

BFS-73-1 임계실험 분석(II)

Analysis of BFS-73-1 Experiment (II)

송훈, 김영인, 박원석, 김영진

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한·러 공동으로 수행한 BFS-73-1 임계실험 측정자료를 대상으로 하여 현재까지 구축된 액체금속로 노심 설계용 종합전산체계인 K-CORE 시스템의 계산능력을 검증하기 위하여 계산 결과와의 비교·분석을 수행하였다. 계산적 분석에서는 육각주모형을 사용한 노달확산근사계산을 주 계산방법으로 사용하였다. 비교·분석 결과, 유효증배계수는 실험치와 0.3% 정도의 오차 범위 내로 예측가능함을 보여주었다. 핵분열율 분포의 경우, 노심 영역에서 계산치가 2% 오차 이내로 실험치와 일치하였으나 블랭킷 영역에서는 보다 많은 차이를 보였다. 노심 중앙에서의 반응률비 계산은 2% 오차 이내로, 유효지발중성자율 β_{eff} 계산 결과는 1% 내로 실험치와 일치하였다. 1차 섭동이론 계산방법을 사용한 샘플반응도가 계산에서는, 핵연료 물질인 U-235, U-238, Pu-239와 제어봉의 주요 구성 물질인 B-10에 대하여 대체로 실험치와 7% 오차 내로 일치하였으나 기타 물질에 대하여서는 많은 차이를 나타내었다. 그 밖에 도플러 효과는 8% 정도의 오차를 가지고 계산되었다. 다음 단계의 임계노심 구성에 대비하여 실시한 U-Zr 이원합금핵연료 대체 반응도가 계산에서는 18%와 15% 농축우라늄 핵연료 모두 다 실험치와 많은 차이를 보였으며, 이 원인은 아직 규명되지 않았다.

Abstract

As the first stage of critical experiment plan for developing the KALIMER core design, BFS-73-1 Experiment was performed in 1997, for which a uranium metal fueled benchmark core was constructed at the BFS-1 facility in IPPE. In this work, the K-CORE system, being used in the KALIMER conceptual core design, has been validated against BFS-73-1 Experiment by comparing the calculated results to the measurements.

The comparison results show that the effective multiplication factor can be predicted within 0.3 % error. The fission reaction rate distributions were calculated within 2% error in the core region, but were found to be in poor agreement in the blanket region. The calculated values of spectral indices at the core center and the effective delayed neutron fraction, β_{eff} , agreed with the measured ones within 2% and 1% errors, respectively. In the calculations of small sample reactivity worths, the first order perturbation method resulted in the calculated errors less than 7% for U-235, U-238, Pu-239 and B-10, but much higher calculated errors for the other materials. The calculated value for Doppler effect showed about 8% error. In the calculations of rod replacement worth for U-Zr binary fuels, with which the next benchmark experiment core is to be constructed, the calculated reactivity worths for 18% and 15% enriched fuel rods turned out to be deviated from the measured values beyond reasonable explanation. The reason for these unacceptable deviations has not been identified yet.

1. 서론

KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 노심설계 개발을 위하여 러시아 IPPE와 공동으로 수립한 노물리실험계획의 제 1단계로서, BFS-1 임계시설을 이용하여 우라늄금속연료 노심인 BFS-73-1 임계노심을 구성하여 벤치마크실험을 수행하였다[1]. 실험측정항목은 임계도를 포함하여 샘플 반응도가, 핵분열율 분포, 반응률비, β_{eff} (유효지발중성자율), 도플러 효과, 농축도와 조성에 따른 연료봉 반응도가 등이다. 이들 실험측정자료 일부를 대상으로 1 차적으로 구축된 액체금속로 노심핵설계용 종합전산체제인 K-CORE 시스템의 계산능력을 검증하기 위한 비교.분석작업을 수행한 바 있다[2]. 본 연구에서는 참고문헌[2]의 작업에 이어서 측정된 모든 실험자료에 대하여 비교.분석을 수행하였다. 참고문헌[2]에서는 6 군 계산에 중점을 두었지만 이번 논문에서는 기본 에너지군 구조를 개념설계에서 사용하고 있는 9 군으로 하여 계산하였으며, 계산결과를 비교.검증하고자 MCNP 코드를 사용한 비교.분석도 함께 수행하였다.

