

'98 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

BFS-73-1 임계실험자료 분석

송훈, 김영인, 김상지, 김택겸, 김영진

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한·러 공동으로 수행한 BFS-73-1 임계실험의 측정자료 일부를 대상으로 하여 1차 구축된 액체금속로 노심설계용 종합전산체제인 K-CORE 시스템의 정당성을 입증하기 위하여 계산 결과와의 비교·분석을 수행하였다. 계산적 분석에서 육각주모형을 사용한 노달확산근사계산을 주 계산방법으로 사용하였다. 비교·분석 결과, 유효증배계수는 계산치가 실험치와 1% 범위 내로 예측되었다. 우라늄 핵분열을 분포의 경우, 노심영역에서 C/E가 7% 차이 내로 구하여졌으며, 노심/블랑켓 접경영역과 블랑켓 영역에서는 보다 큰 차이를 보였다. 노심중앙에서의 반응률비 계산에서는 C/E가 2% 차이 내로 예측되었다.

1. 서론

국내개발 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor)의 노심설계 개발을 위하여 러시아 IPPE와 공동으로 수립한 노물리 실험계획의 제 1단계로서, BFS-1 임계시설을 이용하여 BFS-73-1 임계노심을 구성하여 벤치마크실험을 수행하였다[1]. BFS-73-1 임계노심은 KALIMER 초기노심으로 고려 중인 우라늄금속핵연료노심 특성을 모의하도록 구성되었으며, 실험측정항목은 임계도를 포함하여 샘플 반응도가, 핵분열을 분포, 반응률비, β_{eff} , 도플러 효과, 농축도와 조성에 따른 연료봉 반응도가 등이다. 본 연구에서는 최근 1차적으로 구축된 액체금속로 노심핵설계용 종합전산체제인 K-CORE 시스템의 정당성을 입증하기 위하여 이 실험에서 측정된 실험자료를 비교·분석하였다. 실험자료 분석은 현재 K-CORE 시스템이 계산기능면에서 아직 완전히 구축되어 있지 않기 때문에, 상기실험자료 중 유효증배계수와 핵분열을 분포, 노심중앙에서의 반응률비를 대상으로 수행하였다.

본 논문에서는 먼저 BFS-73-1 임계노심의 구성 및 실험내용을 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-73-1임계노심은 국내개발 KALIMER 초기노심(우라늄금속연료노심)이 가지는 중성자 스펙트럼을 포함한 노심내 핵적 특성을 조사하고 확보구축된 액체금속로용 단면적 라이브러리 및 K-CORE 시스템을 검증하기 위하여 러시아 IPPE 소재 BFS-1 고속임계실험시설을 이용하여 구성되었다. 노심 높이는 98.3cm

로서, 36% 농축도를 가진 금속우라늄 펠렛과 Na펠렛을 이용하여 전체적으로 U-235 18.5%의 농축도를 가지는 균질노심이다. 블랑켓은 감손 산화우라늄으로 구성하여, 노심 위와 아래에 약 50cm 높이의 축방향 블랑켓과, 노심 주위에 두께 약 35cm의 반경방향 블랑켓을 두었다. 노심구성에 사용된 기본단위셀은 2 개의 금속우라늄과 1 개의 감손 우라늄, 4 개의 Na 펠렛의 조합으로서, 임계노심에 사용한 연료 튜브는 16 개의 단위셀과 2 개의 축방향 블랑켓으로 구성되는 직경 50 mm의 튜브로 구성된다. BFS-73-1 임계노심의 전체적인 구성은 그림 1과 같으며, 2차원 계산을 위한 R-Z 모델을 그림 2에서 보이고 있다. 그림 2에서와 같이 노심은 4개의 다른 물질영역으로 구성되어 있으며, 영역 3(ZONE 3)은 영역 1(ZONE 1)과 약간 다른 우라늄 펠렛으로 구성되어 있으나 핵특성은 거의 같다.

