'2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로용 150군 군정수 라이브러리 벤치마크 계산(II)

Benchmark Calculations of 150-group Cross Section Library for LMR' s

송훈, 김영균, 김영일
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 핵계산용 단면적 라이브러리의 액체금속로용 군정수 생산체제 개선작업의 일환으로 ENDF/B-VI Release 6 핵자료로부터 150군 KAFAX-E66 라이브러리가 생산되었다. 이를 이용하여 칼리머 노심 설계 개발을 위한 노물리 실험계획의 일환으로 행한 러시아 IPPE의 BFS 실험으로 얻어진 각종 반응도 실험치를 계산치와 비교.분석하였다. 또한 이전에 사용한 JEF-2.2와의 비교계산 및 군구조 효과도 아울러 조사하였다. 이전의 조사에서는 임계실험 적분량 추정에서의 ENDF/B-VI의 결과가 지금껏 사용해온 JEF-2.2의 결과와 잘 일치한 반면에 이번의 반응도가 해석에서는 약간의 차이를 보였다.

Abstract

For the purpose of diversification of selection of cross section library for neutron calculation of LMR, the 150 multi-group cross section library was generated from ENDF-VI release6. The set was then examined by analyzing measured reactivity quantities such as control rod worth, Doppler effect and sodium void effect for BFS critical assemblies that we obtained through the critical experiment plan for developing the KALIMER core design. The calculated results based on 9 group structure using the new set were also compared with those of JEF set based on the same group structure and compared with those of the same set based on 25 group structure to find the proper group structure. ENDF-VI-based set shows a small deviation in predicting measured integral quantities in comparison with the previous set and a small group effect.

1. 서론

지금까지 칼리머 노심설계 개발을 위한 노물리실험계획의 일환으로 러시아 IPPE의 BFS-1 임계시설을 이용하여 BFS노심을 구성, 벤치마크실험을 수행하여 실험자료를 분석한 바 있으며 또한 러시아로부터 실험자료를 받아 실험자료를 확보하여 분석하였다[1-2]. 분석결과 현재 사용하고 있는 기본 평가핵자료파일인 JEF-2.2를 기본으로 한 KAFAX-F22와 실험자료 분석을 위한 계산체제 및 방법론의 타당성을 입증한 바 있다. 최근에 액체금속로 핵계산용 단면적 라이브러리의 액체금속로용 군정수 생산체제 개선작업의 일환으로 ENDF/B-VI Release 6 핵자료로부터 150군 KAFAX-E66 라이브러리[3]가 생산되어 사용에 앞서 그 사용가능성을 입증할 필요성이 발생하였다.

본 논문에서는 검증계산에 사용된 breakeven 노심과 BFS 임계노심의 구성 및 실험내용을 간략하게 설명한

다음, 계산적 분석을 위하여 적용한 계산체제 및 계산방법론 등을 기술하였다. 이전의 적분량 임계실험자료와의 비교[4]에 이어 KAFAX-E66 사용 측정파라메터별 계산결과를 이전에 사용한 액체금속로 핵계산용 단면적 라이브러리 KAFAX-F22[5] 사용 계산결과와 비교한 후 새로이 생산된 KAFAX-E66 단면적 라이브러리의 사용 타당성을 조사하였다.

2. BFS 임계실험

BFS-75-1, BFS-73-1 임계노심은 칼리머 노심설계 개발을 위하여 러시아 IPPE와 공동으로 BFS-1 임계시설을 이용하여 임계노심을 구성 벤치마크실험을 수행하여 실험자료를 획득한 노심이며 BFS-55-2, BFS-55-1 임계노심은 러시아 IPPE와 계약에 의거 실험자료만을 획득한 노심이다. BFS-75-1 임계노심은 2농축 영역의 우라늄 금속연료노심의 벤치마크 실험을 위하여 1998년 러시아의 IPPE의 고속임계시설인 BFS-1 시설을 이용하여 구성되었다. 노심은 내부노심(IC:Inner Core)인 평균 농축도 15.11%의 LEZ(Low Enrichment Zone) 영역과 외부노심(OC:Outer Core)인 평균 농축도 19.96%의 HEZ(High Enrichment Zone) 영역으로 구성된 농축도 2영역 우라늄 금속연료 노심이다. 노심을 둘러싸고 있는 반경방향 블랭켓은 RB-1과 RB-2로 구성되는데 RB-1(Radial Blanket-1)은 U-238 펠렛(pellet)으로 구성된 블랭켓 연료봉으로 구성되며 RB-2(Radial Blanket-2)는 감손 산화우라늄 펠렛으로 구성된 블랭켓 연료봉으로 구성된다. 노심 상하부에는 높이 약 50 cm의 감손 산화우라늄 펠렛으로 구성된 축방향 블랭켓이 위치해 있다. BFS-73-1 임계노심은 BFS-1 고속임계실험시설을 이용하여 구성되었으며 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. 핵연료 영역인 농축도가 약간 다른 우라늄 펠렛으로 구성되어 있으나 핵특성은 거의 같다. BFS-55-2 임계노심은 농축도 2영역의 플루토늄 금속연료노심의 벤치마크를 위한 노심이다. 노 중심부분은 지르코늄이 40% 정도 함유한 연료봉으로 구성되며 바깥노심은 BFS-55-1 임계노심과 동일하다. BFS-55-1 임계노심은 1987년 액체금속 연료로 구성된 전형적인 액체금속로를 조사하기 위한 노심이다. 각각의 임계노심의 대략적인 모습을 그림 1에서 보인다. 실험항목으로 BFS-75-1 임계노심인 경우 임계도, 핵분열율 분포, 반응률비, 소듐보이드, 제어봉 반응도가, 샘플반응도가, 도플러 효과로 구성되며 BFS-73-1 임계노심에서는 임계도, 샘플반응도가, 핵분열율 분포, 반응률비, 유효지발중성자율, 도플러 효과, 농축도와 조성에 따른 연료봉의 반응도가로 구성된다. BFS-55-2 임계노심은 반응률비, 소듐보이드, 샘플반응도가로 구성되며 BFS-55-1 임계노심은 임계도, 핵분열율 분포, 반응률비, 소듐보이드, 유효지발중성자율, 샘플반응도가로 구성된다. Breakeven 노심은 증식특성을 보유하는 다양한 노심 설계개념을 개발하려는 요구에 의하여, 재순환 평형핵연료 주기에서 fissile 핵연료 물질의 외부공급이 필요없이 자급자족할 수 있으며 증식비 1.05 정도의 목표로 설계한 노심으로 그림 2에서 대략적인 노심모습을 보인다.