본 논문에서는 먼저 BFS-73-1 임계노심의 구성 및 실험 내용을 간략하게 설명한 다음, 실험자료의 계산적 해석을 위한 전산체제를 이용한 계산방법 및 계산모델링에 대하여 기술하였으며, 마지막으로 계산 결과를 실험결과와 비교. 분석하였다.

2. BFS-73-1 임계실험

BFS-73-1 임계노심은 KALIMER 초기노심(우라늄금속연료노심)이 가지는 중성자 스펙트럼을 포함한 노심내 기본 핵적 특성을 조사하고 액체금속로용 단면적 라이브러리 및 K-CORE 시스템의 계산능력을 검증하기 위하여 러시아 IPPE 소재 BFS-1 고속임계실험시설을 이용하여 구성되었다. 노심은 전체적으로 U-235 18.5%의 농축도를 가지는 단순구조의 균질노심으로서, 블랑켓은 감손 산화우라늄을 구성물질로 하여 노심 상하에는 축방향 블랑켓과 노심 주위에는 반경방향 블랑켓을 각각 두었다. BFS-73-1 임계노심의 전체적인 구성은 그림 1과 같으며, 계산을 위한 2차원 R-Z 계산모델과 3차원 계산모델을 그림 2와 3에서 각각 보이고 있다. 그림 2에서와 같이 노심은 4개의 서로 다른 물질영역으로 구성되어 있으며, 핵연료 영역인 영역 3(ZONE 3)은 영역 1(ZONE 1)과 농축도가 약간 다른 우라늄 펠렛으로 구성되어 있으나 핵특성은 거의 같다.

이 실험에서 분석대상 항목들에 대하여 적용한 측정방법을 간략히 살펴보면, 우선 핵분열율 분포는 원통형의 소형 fission chamber를 사용하여 측정하였다. 노심 중앙에서의 반응률비는 노심의 증식 특성을 판단하는데 중요한 U-238 포획 반응율과 Pu-239 핵분열율의 비(C28/F49)와 노심의 출력과 중성자 스펙트럼을 규정하는데 중요한 Pu-239 핵분열율과 U-235 핵분열율의 비(F49/F25), U-238 핵분열율과 U-235 핵분열율의 비(F28/F25)에 대하여 측정하였다. β_{eff} 는 C_r-252 선원방법과 Rossi- α 방법을 사용하여 측정하였다. 샘플반응도는 작은 샘플을 노심중앙에 삽입하여 그때 나타나는 반응도 차이를 측정하는 방법을 사용하였다. 도플러 효과 측정에는 U-238 샘플이 든 소형 가열용기를 노심중앙에 삽입하여 나타나는 반응도 차이를 측정하는 sample oscillation 방법을 사용하였다. 이외에도 KALIMER 우라늄 금속연료노심에서 고려되고 있는 2 개 농축도의 U-Zr 이원합금핵연료를 모사하기 위하여 지르코늄(Zr)을 첨가한 농축도가 18%와 15%인 2 개의 핵연료봉을 구성한 후 BFS-73-1 노심의 일부를 이 핵연료봉으로 대체시의 전체노심에 대한 반응도 차이를 조사하였다.

3. 실험자료 분석을 위한 계산체제 및 방법론

K-CORE시스템 내 핵계산시스템과 액체금속로 핵계산용 단면적 라이브러리 KFS(Korean Fast Set)[3]는 KALIMER 노심 핵설계와 특성 분석에 사용하기 위하여 구축 중에 있는 종합전산체제로서, 본 연구 계산에서는 현재까지 구축된 시스템을 사용하였다.

계산에 사용한 KFS는 기본 평가핵자료파일인 JEF-2.2를 기본으로 NJOY처리시스템을 사용하여 생산한 다군(중성자 80군, 감마 24군) 단면적 라이브러리로서 여러 온도에서의 무한회석 단면적과 Bondarenko 자기차폐인자들을 포함하고 있다. 쉘 계산에서는 유효단면적 생성모듈을 이용하여 공명자기차폐와 공간자기차폐를 보정하고, 균축약을 수행하여 BFS-73-1 임계노심을 구성하는 각 물질영역들의 80군과 9군 및 그 외의 다른 군구조의 균정수들을 생산하였다. 균축약을 위한 가중 중성자속은 80군 균정수를 사용한 거친망사형(coarse meshed) RZ모델에 대한 TWODANT[4]계산을 통하여 구하였다. 중성자속 계산은 9군 단면적세트를 주 단면적으로 사용한 확산이론계산을 기준 계산방법으로 사용하여, 육각주(hex-z) 모델에 대하여 거친 망사형 노달확산근사법을 적용한 DIF-3D 코드[5]를 사용하여 수행하였다.

