mm)	2.50
Pin Pitch (mm)	55.00
Pin P/D Ratio	1.000

VOLUME FRACTION(%)

Pin Material (Smeared)	58.10
Coolant	18.24
Structure	23.66

표 6. 반경방향 차폐체 제원

ASSEMBLY DATA

Pins per Assembly	61
Duct Material	HT9
Duct Wall Thickness(mm)	3.70
Duct Outer Flat to Flat (mm)	157.00
Duct Inner Flat to Flat (mm)	149.60
Active Length (cm)	100.00
Fuel Element Length (cm)	346.80
Gap Distance between Ducts (mm)	4.00
Assembly Lattice Pitch (mm)	161.00
Assembly Area (cm <sup>2</sup> )	224.482
Upper Gas Plenum Length (cm)	132.50
Upper End Plug (cm)	2.54
Lower End Plug and Shielding (cm)	111.76
Overall Assembly Length (cm)	442.17

PIN DATA

Pin Material	HT9
Pin Overall Length (cm)	346.80
Pin Diameter (mm)	18.80
Pin Pitch (mm)	18.85
Pin P/D Ratio	1.002

VOLUME FRACTION%(AT 20°C)

Pin Material	75.43
Coolant	15.82
Structure	8.75

표 7. 제어봉 제원

ASSEMBLY DATA

Pins per Assembly	61
Duct Material	HT9
Duct Wall Thickness(mm)	3.70
Duct Outer Flat to Flat (mm)	157.00
Duct Inner Flat to Flat (mm)	149.60
Active Length (cm)	100.00
Fuel Element Length (cm)	346.80
Gap Distance between Ducts (mm)	4.00
Assembly Lattice Pitch (mm)	161.00
Assembly Area (cm <sup>2</sup> )	224.482
Upper Gas Plenum Length (cm)	132.50
Upper End Plug (cm)	2.54
Lower End Plug and Shielding (cm)	111.76
Overall Assembly Length (cm)	442.17

PIN DATA

Pin Material	B4C
B-10 Enrichment in Boron (wt.%)	20.0
Pellet Fabrication Density (%TD)	96.0
Pellet Smeared Density(%TD)	85.0
Bond Material	Helium
Cladding Material	HT9
Pin Overall Length (cm)	346.80
Pin Outer Diameter (mm)	16.00
Pin Inner Diameter (mm)	13.00
Cladding Thickness (mm)	1.50
Pellet Diameter (mm)	10.60
Pellet-Cladding Diametral Gap (mm)	1.20
Wire-Wrap Pitch(mm)	25.00
Wire Diameter(mm)	1.000

VOLUME FRACTION(%) (AT 20°C)

Pin Material (Smeared)	36.07
Coolant	36.61
Structure	27.32

표 8. 체적분율

<b>LINEAR EXPANSION COEFFICIENTS(1/°C)</b>			
Fuel(U-Pu-Zr, metal)		5.507E-06	
Structural Material(HT9)		1.459E-05	
Structural Material(S.S., Inconel)		1.808E-05	1.530E-05
B <sub>4</sub> C(Nat.,90%)		4.540E-06	4.540E-06
Fuel Axial Expansion(%)		5.000E+00	
<b>TEMPERATURES(°C)</b>			
Core Inlet		386.2	
Core Outlet		530.0	
Core Average		458.1	
Core Fuel Average		608.1	
Blanket Fuel Average		608.1	
<b>EXPANSIONS</b>			
		Active Core	Upper      Lower
Radial		1.0107	
Axial		1.0064	1.0074      1.0053
Total		1.0172	
<b>AREA PER ASSEMBLY(cm<sup>2</sup>)</b>			
Cold		224.482	
Hot		226.881	
Pitch(mm)	cold	161.00	
	hot	161.86	