3. 실험자료 분석을 위한 계산체제 및 방법론

계산에 사용한 액체금속로 핵계산용 중성자 단면적 라이브러리는 KAFAX-E66, KAFAX-F22 두 종류이다. KAFAX-F22는 1997년에 개발되었으며 기본 평가핵자료파일인 JEF-2.2를 사용한 중성자 80군과 광자 24군으로된 고속로용 다군 단면적 라이브러리로서 그간 액금로 KALIMER 노심 설계해석은 물론 차폐설계, 임계실험 해석이나 각종 연소로계산에 널리 사용되어왔다. 그러나 보다 새로운 기초핵자료나 상세한 군구조의 필

요성이 대두되어 중성자 군구조를 150군으로 세분화하고 광자의 군구조를 12군으로 축조한 새로운 라이브러리를 ENDF/B-VI Release 6 자료로부터 생산하였다(KAFAX-E66). 셀 계산에서는 유효단면적 생성모듈을 이용하여 공명자기차폐와 공간자기차폐를 보정하고, 군축약을 수행하여 BFS 임계노심을 구성하는 각 물질영역들의 9군 및 25군 군구조의 군정수들을 생산하였다. 군축약을 위한 가중 중성자속은 150군, 80군 군정수를 사용한 거친망사형(coarse meshed) RZ모델에 대한 TWODANT[6]계산을 통하여 구하였다. 반응도가 계산은 9군과 25군 단면적세트를 주 단면적으로 사용한 확산이론계산을 기준 계산방법으로 사용하여, 육각주(hex-z) 모델에 대하여 거친 망사형 노달확산근사법을 적용한 DIF-3D 코드[7]를 사용하여 수행하였다.

4. 계산결과 및 분석

4.1 제어봉 반응도가

제어봉 반응도가 측정은 노심 중심부분에서의 제어봉 구성물질에 대한 반응도가 조사와 제어봉의 위치에 따른 반응도가 실험으로 나눌 수 있다. 노심 중심부분에서의 제어봉 구성물질에 대한 실험은 총 5개의 실험으로 구성되며 실험에 사용된 제어봉의 구성물질은 표 1 아래에 표시하였다. 제어봉 위치에 따른 실험은 구성물질 1에 해당되는 B_4C(natural)를 사용하여 그림 3에 표시된 위치 8과 위치 9에서 수행하였다. 또한 제어봉의 ring 효과를 보기 위하여 제어봉 구성물질 5를 사용하여 4가지 실험이 진행되었다. 즉 한 개의 제어봉을 사용하여 위치 1과 위치 2에서, 위치 1과 위치 4에서 두개의 제어봉, 위치 1, 3, 5에서 세 개의 제어봉, 위치 1에서 6까지 제어봉 6개를 사용하여 각각 실험이 진행되었다. 제어봉 반응도가 계산은 제어봉이 삽입시켜 변경된 단면적 세트를 가지고 직접 유효증배계수 계산을 하여 십입전과 삽입후의 유효증배계수의 차로부터 제어봉 반응도가를 구하였다.