샘플반응도가 계산에는 최근에 개발된 1차 섭동이론계산코드 PERT-K[6]를 사용하였다. 핵분열율 분포와 노심중앙에서의 반응률비는 DIF-3D 기본중성자속 계산에서 구하여진 중성자속과 유효단면적 계산 모듈에서 생산된 미시적 핵분열단면적을 사용하여 구하였다. β_{eff} 는 최근에 개발된 동특성 파라미터 계산코드인 BETA-K[7]를 사용하여 계산하였다. 이 계산에 필요한 지발중성자 방출수(yield number) 및 선행핵종 6 족(family)에 대한 자료 등은 평가핵자료 ENDF-VI의 자료를 사용하였다. 도플러 효과 계산은 샘플 영역이 온도 300 K와 가열온도인 900 K에 해당하는 유효단면적 세트를 각각 만든 후, DIF3D 계산을 통하여 각 경우에 대한 유효중배계수를 직접 구하여 그 차로써 직접 반응도가를 구하였다. 임계노심 일부가 농축도 18% 연료봉과 15% 연료봉으로 대체시의 반응도 변화는 기준 계산에서 구하여진 유효중배계수 값에서 각각의 연료봉으로 대체되었을 때 구하여진 유효중배계수 값의 차로써 반응도가를 구하였다. 한편, 상기의 계산 결과를 비교 검증하기 위하여 MCNP 코드를 이용하여 임계노심의 유효중배계수와 반응률비 등을 계산하였으며 특히 임계실험장치의 핵연료봉의 장전 특성 상 나타나는 비균질효과에 대하여 조사하였다.

4. 실험자료의 계산적 분석

각각의 측정항목에 대하여 K-CORE 시스템과 KFS를 이용하여 계산한 결과를 실험치와 비교하여 그 비교 결과를 표와 그림 4-8에서 각각 보이고 있다. 이러한 계산 결과는 9 군의 균정수를 사용한, 육각주 모델에 대한 노달확산근사계산을 기준 계산으로 하여 구하였다.

임계노심의 임계도를 나타내는 유효중배계수(k_{eff})는 1.003654로 계산되었다. 실험치인 1.0008 과 비교하면 계산치와 실험치의 비인 C/E가 1.00285로 구하여져 설정된 설계계산 목표오차 0.3%에 근접한 좋은 계산결과를 보여주었다. MCNP 코드를 사용하여 비균질 효과를 조사한 결과 표에서 보는 바와 같이 0.01%($\Delta k/k$)로서 이번 임계노심에서의 비균질성은 매우 작음을 확인하였다. 군 구조 효과인 경우, 균정수의 군 구조가 미세할수록 유효중배계수는 감소하며, 또한 어느 정도 군 구조가 미세하여지면 유효중배계수 크기 변화는 거의 없음을 알 수가 있으며, 그림 4는 이러한 경향을 보여주고 있다.

핵분열율 분포의 경우, U-235와 U-238의 핵분열율 분포 계산 결과를 축방향과 반경방향에 대한 실험치들과 비교한 결과를 표와 그림 5-8에서 각각 보이고 있다. 반경방향 분포를 비교하면, U-238 핵분열율 분포는

노심영역에서 실험치 보다 평균적으로 2% 정도 낮게 예측되었으며, 노심중심으로부터 멀어짐에 따라 반경방향 블랑켓 영역(영역 4)에서 평균 6% 정도의 차이를 보이고 있다. U-235 핵분열율 분포의 경우에는 노심영역(영역 1)에서 2%, 반경방향 블랑켓 영역(영역 4)에서 평균 11% 정도 실험치 보다 낮게 예측되었다. 한편, 축방향 분포의 경우, U-238 핵분열율 분포는 노심영역(영역 1)에서 평균 1% 차이를 보였으며, 이 차이가 증가하여 축방향 블랑켓(영역 2)에서는 평균 7% 정도 실험치 보다 낮게 예측되었다. U-235 핵분열율 분포는 노심영역(영역 1)에서 평균 1% 실험치 보다 낮게 예측되었으며, 축방향 블랑켓(영역 2)에서는 평균 2% 실험치 보다 낮게 예측되었다.

