

‘2003추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

500MWe급 고연소도 초장주기 고속로심 개념설계  
A Conceptual Design for a 500MWe High Burnup  
Ultra Long Life Fast Reactor Core

송훈, 김상지, 김영일, 한도희

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

**요약**

금속연료를 사용하는 500MWe급 초장주기 고속로심에 대한 노심설계인자를 탐색하였다. 초장주기 노심은 원자로 수명기간 동안 재장전이 필요없이 주기초 한번의 장전으로 운전되므로 핵연료 물질의 재처리 및 이동이 없으므로 핵비확산성을 가지는 고속로로서 그 의미를 가진다. 반경방향으로 4개의 농축도 영역으로 이루어진 균질 노심을 구성하였다. 각 영역별 농축도와 핵연료 체적비 변화에 따른 노심 핵특성 변화를 탐색하여 초장주기 노심을 구성하였다. 설계된 노심은 32년의 주기길이를 만족하며 연소도에 따른 반응도 변화는  $2.1\% \Delta k/k$ 로 나타났다. 평균 출력밀도를 높힘으로써 노심 평균 연소도를 200MWD/kg까지 증가시킬 수 있었으며 최대 피복관 중성자 조사량을 제외한 다른 노심 핵특성 인자들은 모두 설계목표를 만족하였다.

**Abstract**

A preliminary study was performed on the design parameters of a ultra long life core(ULLC) using metallic fuel for 500MWe liquid metal fast reactor. Once this core is initially loaded, it does not need fuel reloading over the reactor life time. The core has a radially homogeneous configuration with four different enrichment zones. From the examination of the core performance parameters by varying the core fissile enrichment and fuel volume fraction for each region, a reference ULLC core has been established. The burnup reactivity swing of the ULLC core has been found to be  $2.1\% \Delta k/k$  during 32 year core life. The core average discharge burnup has been increased up to 200MWD/kg with an enhanced core average power density. Other nuclear performance parameters except the cladding fast neutron fluence satisfy the design goals.

## 1. 서론

TRU 함유량이 높은 핵연료집합체가 장전되고 배출되는 고속로의 경우 이에 대한 처리문제가 많은 관심을 불러오고 있다. 특히 최근의 국내에서의 핵연료 재처리가 상당한 제약을 받게 됨으로써 이에 대한 대안마련이 시급한 문제이다. 이러한 점에서 대략 30년 이상의 주기길이를 갖는 초장주기 노심(ULLC : Ultra Long Life Core)은 한번의 장전 후 운전수명기간동안 운전되기 때문에 사용후 핵연료 저장과 재장전을 위한 설비가 필요없으며 재장전을 위한 재처리 과정이 필요없기 때문에 최근에 많은 연구가 이루어 지고 있다[1-2].

그러나 현재 연구되고 있는 대부분의 초장주기 노심은 초장주기 노심의 높은 증식비로 인한 높은 연소 결손반응도(Burnup Reactivity Swing)를 억제하고 운전기간 중 최대 출력밀도를 낮추기 위해 기존 출력밀도의 1/2 정도의 저출력 밀도 노심으로 구성되어있다. 따라서 일반적인 1000MWe급 노심보다 노심 부피가 3~4배 크고 30년의 핵연료 잔존기간에 비해 노심 평균 및 최대 연소도가 작으므로 경제적인 노심과는 거리가 멀다. 따라서 국내에서는 이러한 핵비확산성 및 경제성을 고려하여 높은 연소도와 30년 이상의 핵연료 잔존기간을 만족하면서 연소 결손반응도와 최대 출력밀도를 최소화하는 1000MWe급 초장주기 노심을 설계하여 주기길이 33년을 가진 노심의 가능성을 보였고[3] 출력에 따른 장주기 노심 가능성을 살펴보기 위하여 1000MWe, 500MWe, 300MWe 3가지 출력에 대하여 설계목표를 만족하는 고출력 장주기 노심을 설계하여 30년 장주기에 필요한 최소연료체적비는 300MWe 노심의 경우 0.53이상이며 다른 출력에서는 0.5이하에서 만족함을 보였으나 500MWe 노심의 경우 노심의 영역별 농축도를 분리시키지 않아 설계의 개선이 요구되었다[4].