**VOLUME FRACTIONS(%)**

	<b>Cold</b>			<b>Hot</b>			<b>Corrected Vol. Frac.</b>
	Temp. (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Volume Fraction(%)	Temp. (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Correction Factor	
<b>Core Fuel</b>							
Fuel Slug	20	15.850	<b>37.63</b>	608.1	14.905	1.000	<b>37.63</b>
Coolant	20	0.946	<b>37.47</b>	458.1	0.842		<b>37.47</b>
Structure	20	7.761	<b>24.90</b>	458.1	7.298	1.000	<b>24.90</b>
<b>Radial Blanket</b>							
Fuel Slug	20	15.800	<b>52.99</b>	608.1	14.858	1.000	<b>52.99</b>
Coolant	20	0.946	<b>26.86</b>	458.1	0.842		<b>26.86</b>
Structure	20	7.761	<b>20.15</b>	458.1	7.298	1.000	<b>20.15</b>
<b>Control Rod</b>							
20%B <sub>4</sub> C	20	2.512	<b>36.07</b>	458.1	2.497	1.000	<b>36.07</b> no axial fuel exp.
Coolant	20	0.946	<b>36.61</b>	458.1	0.842		<b>36.61</b>
Structure	20	7.761	<b>27.32</b>	458.1	7.615	1.000	<b>27.32</b>
<b>Reflector</b>							
Pin Material	20	8.413	<b>75.43</b>	458.1	8.247	1.000	<b>75.43</b> bare
Coolant	20	0.946	<b>15.82</b>	458.1	0.842		<b>15.82</b>
Structure	20	7.761	<b>8.75</b>	458.1	7.615	1.000	<b>8.75</b>

**90%B<sub>4</sub>C Shield**

B <sub>4</sub> C	20	2.385	<b>58.10</b>	458.1	2.340	1.000	<b>58.10</b>
Coolant	20	0.946	<b>18.24</b>	458.1	0.842		<b>18.24</b>
Structure	20	7.761	<b>23.66</b>	458.1	7.615	1.000	<b>23.66</b>

**Radial Shield**

Coolant	20	0.946	<b>15.82</b>	458.1	0.842		<b>15.82</b>
Structure	20	7.761	<b>84.18</b>	458.1	7.615	1.000	<b>84.18</b>

**USS(SASS)**

92%B <sub>4</sub> C	20	2.385	<b>85.97</b>	458.1	2.340	1.000	<b>85.97</b>
Void/Coolant	20	0.946	<b>5.28</b>	458.1	0.842		<b>5.28</b>
Structure	20	7.761	<b>8.75</b>	458.1	7.615	1.000	<b>8.75</b>

**IVS**

Coolant	20	0.946	<b>100.00</b>	458.1	0.842		<b>100.00</b>
---------	----	-------	---------------	-------	-------	--	---------------

**GEM**

Coolant(Flooded)	20	0.946	<b>85.97</b>	458.1	0.842		<b>85.97</b>
Void/Coolant	20	0.946	<b>5.28</b>	458.1	0.842		<b>5.28</b>
Structure	20	7.761	<b>8.75</b>	458.1	7.615	1.000	<b>8.75</b>

**Fuel Upper FGP**(for with Na, **Void = Coolant**)

Void	20	7.761	<b>37.63</b>	530.0	7.592	1.000	<b>37.63</b>
Coolant	20	0.946	<b>37.47</b>	530.0	0.825		<b>37.47</b>
Structure	20	7.761	<b>24.90</b>	530.0	7.592	1.000	<b>24.90</b>

<b>Fuel Lower FGP</b>							
Structure	20	7.761	<b>37.63</b>	386.2	7.761	1.000	<b>37.63</b>
Coolant	20	0.946	<b>37.47</b>	386.2	0.860		<b>37.47</b>
Structure	20	7.761	<b>24.90</b>	386.2	7.761	1.000	<b>24.90</b>
<b>Blanket Upper FGP</b>							
		(for with Na,	<b>Void = Coolant)</b>				
Void/Structure	20	7.761	<b>52.99</b>	530.0	7.592	1.000	<b>52.99</b>
Coolant	20	0.946	<b>26.86</b>	530.0	0.825		<b>26.86</b>
Structure	20	7.761	<b>20.15</b>	530.0	7.592	1.000	<b>20.15</b>
<b>Blanket Lower FGP</b>							
Structure	20	7.761	<b>52.99</b>	386.2	7.761	1.000	<b>52.99</b>
Coolant	20	0.946	<b>26.86</b>	386.2	0.860		<b>26.86</b>
Structure	20	7.761	<b>20.15</b>	386.2	7.761	1.000	<b>20.15</b>
<b>Fixed Shield</b>							
		(for boundary fitting, if required)					
B <sub>4</sub> C	20	2.518	<b>50.00</b>	458.1	2.471	1.000	<b>50.00</b>
Coolant	20	0.946	<b>25.00</b>	458.1	0.842		<b>25.00</b>
Structure	20	7.761	<b>25.00</b>	458.1	7.615	1.000	<b>25.00</b>

\* Expansion of total volume is calculated at

radially	at grid temperature (°C)	386.2
axially	at core average temperature (°C)	458.1

Axial fuel expansion is applied to fuel only.