노심중앙에서의 반응률비에 대한 계산 결과를 보면 U-238과 U-235 핵분열율 비(F28/F25)의 경우, C/E(계산치/실험치)가 1.0178로 계산치가 실험치 보다 2% 정도 높게 구하여졌다. U-238 포획반응과 Pu-239 핵분열율 비(C28/F49)의 경우에는 C/E가 0.9796로 2% 정도 실험치 보다 낮게 구하여졌으며 Pu-239와 U-235 핵분열율 비(F49/F25)의 경우에는 C/E가 0.9875로 1% 정도 낮게 구하여졌다. MCNP 코드를 사용한 계산결과도 이와 유사한 오차범위에서 예측되었다.

반응도 변환인자인 유효지발증성자율(β_{eff})의 계산 결과는 C_f 선원방법의 경우 C/E가 1.03530로 계산치(C)가 실험치(E)보다 ~4% 크게 나타났으며, 반면에 Rossi- α 방법인 경우에는 C/E가 1.0074로 계산치가 실험치보다 ~0.7% 크게 나타났다.

샘플반응도가 계산 결과는 노심 핵연료 및 블랑켓을 구성하는 U-235, U-238의 경우는 C/E 값이 ~7% (7% : U-235, 3% : U-238) 내의 오차로 나타났다. 이에 반하여, 이외 기타의 샘플의 경우에는 C/E의 값에서 많은 차이를 보였으며 동일 핵종이라도 서로 매우 다른 경향을 보였다. 즉, Pu-239의 경우는 계산치가 실험치와 1% 오차 내로 일치하였으나, Pu-240의 경우에는 43% 정도로 많은 차이를 보였다. 도플러 효과 계산 결과는 C/E가 1.0801로 계산치가 실험치 보다 8% 크게 나타났다

핵연료봉 반응도가 계산결과는 표에서 보는 바와 같이 농축도 18% 연료봉에 대하여서는 C/E가 중심부분 위치(5-2-2)(그림 1 참조)에서는 6% 내로 일치하는 반면 노심 바깥 부분으로 이동함에 따라 C/E는 점차 감소하는 경향을 보여 노심 외곽인 위치 4-11-3 에서는 그 차이가 21%에 달한다. 농축도 15% 연료봉의 경우에는 농축도 18% 연료봉에 비해 C/E 값이 보다 큰 차이를 보였다. 그러나, 중심부분의 계산치가 다른 노심 외곽 지역에서의 계산치 보다 실험치와 보다 일치하는 경향을 보인다. 이와 같이 농축도 15% 연료봉에 대한 C/E 값이 상대적으로 큰 차이를 보이는 것은 농축도 15% 연료봉의 경우 농축도 18% 연료봉에 비해 측정된 반응도가 값이 상대적으로 작은 데 기인하는 것으로 추정되지만 정확한 원인은 아직 규명되지 않았다.

5. 요약 및 결론

한·러 공동으로 수행한 BFS-73-1 임계실험의 측정자료를 대상으로 하여 K-CORE 시스템의 계산능력을 검증하기 위하여 계산 결과와의 비교·분석을 수행하였다. 각각의 측정항목에 대한 계산적 분석에서는 육각주 모델을 사용한 노달확산근사계산을 기준 계산방법으로 사용하였다.