따라서 본 연구는 기존에 설계되어진 500MWe 노심의 영역별 농축도를 분리시켜 연소 결손반응도 감소와 노심 내부에서의 과도한 국부 출력의 증가를 방지하였다. 기존 설계되어진 1000MWe 노심과 설계조건을 일치시키기 위하여 1000MWe 노심과 내부 블랭킷 및 연료 집합체와의 비를 일정하게 유지시킨 상태에서 평균 출력밀도를 1000MWe 노심의 평균 출력밀도  $94.70\text{W/cm}^3$ 의 10% 오차범위에서 유지시켰다. 일반적인 고속로의 평균 출력밀도를 유지하면서 주기길이와 연소도, 최대 출력밀도, 그리고 연소 결손반응도를 설계목표 이내로 유지하는데 중점을 두었다.

## 2. 계산 방법

노심 핵계산은 한국원자력연구소에서 고속로심 해석을 위해 사용하고 있는 종합 전산체제인 K-CORE 시스템을 사용하였으며 OECD NEA의 평가핵자료 JEF2.2로부터 NJOY코드의 처리과정을 거쳐 생산된 KAFAX-F22[5] 단면적 라이브러리를 사용하였다.

TRANSX코드[6]를 이용하여 자기차폐보정을 수행하고 KAFAX-F22 단면적 라이브러리로부터 영역별 온도에 해당하는 80군 균정수를 생산하였고, 이를 바탕으로 R-Z모델로 근사된 노심 모델에 대하여 TWODANT코드[7]를 통해 영역별 균중성자속을 계산하였다. 이렇게 계산된 80군 균중성자속을 가중합수로 하여 다시 TRANSX코드로 균축약 과정을 통해 최종적으로 DIF3D/REBUS코드[8,9]에 사용될 영역별 9군 유효 미시 단면적을 생산하였다.

노심 연소계산은 DIF3D/REBUS 코드를 통해 이루어졌다. 육각주 3차원 모델을 바탕으로 X-Y방향으로는 핵연료집합체를 하나의 노드로 축방향으로는 대략 24개 노드로 계산을 수행하였다.

## 3. 설계 목표

본 연구에서는 U-TRU-Zr의 3원 합금으로 구성된 금속연료를 사용하였으며 경수로 사용후핵연료로

부터 재처리된 TRU 연료[10]를 사용하였다. 금속연료는 상대적으로 밀도가 높고 구성물질로 감속물질 을 함유하고 있지 않기 때문에 산화물 연료나 탄화물 연료보다 경화된 중성자 스펙트럼을 얻을 수 있다. 따라서 다른 종류의 연료보다 증식특성이 뛰어나고 75% 정도의 희석밀도(Smeard Density)를 채용하였 을 때 높은 연소도에서도 연료의 건정성을 유지하는 것으로 알려져 있다. 따라서 오랫동안의 핵연료 잔 존기간을 위해 높은 증식비를 필요로 하는 고연소도 초장주기 노심의 연료로 금속연료가 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서 설정한 고연소도 초장주기 노심의 설계목표는 원자로 운전수명은 30년 이상이어야 하며 핵확산저항성을 향상시키기 위해 운전기간중 TRU를 함유하고 있는 핵연료집합체를 원자로 밖 으로 배출하지 않는다는 것이다. 또한 장주기노심이 가지는 저출력에서 벗어나 고연소인 노심 평균 연소도 200MWD/kg 이상을 만족하면서도 연소도에 따른 연소 결손반응도는 4%Δk/k 이하이며 최대 출력밀도는 400W/cm<sup>3</sup> 이하이어야 한다. 노심 평균 출력밀도는 90W/cm<sup>3</sup> 이상이어야 하며 핵연료 체 적비는 0.55 이하이어야 한다.