표 9. 영역별 원자수 밀도(cold 조건)

(Unit : barn<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>)

	Constituent Material	Driver Fuel	Inner/Radial Blanket	Reflector	Radial Shield	B <sub>2</sub> C Shield	Control Rod	USS
Fuel	U-235	1.4855E-05	3.2820E-05					
	U-238	7.3192E-03	1.6170E-02					
	Np-237	1.5466E-04						
	Pu-238	2.8806E-05						
	Pu-239	1.4428E-03						
	Pu-240	5.6282E-04						
	Pu-241	3.7729E-04						
	Pu-242	1.0883E-04						
	Am-241	7.0694E-05						
	Am-242m	3.1134E-07						
	Am-243	6.9273E-05						
	Cm-242	2.7291E-08						
	Cm-243	2.1955E-07						
	Cm-244	1.5356E-05						
	Cm-245	1.5822E-06						
Cm-246	1.7410E-07							
	Zr	2.9535E-03	4.6981E-03					
Coolant	Na	9.2853E-03	6.6568E-03	3.9194E-03	3.9194E-03	4.5191E-03	9.0730E-03	1.3082E-03
Absorber	B-10					4.6388E-02	6.4470E-03	4.7886E-02
	B-11					5.1542E-03	2.5788E-02	4.1640E-03
	C					1.2886E-02	8.0588E-03	1.3013E-02
Structural Material	Fe	1.7714E-02	1.4337E-02	6.0741E-03	5.9890E-02	1.6834E-02	1.9436E-02	6.2269E-03
	Ni	9.9119E-05	8.0222E-05	4.2000E-02	3.3511E-04	9.4192E-05	1.0875E-04	3.4842E-05
	Cr	2.5741E-03	2.0834E-03	1.1290E-02	8.7028E-03	2.4462E-03	2.8244E-03	9.0485E-04
	Mo	1.8197E-04	1.4727E-04	6.6507E-06	6.1521E-04	1.7292E-04	1.9966E-04	6.3965E-05
	Mn	1.9066E-04	1.5431E-04	1.1546E-04	6.4462E-04	1.8119E-04	2.0920E-04	6.7022E-05
	Si	2.4863E-04	2.0123E-04	1.0105E-04	8.4061E-04	2.3628E-04	1.3947E-04	8.7400E-05

표 10. 영역별 원자수 밀도(hot 조건)

(Unit : barn<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>)

	Constituent Material	Driver Fuel	Inner/Radial Blanket	Reflector	Radial Shield	B,C Shield	Control Rod	USS
Fuel	U-235	1.3969E-05	3.0862E-05					
	U-238	6.8827E-03	1.5206E-02					
	Np-237	1.4544E-04						
	Pu-238	2.7088E-05						
	Pu-239	1.3567E-03						
	Pu-240	5.2926E-04						
	Pu-241	3.5479E-04						
	Pu-242	1.0234E-04						
	Am-241	6.6478E-05						
	Am-242m	2.9277E-07						
	Am-243	6.5142E-05						
	Cm-242	2.5664E-08						
	Cm-243	2.0646E-07						
	Cm-244	1.4440E-05						
Cm-245	1.4878E-06							
Cm-246	1.6372E-07							
Zr	2.7774E-03	4.4179E-03						
Coolant	Na	8.2693E-03	5.9285E-03	3.4905E-03	3.4905E-03	4.0247E-03	8.0802E-03	1.1651E-03
Absorber	B-10					4.5515E-02	6.4088E-03	4.6985E-02
	B-11					5.0573E-03	2.5635E-02	4.0857E-03
	C					1.2643E-02	8.0110E-03	2.9091E-02
Structural Material	Fe	1.6658E-02	1.3482E-02	5.9549E-03	5.8763E-02	1.6517E-02	1.9071E-02	6.1097E-03
	Ni	9.3208E-05	7.5438E-05	4.1172E-02	3.2881E-04	9.2420E-05	1.0671E-04	3.4187E-05
	Cr	2.4206E-03	1.9591E-03	1.1068E-02	8.5391E-03	2.4001E-03	2.7712E-03	8.8783E-04
	Mo	1.7111E-04	1.3849E-04	6.5256E-06	6.0364E-04	1.6967E-04	1.9590E-04	6.2762E-05
	Mn	1.7929E-04	1.4511E-04	1.1319E-04	6.3249E-04	1.7778E-04	2.0526E-04	6.5762E-05
	Si	2.3381E-04	1.8923E-04	9.9066E-05	8.2480E-04	2.3183E-04	1.3684E-04	8.5756E-05