계산 결과와의 비교·분석 결과, 임계노심의 임계도를 나타내는 유효증배계수(k_{eff})는 1.003654로 계산되었다. 실험치인 1.0008 과 비교하면 계산치와 실험치의 비인 C/E가 0.00285로 계산되어 설정된 설계계산 목표오차 0.3%에 근접한 좋은 계산결과를 보여주었다. 핵분열율 분포의 경우는 U-235 및 U-238 핵분열율 분포가 모두 노심 핵연료 영역에서는 C/E가 평균 2% 오차 이내로 구하여졌으며, 블랑켓 영역에서는 C/E 값에서 보다

많은 차이를 보였다. 노심 중앙에서의 반응률비는 C28/F49와 F49/F25의 경우에는 C/E가 각각 2%, 1% 낮게 예측되었으며, 핵분열비인 F28/F25의 계산 결과는 C/E가 2% 크게 나타났다. 임계노심에 대한 β_{eff} 계산치는 1% 내로 실험치와 일치하였다. 샘플반응도가의 경우는 핵연료 물질인 U-235, U-238, Pu-239와 제어봉의 주요 구성 물질인 B-10에 대하여 대체로 C/E가 7% 오차 내로 일치하였으나 기타 물질에 대하여서는 많은 차이를 보였다. 도플러 효과는 C/E가 8% 크게 구하여졌다. U-Zr 이원합금 핵연료에서의 농축도와 지르코늄의 추가 조성에 따른 반응도 계산 결과는 18% 농축도 우라늄 연료봉의 경우는 중심부분에서 C/E가 6% 오차 내로 구하여졌으며, 15% 농축도 우라늄 연료봉의 경우에는 C/E가 많은 차이를 보였다.

BFS-73-1 벤치마크실험은 KALIMER 노심설계 개발을 위하여 수행한 제 1단계 실험으로서, 국내고유의 실험자료를 확보하였다는 데 그 의의가 있다. 금번 수행으로 얻어진 BFS-73-1 벤치마크실험에 대한 C/E(계산치/실험치) 비교, 분석 자료들은 향후 K-CORE 시스템을 검증하고 또한 보완, 개발해 나가는 데 의미있는 첫 번째 데이터베이스가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Report on Contract for Experimental Study on Metal Fueled Core Characteristics; "Results of Measurements on Benchmark Core of BFS-73-1 Critical Assembly," IPPE (June 1997).
- [2] 송훈 외 4인, "BFS-73-1 임계실험자료 분석," '98 춘계학술발표회 논문집, Vol. I, pp 70, 한국원자력학회 (1988).
- [3] 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR-842/97, 한국원자력연구소 (1995).
- [4] R. E. Alcouffe, et al, "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional, Diffusion-Accelerated, Neutron Transport," LA-10049-M, Los Alamos National Laboratory (Feb. 1990).
- [5] R. D. Lawrence, "The DIF-3D Nodal Neutronics Option for Two- and Three-Dimensional Diffusion Theory Calculations in Hexagonal Geometry," ANL-83-1, Argonne National Laboratory (Mar. 1983).
- [6] 김택겸 외 2인, "육각형 노심용 섭동이론 코드 개발," '98 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회(1988).
- [7] 김택겸 외 2인, "육각형 노심용 유효지발중성자 분율 계산 코드 개발," '98 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회(1988).