위에서 200MWD/kg 이상의 연소도는 기존의 고속로에 적용되어 왔던 연소도 기준을 넘어서는 양 으로서 현재까지는 금속연료의 경우 최대 국부 연소도가 200MWD/kg인 연소도까지 핵연료 건전성 이 유지된다고 알려져 있다. 핵연료 피복관은 최대 중성자 조사량 한도를 벗어나는 시점에서 피복 관 교체가 가능한 것으로 하였다. 이전에 연구되었던 초장주기 노심들이 대체적으로 저출력 노심으 로서 50W/cm<sup>3</sup> 정도의 노심 평균 출력밀도를 갖는 것에 비해 본 연구에서는 국내 개발 증식특성노심 [11] 정도의 노심 평균 출력밀도를 유지하도록 하였다.

핵연료집합체에서의 유로 확보와 피복관 및 집합체 덕트가 차지하는 체적비를 고려하여 핵연료 체적비에 대한 제한을 두었다. 노심설계의 참조노심은 노심 길이는 120cm 축방향 블랭킷 길이는 각 각 35cm로 설정하였다. 출력밀도는 1000MWe 노심의 출력밀도를 기준으로 하였고 내부 블랭킷과 외부 블랭킷, 핵연료집합체의 체적비를 출력에 비례하여 일정하게 유지시켰다.

#### 4. 참조노심 설정 및 노심설계인자 탐색

노심 설계 인자 탐색에 앞서 참조노심을 설정하였다. 위에서 언급한 바와 같이 국내 개발 증식특성노 심 정도의 노심 평균 출력밀도를 유지하였으며 노심 길이는 120cm 축방향 블랭킷 길이는 각각 35cm로 설정하였으며 반경방향으로는 전체 노심을 4개의 영역으로 분할하였다. 노심의 증식비를 높힘으로써 연 소 결손반응도를 감소시키고 주기길이를 연장하기 위해 영역 1을 내부 블랭킷으로 사용하였다. 그림 1 에 참조 노심의 반경방향 및 축방향 노심구성을 나타내었다.

노심 평균 농축도, 핵연료 체적비, 영역별 농축도에 대해서 설계 인자를 탐색하였다. 초기 장전되는 농축도는 노심의 증식특성을 좌우하는 변수로서 농축도가 크면 클수록 전체적인 전환비(Conversion Ratio)는 작고 주기기간 동안 변화가 크지 않기 때문에 연소에 따른 반응도 변화는 단조 감소하여 주 기초와 주기말 반응도 차이가 커지게 된다. 반대로 농축도가 작으면 작을수록 주기초의 전환비는 크고 주기말로 갈수록 단조 감소하는 경향을 보이게 되며 연소도에 따른 반응도 변화는 초기 높은 증식비에 의해 상승하다가 다시 감소하는 모습을 보이게 된다. 그러나 농축도가 좀더 작아질 경우 주기초 높은 증식비에 의해 초기 반응도 상승폭이 크기 때문에 연소 결손반응도는 커진다. 그러므로 최소의 연소 결손반응도를 보이는 최적점이 존재한다.

그림 2는 핵연료 체적비를 0.45로 고정하고 노심의 평균 농축도를 변화시켰을 때의 반응도 변화를 보여준다. 평균 TRU 농축도가 16% 이상에서는 초기 유효증배계수가 크게 나타나 연소 결손반응도

를 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 연소 결손반응도가 높지 않는 14%를 평균 TRU 농축도로 고정시킨후 핵연료 체적비를 증가시켜 최적의 핵연료 체적비를 구하였다. 그림 3은 핵연료 체적비를 0.45에서 0.55까지 변화시켰을때의 반응도 변화를 보여주고 있다. 전운전기간에 걸쳐 동일한 모양을 가지며 증가된 핵연료의 양으로 인하여 유효증배계수가 단조증가된 형태를 보인다. 그림 4는 최적 핵연료 체적비를 구하기 위하여 연소 결손반응도로 비교한 그림이다. 그림 14에서 보는바와 같이 핵연료 체적비가 0.5에서 최소 연소 결손반응도를 나타냄을 알 수 있다.