본 연구에서의 분석대상항목들에 대한 측정방법을 살펴보면, 우선 핵분열을 분포는 직경 6mm, 길이 140mm의 원통형의 소형 fission chamber를 사용하여 측정하였다. 이 때, 핵분열을 측정장치에서 발생할 수 있는 간섭을 배제하기 위해 각 위치에서 5번씩 측정하였다. 노심중앙에서의 반응률비는 일반적으로 노심내의 중성자속 스펙트럼 특성을 파악하기 위하여 측정되는 값으로서, 일명 스펙트럼 지수라고도 불리운다. 측정은 중성자속 구배가 없으며 비등방성이 배제된 노심중앙에서 측정된다. 참조 핵분열율인 U-235의 핵분열율에 대한 U-238의 핵분열율의 비, 즉 F8/F5 지수는 소형 fission chamber와 여러 개의 시료의 핵분열 반응단면적을 동시에 측정할 수 있는 segment fission chamber, 그리고 고체 검출기(solid state detector)의 3 가지 측정 방법을 사용하여 각각 측정하였다. 특히, U-238의 포획율과 Pu-239 핵분열율의 비인 C8/F9의 측정에서는 Pu-239 절대 핵분열율 측정이 필요하다. 이를 위하여 silicon semiconductor를 이용한 α 계수방법으로 절대 원자수밀도를, Cf-252 chamber를 사용하여 계측기 효율을 각각 측정하였다. U-238 포획율 측정은 Pu-chamber 속에서 우라늄 박막을 조사시켜서 측정하는 박막조사방법(thin foil irradiation method)을 사용하였다.

3. 실험자료 분석을 위한 계산체제 및 방법론

K-CORE시스템 내 핵계산 시스템과 액체금속로 핵계산용 단면적 라이브러리 KFS(Korean Fast Set)[2]는 국내개발 액체금속로 KALIMER 노심 핵설계와 특성 분석에 사용하기 위하여 구축 중에 있는 종합전산체제로서, 본 연구 계산에서는 우선 1차로 구축된 시스템을 사용하였다. 현재 K-CORE 핵계산 시스템은 유효 단면적 생산, 중성자속 계산, 연소계산 모듈들로 구성되어 있으며, 각 모듈 시스템을 구성하는 전산코드들은 워크스테이션 시스템에 설치되어 있다.

계산에 사용한 KFS는 기본 평가핵자료 파일인 JEF-2.2과 ENDF/B-VI를 기본으로 NJOY처리시스템을 사용하여 생산한 다군(중성자 80군, 감마 24군) 단면적 라이브러리로서 여러 온도에서의 무한회석 단면적과 Bondarenko 자기차폐인자들을 포함하고 있다. 셀 계산에서는 유효단면적 생성모듈을 이용하여 공명자기차폐와 공간자기차폐를 보정하고, 군축약을 수행하여 BFS-73-1 임계노심을 구성하는 각 물질영역들의 80군과 6군 및 그외의 다른 군구조의 군정수들을 구하였다. 셀 계산에 사용한 각 영역에서 균질화된 원자수 밀도는 표 1에 수록하였다. 군축약을 위한 가중 중성자속은 80군 군정수를 사용, 2차원 거친망사형(coarse meshed) RZ모델에 대한 TWODANT[3]계산을 통하여 구하였다. 군축약 과정에서는 80군 셀 계산에서 구한 중성자속을 가중합수로 이용하여 6군 및 그 이외의 필요 군축약 단면적 세트를 ISOTXS파일 형식으로 구하였다. 중성자속 계산은 6군 단면적세트를 주 단면적으로 사용한 확산이론계산을 주 계산방법으로 사용하였다. 확

산이론계산은 육각주(hex-z) 모델에 대하여 거친 망사형 노달확산근사법을 적용한 DIF-3D 코드[4]를 사용하여 수행하였다.

4. 실험자료의 계산적 분석

상기 3개의 측정항목에 대하여 K-CORE 시스템과 KFS를 이용하여 계산한 결과를 실험치와 비교하였다. 그 비교 결과는 표 2, 3과 그림들 3 - 6에서 각각 보이고 있다. 여기에서 계산 결과들은 6군 단면적을 사용한 확산이론계산 결과를 참조계산 결과로 하고 있다.