표 1. 측정 파라미터에 대한 계산치/실험치 (C/E) 결과

파라미터	계산치(C)	실험치(E)	C/E	비고
유효증배계수(k_{eff}) - DIF-3D (균질 모델) - MCNP (균질모델) - MCNP (비균질모델)	1.003654 0.99319 0.99306	1.0008	1.00285 0.99240 0.99227	기준계산 비균질효과 = 0.013% $\Delta k/k$
핵분열율 분포 - U-235 반경방향 노심(영역 1,3) 블랑켓(영역 4) - U-235 축방향 노심(영역 1) 블랑켓(영역 2) - U-238 반경방향 노심(영역 1,3) 블랑켓(영역 4) - U-238 축방향 노심(영역 1) 블랑켓(영역 2)			0.979 \pm 0.018 0.888 \pm 0.036 0.989 \pm 0.007 0.978 \pm 0.042 0.982 \pm 0.014 1.055 \pm 0.134 0.998 \pm 0.012 0.930 \pm 0.102	평균값 표기
노심중앙 반응률비 - C28/F49 - F49/F25 - F28/F25	0.1097 (0.1110) 1.1001 (1.1031) 0.0369 (0.0351)	0.112 1.114 0.0363	0.9796 (0.991) 0.9875 (0.9902) 1.0178 (0.967)	() MCNP 결과
샘플반응도가 ($\Delta k/k$) - U-235 - U-238 - Pu-239 - Pu-240(O ₂) - B-10 - Na-23 - CH ₂ - Am-241	2.4000E-5 -6.0000E-6 7.0800E-5 1.1600E-5 -1.1900E-5 9.0000E-7 2.3800E-5 -2.4000E-6	2.2468E-5 \pm 5.9635E-8 -6.1648E-5 \pm 2.2363E-8 7.1518E-5 \pm 1.9381E-7 8.1253E-6 \pm 7.4544E-8 -1.1770E-5 \pm 6.7090E-8 -3.8763E-7 \pm 0.0000E+0 3.2509E-5 \pm 1.1182E-7 -9.3180E-7 \pm 1.3418E-7	1.0682 \pm 0.0028 0.9733 \pm 0.0035 0.9900 \pm 0.0027 1.4276 \pm 0.0131 1.0110 \pm 0.0058 -2.3218 \pm 0.0000 0.7321 \pm 0.0025 2.5757 \pm 0.3709	
β_{eff} ($\Delta k/k$) - C _f source method - Rossi- α method	0.00745	0.00720 \pm 0.00027 0.00740 \pm 0.00005	1.0353 \pm 0.0388 1.0074 \pm 0.0068	
도플러 효과 ($\Delta k/k$)	-1.2077E-6	-1.1182E-6 \pm 6.7090E-7	1.0801 \pm 0.6481	
농축도, Zr 조성에 따른 U-Zr 연료봉반응도가($\Delta k/k$) - 15 % 농축도 - 18 % 농축도	-1.6629E-5 3.2297E-4	-2.2363E-5 \pm 1.4909E-6 3.4514E-4 \pm 8.1998E-6	0.7436 \pm 0.0496 0.9358 \pm 0.0222	중심위치(5- 2-2)에서의 값

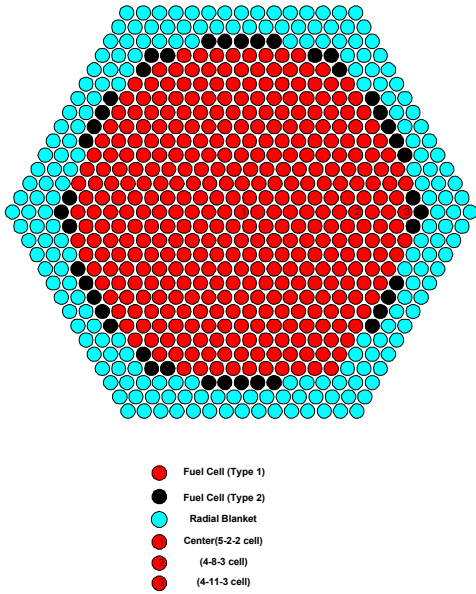
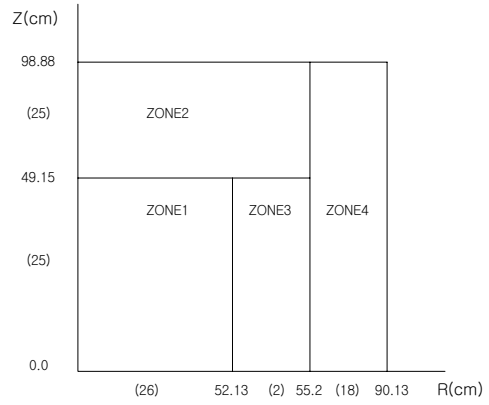
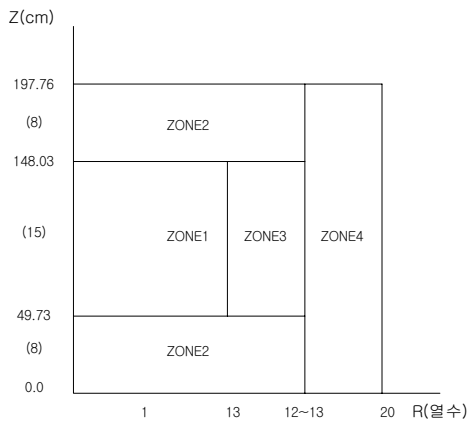