앞의 기본탐색을 바탕으로 핵연료 체적비를 0.5로 고정한후 노심의 평균 농축도를 변화시켰다. 평균 TRU 농축도를 10%에서 20%까지 2%간격으로 변화시켜 노심반응도의 변화를 관찰한 결과 그림 5에서 보는바와 같이 대부분의 농축도에서 주기길이 32년을 만족하는 것으로 나타났다. 최소 연소 결손반응도를 찾기 위해 농축도별로 연소 결손반응도를 조사한 결과 그림 6에서 평균 TRU 농축도 14%에서 최소연소 결손반응도를 보이는 것으로 조사되었다.

그림 7에 노심 평균 TRU 농축도 14%와 핵연료 체적비 0.5를 사용했을때의 노심의 각 영역이 보이는 출력양상을 나타내었다. 노심의 영역별 농축도가 일정할 때 주기초에서 영역 3이 가장 큰 출력 분율을 갖는 것으로 나타났다. 주기말에서는 대부분의 출력을 영역 1이 담당하는 것을 볼 수 있다. 노심 외곽에서 보다 노심 내부에서 증식비가 높은 점을 고려할 때 과도한 국부 출력을 방지하고 주기길이를 연장하기 위해서는 노심 최대 출력은 연소에 따라 노심 외곽에서 노심 내부로 이동해 나가는 것이 유리하기 때문에 각 영역에서의 농축도를 달리하여 최소 연소 결손반응도를 조사하였다. 노심중심 영역인 영역 3의 농축도는 14%로 고정시킨 다음 최외각 노심영역인 영역 4와 최내각 노심영역인 영역 2와의 차이를 일정하게 유지시켰다. 그림 8은 영역 2의 농축도를 10%에서 14%까지 변화시켰을때의 반응도의 변화를 나타내고 있다. 즉 영역 2와 영역 3의 농축도 차이가 1%~1.5% 차이를 보이게 하였다. 영역 2의 농축도가 낮아짐에 따라 유효증배계수의 하한치도 점점 낮아짐을 알 수 있다. 그림 9는 영역 2의 농축도에 초기 유효증배계수의 변화를 보여주고 있다. 그림 9에서 보는바와 같이 영역 2의 농축도가 낮아짐에 따라 초기 유효증배계수도 감소함을 알 수 있다. 그림 10은 최소 연소 결손반응도를 보이는 농축도를 표시하고 있다. 그림 10에서 보는바와 같이 영역 2의 농축도가 12%일 경우 최소값을 보인다. 농축도 12%는 주기길이 32년을 만족하며 최종적으로 농축도 12% 즉 영역 2와 영역 3이 농축도 2% 차이를 보이는 노심 영역 농축도로 결정하였다. 표 1은 설계목표를 만족하는 주요 설계 변수를 보여준다.

## 5. 초장주기 노심의 핵특성

최종으로 구성된 초장주기 노심의 핵특성 인자들을 표 2와 그림 11에 나타내었다. 32년의 주기길이를 만족하며 연소 결손반응도는 2.1%Δk/k로 나타났다. 노심의 증식비는 주기초, 주기중, 주기말에서 각각 1.33, 1.19, 1.01으로 나타났으며 주기말에서 2377.7kg의 Fissile Gain을 얻었다. 전체 노심 평균 연소도는 199.5MWD/kg이며 최대 방출 연소도는 403.9MWD/kg으로 나타났다. 이 값은 일반적인 30년 주기의 초장주기 노심의 평균 연소도 100MWD/kg와 비교되는 양이다. 초기 Fissile 장전량은 대략 3톤으로 나타났다. 수명 기간중 최대 출력밀도는 348W/cm<sup>3</sup>으로 설계 목표를 만족하고 있으며 최대 중성자 조사량은 1.6×10<sup>24</sup>n/cm<sup>2</sup>의 값을 보였다.

## 6. 결론

이전의 1000MWe급 고연소도 초장주기노심에 이어 출력에 따른 장주기 노심 가능성을 살펴보기 위하여 핵연료 농축도와 체적비에 따른 노심 특성 변화를 탐색하여 32년의 주기길이를 갖는 500MWe급 고연

소도 초장주기노심을 구성하였다. 노심의 평균 출력밀도를 높힘으로써 노심의 부피를 줄이고 평균 연소도를 200MWD/kg이상으로 증가시키면서도 연소 결손반응도 및 최대 출력밀도를 설계 목표 이내로 만족시킬 수 있었다. 연소 결손반응도를 감소시키기 위해 노심영역별 농축도를 변화시켰다. 현재의 설계기준인  $4 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$  을 초과하는  $1.6 \times 10^{24} \text{ n/cm}^2$  조사량 값은 수명기간중 피복관 교체율 통한 재가공 공정으로 극복할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제인 “액체금속로 설계기술 개발” 과제의 일환으로 수행하였다.