표 11. 군구조

Upper E. Boundary (MeV)	80 Groups No.	9 Groups No.	Upper E. Boundary (MeV)	80 Groups No.	9 Groups No.
<u>2.0000+1**</u>	1	1	1.5034-2	41	
1.6905+1	2		1.3268-2	42	
1.4918+1	3		1.1709-2	43	
1.3499+1	4		1.0333-2	44	
1.1912+1	5		<u>9.1188-3</u>	45	8
1.0000+1	6		8.0473-3	46	
7.7880+0	7		7.1017-3	47	
<u>6.0653+0</u>	8	2	6.2673-3	48	
4.7237+0	9		5.5308-3	49	
3.6788+0	10		4.8810-3	50	
2.8650+0	11		4.3074-3	51	
2.2313+0	12		3.8013-3	52	
1.7377+0	13		<u>3.3546-3</u>	53	9
<u>1.3534+0</u>	14	3	2.9604-3	54	
1.1943+0	15		2.6126-3	55	
1.0540+0	16		2.3056-3	56	
9.3014-1	17		2.0347-3	57	
8.2085-1	18		1.7956-3	58	
7.2440-1	19		1.5846-3	59	
6.3928-1	20		1.3984-3	60	
5.6416-1	21		1.2341-3	61	
<u>4.9787-1</u>	22	4	1.0891-3	62	
4.3937-1	23		9.6112-4	63	
3.8774-1	24		7.4852-4	64	
3.0197-1	25		5.8295-4	65	
2.3518-1	26		4.5400-4	66	
<u>1.8316-1</u>	27	5	3.5358-4	67	
1.4264-1	28		2.7536-4	68	
1.1109-1	29		1.6702-4	69	
8.6517-2	30		1.0130-4	70	
<u>6.7379-2</u>	31	6	6.1442-5	71	
5.2475-2	32		3.7267-5	72	
4.0868-2	33		2.2603-5	73	
3.1828-2	34		1.3710-5	74	
2.8088-2	35		8.3153-6	75	
2.6058-2	36		5.0435-6	76	
<u>2.4788-2</u>	37	7	3.0590-6	77	
2.1875-2	38		1.1254-6	78	
1.9305-2	39		4.1399-7	79	
1.7036-2	40		1.5230-7	80	
			<u>1.3888-10*</u>		

\* Lower Energy Boundary

\*\* read as  $2.0000 \times 10^1$

표 12. 노심물질 영역에서의 원자수 밀도

B4C		COOL		STRUCT		FUEL	
B-10	1.7769E-02	Na	2.2070E-02	Fe	8.2121E-02	U-235	1.9172E-05
B-11	7.1074E-02			Ni	6.6399E-02	U-238	8.9083E-03
C	2.2211E-02			Cr	4.4102E-04	Np-237	1.0064E-04
				Mo	5.4973E-03	Pu-238	1.8745E-05
				Mn	1.2522E-03	Pu-239	9.3886E-04
				Si	1.4696E-03	Pu-240	3.6625E-04
						Pu-241	2.4552E-04
						Pu-242	7.0817E-05
						Am-241	4.6003E-05
						Am-242m	2.0260E-07
						Am-243	4.5078E-05
						Cm-242	1.7759E-08
						Cm-243	1.4287E-07
						Cm-244	9.9923E-06
						Cm-245	1.0296E-06
						Cm-246	1.1329E-07
						Zr	3.1264E-03
						Na	7.5483E-03
						Fe	1.5680E-02
						Ni	8.7735E-05
						Cr	2.2785E-03
						Mo	1.6107E-04
						Mn	1.6877E-04
						Si	2.2008E-04