그림 1. BFS-73-1 임계노심 구성도



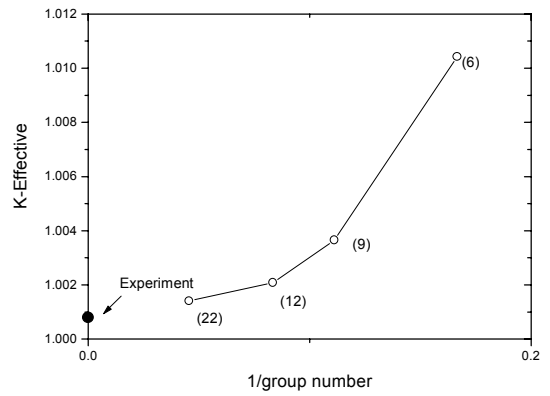
() 메쉬 수
노심 영역(zone1,3) 블랑켓 영역(zone2,4)

그림 2. R-Z 모델(기준모델)



() 메쉬수

그림 3. 육각주 (HEX-Z) 모델 (기준모델)



() 군 수

그림 4. 유효증배계수 비교(에너지군 구조 효과)

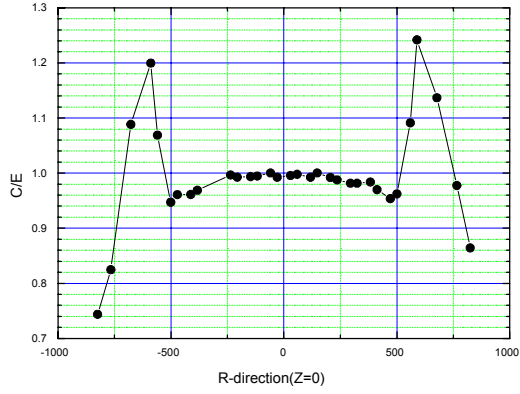


그림 5. U-238 핵분열율 분포(반경방향)

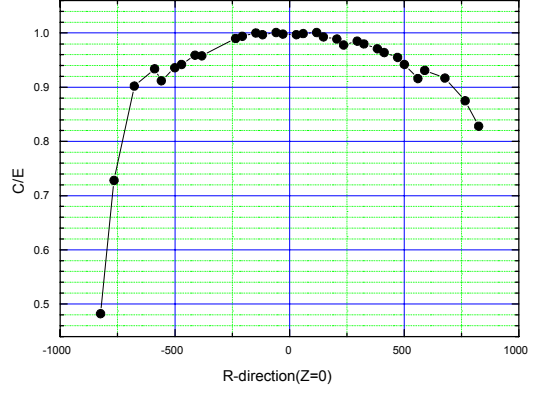


그림 6. U-235 핵분열율 분포(반경방향)

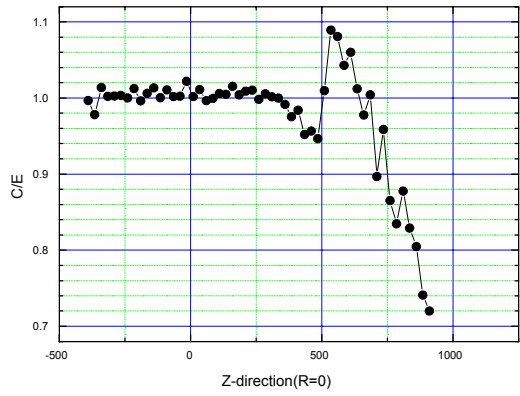


그림 7. U-238 핵분열율 분포(축방향)

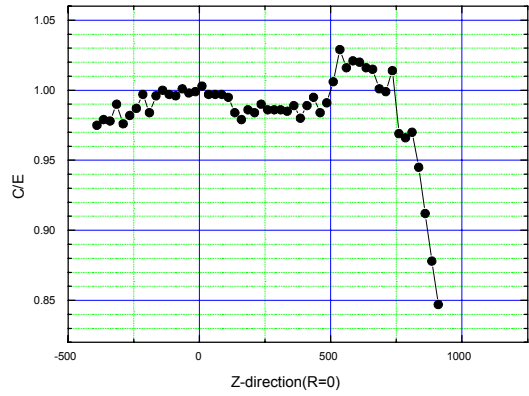


그림 8. U-235 핵분열율 분포(축방향)