## 참고문헌

1. R. A. Doncals, et al., "Nonrefueling Liquid-Metal Fast Breeder Reactor," Trans. Am. Nucl. Soc. 33, 445 (1979).
2. S. Hattori, et al., "Feasibility Study of Ultra Long Life Core with Oxide and Carbide Fuel," Proc. Int. Conf. Fast Breeder Systems: Experience Gained and Path to Economical Generation, Pasco, Washington, 13-17, 8.8-1 (1987).
3. 유재운 외 2인, "1000MWe급 고연소도 초장주기 고속로심 설계를 위한 노심설계인자 탐색," '99 한국원자력학회추계발표회논문집 (1999).
4. 송훈 외 2인, "고연소도 초장주기 고속로심 설계를 위한 노심 타당성 연구," '2003 한국원자력학회 추계발표회논문집 (2003).
5. 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR-842/97, KAERI (1997).
6. R. E. MacFarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (1993).
7. 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).
8. K. L. Derstine, "DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion theory Problems," ANL-82-64, ANL (1984).
9. B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, ANL (1983).
10. "Fast Plutonium-Burner Reactors: Beginning of Life," Physics of Plutonium Recycling, Vol. IV, pp. 35, OECD/NEA (1995).
11. S. J. Kim, et al., "Development of a 150MWe LMR Conceptual Nuclear Design with Breeding Characteristics," Proc. of the KNS Spring Meeting, Pohang, Korea (May 1999).

표 1. 초장주기 노심(ULLC)의 주요 설계 변수

Power	500MWe/1375MWt
Power Density (W/cm <sup>3</sup> )	96
Core Configuration	Radially Homogeneous
Axial Fuel Length (cm)	120
Axial Blanket Length (cm)	35
Assembly Duct Pitch (cm)	21.2
Fuel Type	Metal
Zone2, 3, 4	U-TRU-Zr Alloy
Zone1	U-Zr Alloy
Smear Fuel Density (%TD)	75
Coolant Material	Sodium
Core Structural Material	HT9
Core Average TRU Enrichment (%)	14
Core TRU Enrichment (%)	
Zone1	0.2
Zone2	12
Zone3	14
Zone4	16
Volume Fraction	
Fuel	0.50
Structure	0.22
Coolant	0.28

표 2. 주요 노심 핵특성 인자

Cycle Length (yr)	32
Burnup Reactivity Swing (% Dk/k)	2.1
Breeding Ratio(BOL/MOL/EOL)	1.33/1.19/1.01
Max. Power Density (W/cm <sup>3</sup> )	348
Average Burnup (MWD/kg)	
Core Average	199.5
Zone1	187.9
Zone2	238.9
Zone3	213.1
Zone4	157.9
Peak Burnup (MWD/kg)	
Assembly Peak Burnup	243.9
Peak Discharge Burnup	403.9
Max. Fast Fluence (n/cm <sup>2</sup> )	1.5971E+24