표 13. 제어봉 상호효과

	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
Beta-effective (pcm)	355	358		
Rod Worth (Combined)(A)	pcm	pcm	\$	\$
1 Rod	1024	1056	2.88	2.95
2 Adjacent Rods	1904	1973	5.36	5.52
3 Rods (1 Cluster)	3809	3896	10.72	10.89
6 Rods (Total; 2 Clusters)	8071	8264	22.71	23.10
Sum of Each (B)				
2 Rods	2048	2112	5.76	5.90
2 Clusters	7618	7793	21.43	21.78
Interaction Factor (A/B)				
Rod	0.930	0.934		
Cluster	1.059	1.060		
Rod Worth (\$/rod)			3.57	3.63

표 14. 제어봉 비균질 효과(BOEC)

샘플	반응도가 (cent)	(HOMO-HET)	(HOMO-HET)/HOMO*100
control(41)	-288.168	-19.112	6.632
control(41,42)	-535.802	-30.461	5.685
control(41,43,45)	-1071.728	-100.105	9.341
control(1-6)	-2270.799	-231.990	10.216
평균			7.969

표 15. 제어봉 비균질 효과(EOEC)

샘플	반응도가 (cent)	(HOMO-HET)	(HOMO-HET)/HOMO*100
control(41)	-295.1125	-20.007	6.780
control(41,42)	-551.5363	-32.375	5.870
control(41,43,45)	-1089.048	-102.288	9.392
control(1-6)	-2309.832	-236.207	10.226
평균			8.067

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/TR -1785/2001					
제목 / 부제		제어봉반응도 특성 파라메타 분석체제 수립			
연구책임자 및 부서명		송훈(액체금속로노심설계기술개발)			
연구자 및 부서명		김영일,김상지,김영인(액체금속로노심설계기술개발)			
출판지	대전시	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2001
페이지	54 p.	도표	있음( 0 ), 없음( )	크기	26 cm.
참고사항	원자력연구개발 중·장기과제				
비밀여부	공개( 0 ), 대외비( ), 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
<p>초록</p> <p>고속로에서 일반적으로 사용되고 있는 육각형 집합체 형태의 제어봉 반응도가 계산방법에 대하여 3차원 확산이론계산을 기본으로 하여 제어봉시스템을 포함한 제어봉 반응도가 계산방법 및 계산방법 적용에 따른 문제점, 계산 정도, 계산모델링 개선 등에 대하여 살펴보고, 현재 K-CORE System 내 구비되어있는 유효단면적 생산체제 TRANSX/TWODANT와 중성자속계산체제인 확산이론계산코드 DIF-3D를 사용하여 계산방법 적용에 따른 결과 비교.분석을 통하여 계산방법의 적용성을 평가하고, 기본계산방법을 설정하고 현재 K-CORE System 적용에서의 문제점 및 향후 개선사항 등을 도출하였다.</p>					
주제명키워드		제어봉, 반응도가, 상호효과, 특성곡선,슈퍼셀, 비균질, K-CORE, Breakeven			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-1785/2001							
Title / Subtitle		Establishment of Analysis Procedure for Control Rod Reactivity Worth					
Main Author		Hoon Song(Development of Core design Technology for KALIMER)					
Researcher and Department		Young-Il Kim, Sang-Ji Kim, Young-In Kim (Development of Core design Technology for KALIMER)					
Publication Place	Taejeon	Publisher	Korea Atomic Energy Research Institute	Publication Date	2001		
Page	54 p.	Figure & Tab.	Yes( 0 ), No ( )	Size	26 cm.		
Note							
Classified	Open(0 ), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Technical Report			
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract		<p>As to the calculation method of control rod reactivity relating to hexagonal assembly, which are used generally in fast reactor, we have investigated the calculation method, the problems to rise during calculation, the degrees of calculation and the enhancement of calculation modeling so on, and estimated the application of calculation method through comparison and analysis of calculation result using the effective cross section generation system, TRANSX/TWODANT, and neutron flux calculation system, diffusion theory code DIF-3D, which are belonged to K-CORE System, and determined the basic calculation method, and extracted the present calculation problem in case of application in K-CORE System and the future improvement items so on.</p>					
Subject Keywords		Control rod, Reactivity, Interaction effect, Characteristics curve, Super cell, Heterogeneity effect, K-CORE, Breakeven					