임계도를 나타내는 유효증배계수(k_{eff})는, 표 2에서 보는 바와 같이 계산치가 실험치와 비교하여 0.5 % 정도 크게 예측되었다. 한편, 이 표에서 보면, 사용 단면적의 군수가 증가할수록, 즉, 군구조가 미세할수록, 유효증배계수는 감소하며, 또한 군구조가 어느 정도 미세하여지면 유효증배계수 크기 변화는 거의 없음을 알 수가 있다.

핵분열을 분포의 경우, U-235와 U-238의 핵분열을 분포 계산 결과를 축방향과 반경방향에 대한 실험치들과 비교하였으며, 이들 비교 결과는 그림들 3 - 6에서 각각 보이고 있다. 반경방향 분포를 비교하면, U-238 핵분열을 분포는 중심(내부노심 ; 영역 1)에서 실험치 보다 4% 정도 낮게, 이 보다 농축도가 다소 높은 외부 노심영역(영역 3)에서는 실험치 보다 최대 7% 정도 높게 각각 예측되었으며, 이러한 경향에 따라 노심중심으로부터 멀어짐에 따라 반경방향 블랑켓 영역(영역 4)에서 최대 24% 정도의 차이를 보이고 있다. U-235 핵분열을 분포의 경우에는 중심(내부노심 ; 영역 1)에서 5 %, 외부노심(영역 3)에서 최대 12%, 반경방향 블랑켓 영역(영역 4)에서 최대 52% 정도 실험치 보다 낮게 예측되었다. 한편, 축방향 분포의 경우, U-238 핵분열을 분포는 중심(내부노심 ; 영역 1)에서 5% 차이를 보였으며, 이 차이가 증가하여 축방향 블랑켓(영역 2)에서는 최대 44% 정도 실험치 보다 높게 예측되었다. U-235 핵분열을 분포는 중심(내부노심 ; 영역 1)에서 5% 실험치 보다 낮게 예측되었으며, 축방향 블랑켓(영역 2)에서는 최대 4% 실험치 보다 높게 예측되었다. 비교결과에 의하면, 핵분열 분포에 대한 모든 계산 결과들은 노심중심으로 멀어짐에 따라 실험치와의 차이가 증가하는 경향을 보이고 있다.

노심중앙에서의 반응률비에 대한 계산 결과는 표 3에서 실험치와 비교하고 있다. U-238과 U-235 핵분열을 비(F8/F5)의 경우, C/E가 1.009로 계산치가 segment chamber와 소형 fission chamber로 측정된 값보다 1% 정도 낮게 구하여졌으며, solid state detector 측정의 경우에는 계산값이 2% 정도 높게 구하여졌다. U-238 포획반응과 PU-239 핵분열을 비(C8/F9)의 경우에는 C/E가 0.988로서 1.2% 정도 실험치 보다 낮게 구하였다.

5. 요약 및 결론

한·러 공동으로 수행한 BFS-73-1 임계실험의 측정자료 일부를 대상으로 하여 1차 구축된 액체금속로 노심설계용 종합전산체계인 K-CORE 시스템의 정당성을 입증하기 위하여 계산 결과와의 비교·분석을 수행하였다. 비교분석항목은 유효증배계수, 우라늄핵분열 분포 및 노심중앙에서의 반응률비로서, 이들 항목에 대한 계산적 분석에서는 육각주 모델을 사용한 노달확산근사계산을 주 계산방법으로 사용하였다.

계산결과와의 비교·분석 결과, 유효증배계수는 본 계산시스템이 실험치와 1% 내로 예측하였다.

U-235와 U-238의 핵분열을 분포의 경우, 노심영역에서는 반경방향 및 축방향 모두 C/E가 7% 차이 내로 일치하였으나 노심/블랭킷 접경영역과 블랭킷 영역에서는 보다 큰 차이를 보였다. 이러한 C/E의 경향은 현재 고속임계실험결과들에서의 일반적인 경향으로서, 향후 K-CORE 시스템 사용을 기본으로 유효단면적 생산방법론 및 노심계산모델링의 개발 등을 통하여 현재의 차이를 좁혀 계산에 의한 예측 정도를 높이고자 한다. 노심중앙에서의 반응률비 (F8/F5)와 (C8/F9) 계산에서는 계산결과 모두 C/E가 2% 차이 내로 구하여졌다.