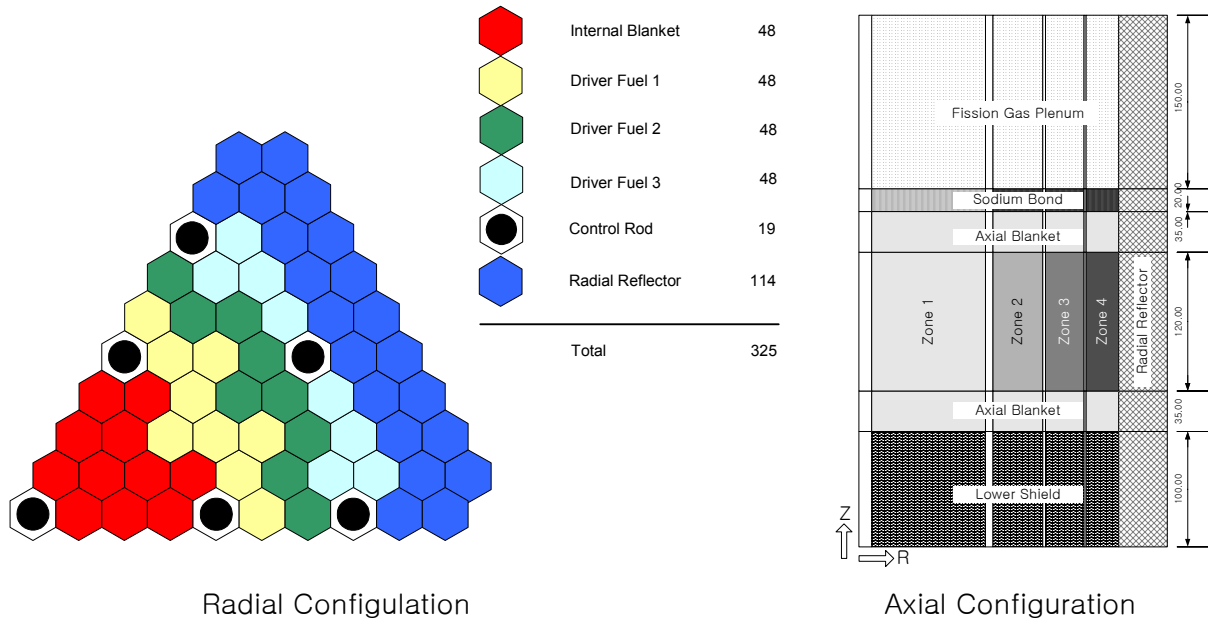


그림 1. 참조 노심의 반경방향 및 축방향 Layout

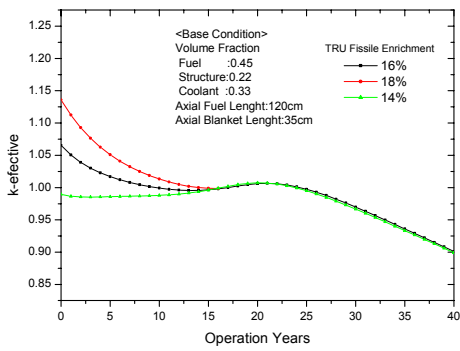


그림 2. 평균 농축도 변화에 따른 반응도 변화

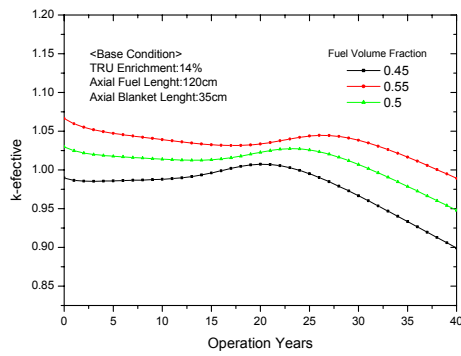


그림 3. 핵연료 체적비 변화에 따른 반응도 변화

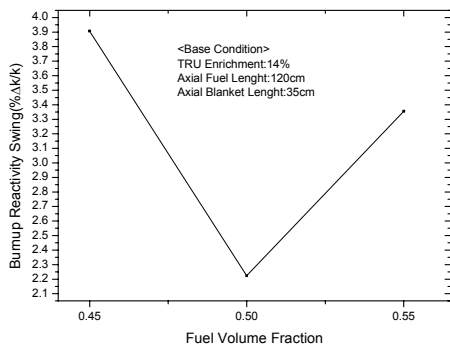


그림 4. 핵연료 체적비 변화에 따른 Reactivity Swing 변화

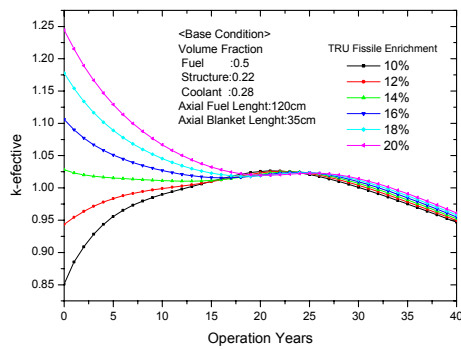


그림 5. 평균 농축도 변화에 따른 반응도 변화

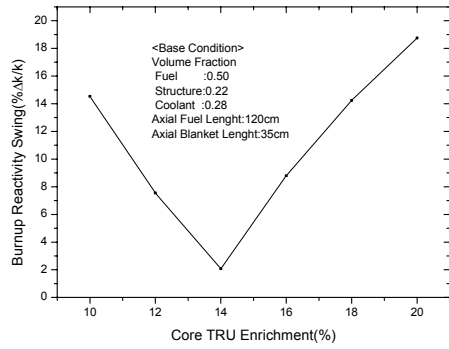


그림 6. 농축도 변화에 따른 Reactivity Swing 변화

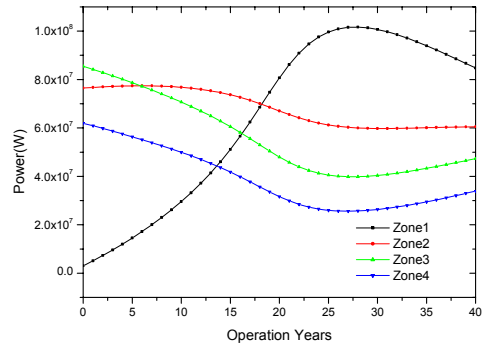


그림 7. 14%의 농축도와 핵연료 체적비 0.5에서의 각 영역별 출력 분율

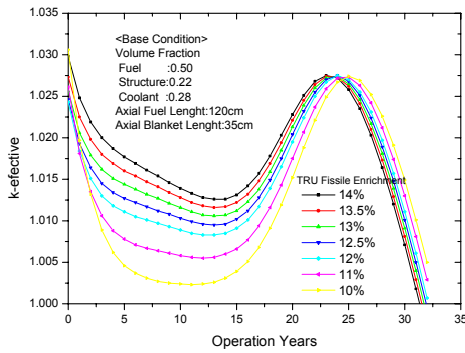


그림 8. 각 노심 영역별 농축도 변화에 따른 반응도 변화

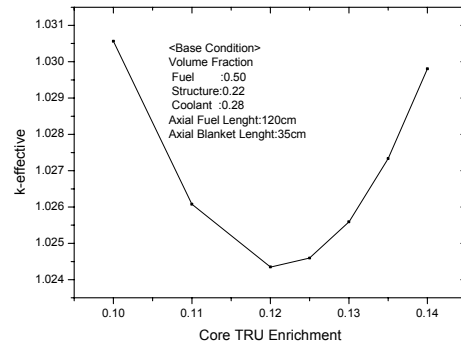


그림 9. 농축도 변화에 따른 반응도 변화

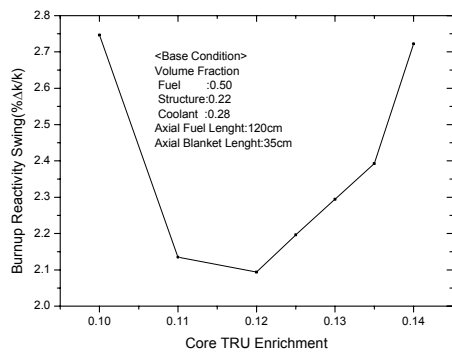


그림 10. 농축도 변화에 따른 Reactivity Swing 변화

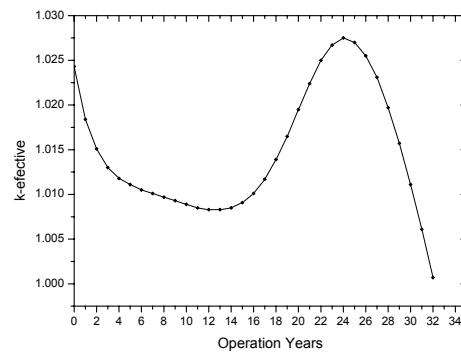


그림 11. 초장주기 노심의 반응도 변화