현재 개발 중인 확산이론계산코드 DIF-3D와 연계한 섭동이론계산모델이 설치 완료되면 본 연구에서 다루지 않은 샘플반응도가 및 도플러 효과에 대한 분석을 수행할 예정이다. 기존 계산방법론과 섭동이론계산방법론을 연계하여 좀더 다양한 계산모델링을 개발하고 이들의 결과 비교.분석을 통하여 구축 중인 액체 금속로 노심핵설계 종합전산체제 K-CORE 시스템 활용에 대한 종합적인 검증 및 정당성 입증자료를 생산할 계획이다.

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] J. D. Kim and C. S. Gil, "Nuclear Data Processing and Multigroup Cross Section Generation," KAERI, KAERI/RR-1196/95 (Dec. 1995).
- [3] 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).
- [4] R. D. Lawrence, "The DIF-3D Nodal Neutronics Option for Two- and Three-Dimensional Diffusion Theory Calculations in Hexagonal Geometry," Argonne National Laboratory, ANL-83-1 (Mar. 1983).

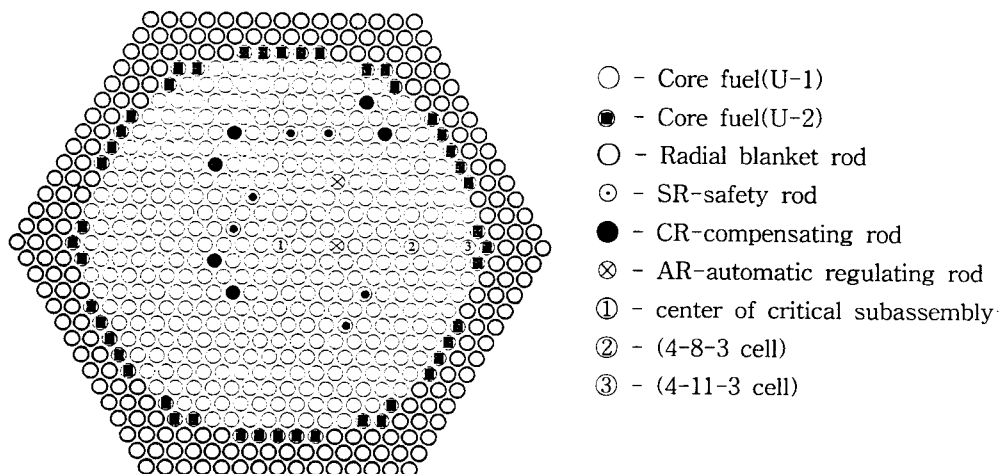


그림 1. BFS-73-1 임계노심 구성도

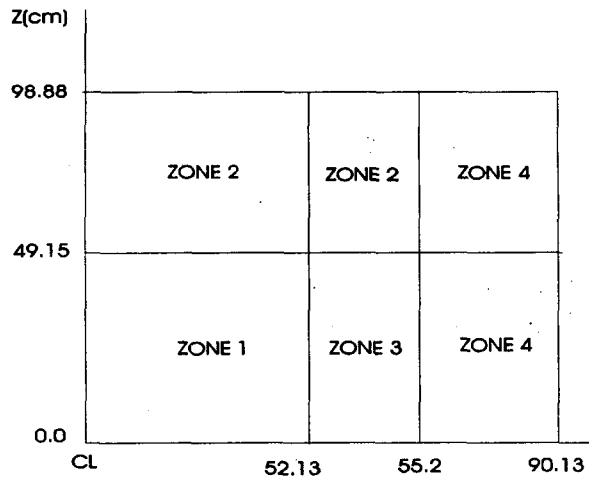


그림 2. BFS-73-1 임계노심(R-Z 모델)

표 1. 노심 영역별 균질화된 원자수 밀도 (Unit : barn⁻¹·cm⁻¹)

구성원소	영역1*	영역2	영역3	영역4
H	2.3317E-08 **	0.0000E+00	2.3317E-08	0.0000E+00
Na	1.0587E-02	0.0000E+00	1.0587E-02	0.0000E+00
C	6.1139E-05	4.1716E-05	6.1139E-05	5.4681E-05
Al	2.1577E-03	4.3078E-03	2.1577E-03	4.3578E-03
Ti	9.5051E-05	6.4855E-05	9.5051E-05	8.5012E-05
Cr	2.5422E-03	1.7346E-03	2.5422E-03	2.2737E-03
Mn	2.0050E-04	1.3681E-04	2.0050E-04	1.7933E-04
Fe	9.2580E-03	6.2373E-03	9.2580E-03	8.1734E-03
Ni	1.1883E-03	8.1077E-04	1.1883E-03	1.0628E-03
U-235	2.0300E-03	5.0299E-05	2.0429E-03	5.0310E-05
U-238	8.9090E-03	1.2366E-02	8.9252E-03	1.2369E-02
O	0.0000E+00	2.4833E-02	0.0000E+00	2.4838E-02

* 그림 2 참조

** 2.3317E-08 = 2.3317 x 10⁻⁸

표 2. 유효증배계수(k_{eff})

군(Group)	계산치(C)	실험치(E)	C/E
6	1.00544	1.0008	1.005
9	0.99842		0.998
12	0.99716		0.996
22	0.99643		0.996

표 3. 노심중앙에서의 반응률비

	측정방법	실험치(E)	계산치(C)	C/E
F8/F5	Segment chamber	0.0363 ± 0.0005	0.03663	1.009
	Small size chamber	0.0363 ± 0.0006		1.009
	Solid state detector	0.0374 ± 0.0015		0.979
C8/F9		0.1120 ± 0.0018	0.11069	0.988

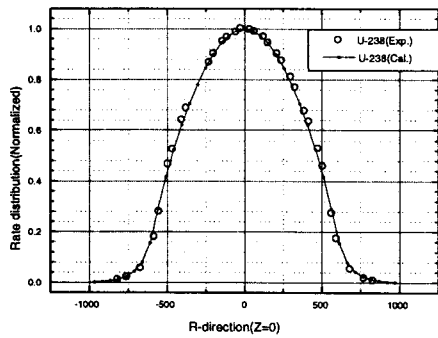


그림 3. U-238 핵분열율 분포(반경방향)

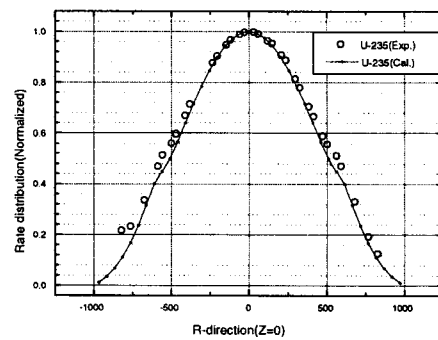


그림 4. U-235 핵분열율 분포(반경방향)

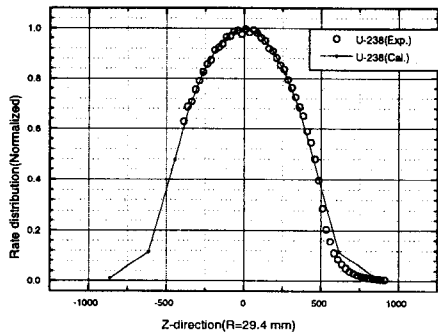


그림 5. U-238 핵분열율 분포(축방향)

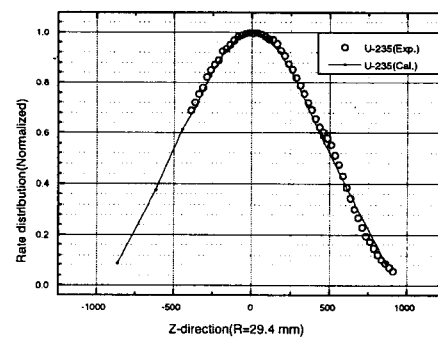


그림 6. U-235 핵분열율 분포(축방향)