DIF-3D 코드와 JEF-2.2 핵평가자료를 이용하여 생산된 KAFAX-F22 라이브러리를 9군으로 축약한 군정수(이하 JEF(9g)로 명명함)와 ENDF/B-VI 핵평가자료를 이용하여 생산된 KAFAX-E66 라이브러리를 9군 및 25군으로 축약한 군정수(이하 ENDF(9g), ENDF(25g)로 명명함)를 사용하여 계산한 결과를 표 1에서 각각 보이고 있다. 표에서 보면 단일 제어봉을 사용한 실험치와의 비교에서는 ENDF(9g)가 JEF(9g)에 비해 1%정도 우수함을 보인다. 그러나 반대로 여러 개의 제어봉을 사용한 실험치와의 비교에서는 JEF(9g)가 ENDF(9g)에 비해 1%정도 우수함을 보인다. 중심부분의 제어봉 실험치와의 비교에서는 JEF(9g)가 3%정도 ENDF(9g)에 비해 우수하였고 군구조 효과의 경우에는 대체적으로 3%정도 우수함을 보였다.

이상의 결과를 보면 다소간의 차이를 보이지만 대체적으로 1~3%정도 JEF의 경우가 우수한 것으로 보이지만 그 효과의 크기면으로 보면 거의 차이점은 보이지 않았다.

4.2 도플러 효과

도플러 효과는 핵연료 샘플의 온도가 상승함에 따라 공명영역 확장으로 인한 공명 포획율의 증가로 인해 노심 내 음의 반응도가 삽입되는 현상이다. 도플러 효과 측정은 측정 대상의 작은 샘플을 주기적으로 노심에 삽입하거나 추출함으로써 삽입이나 추출로 인하여 발생하는 반응도의 차이(변화량)를 구하는 방법(sample oscillation method)을 사용하였다. 도플러 효과를 정확하게 계산하기 위하여서는 측정 시 삽입된 샘플

을 정확하게 모사하는 계산모델을 생각해야 한다. 본 연구에 사용된 노달 HEZ-Z 옵션은 반경방향의 메쉬크기가 고정되어 있어서 축방향으로의 메쉬크기 변화만이 가능하다. 따라서 총 샘플의 체적, 즉 샘플 내 총반응 원자수가 보존되도록 축방향의 메쉬크기만을 변화시킨 샘플영역을 가정하였다. 계산은 앞서의 유효단면적 계산모듈인 TRANSX 코드를 이용하여 샘플 영역의 온도가 300 K와 가열온도인 900 K에 해당하는 유효단면적 세트를 각각 만들었다. 이 유효단면적 세트를 사용한 DIF-3D계산을 통하여 각 경우에 대한 유효증배계수를 직접 구하여 그 차로써 직접 반응도를 구하는 직접계산방법을 사용하였다. 샘플내장용기인 스테인레스강 통의 정확한 제원을 알지 못하기 때문에 본 계산에서는 스테인레스강 통 구성물질 원소들과 측정하려는 원소 모두 900 K로 가열하는 것으로 가정하고 계산하였으나 이러한 계산모델링의 제약성은 본 분석 결과에 다소 영향을 미치리라고 생각된다.

표 3에 도플러 효과의 실험치와 계산치의 비교결과를 보인다. 표에서 보면 BFS-75-1 노심의 UO_2 경우 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.1288으로 JEF(9g)의 비로 보면 7%정도 ENDF(9g)가 JEF(9g)에 비하여 우수한 것으로 보인다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.8093으로 ENDF(9g)의 비로 보면 45%정도 군구조 효과가 있는 것으로 보인다. ENDF(25g)과 JEF(9g)의 차이가 0.9381로 JEF(9g)의 비로 보면 50%정도로 차이를 보인다. NpO_2의 경우 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.1855으로 JEF(9g)의 비로 보면 43% 정도 JEF(9g)가 ENDF(9g)에 비하여 우수한 것으로 보인다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.0807으로 ENDF(9g)의 비로 보면 33%정도 군구조 효과가 있는 것으로 보인다. ENDF(25g)과 JEF(9g)의 차이가 0.0124로 JEF(9g)의 비로 보면 61%정도의 차이를 보인다. BFS-73-1 노심의 UO_2 경우 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.0712으로 JEF(9g)의 비로 보면 7%정도 ENDF(9g)가 JEF(9g)에 비하여 우수한 것으로 보인다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.9713으로 ENDF(9g)의 비로 보면 96% 차이를 보인다. ENDF(25g)과 JEF(9g)의 차이가 1.0425로 ENDF(25g)의 비로 보면 97%정도로 차이를 보인다.

이상의 결과를 보면 다소간의 차이를 보이지만 대체적으로 ENDF/B-VI 경우가 우수한 것으로 보인다. 그림 4의 breakeven 노심의 계산결과에서는 서로 다른 라이브러리를 사용한 효과가 크게 나타나고 있다.

4.3 소듐기화

고속로에서 소듐기화 현상은 원자로의 안전성 측면에서 매우 중요하다. 실험측정은 내부노심 중심부분,내부노심 축방향부분, 반경방향 외곽부분 등 여러가지 경우를 고려하여 측정하였다. 측정방법은 소듐기화를 모의하기 위하여 소듐펠렛을 소듐이 제거한 empty box로 교체하여 수행하였다. 소듐보이드 반응도 계산방법은 소듐이 기화된 상태에 대한 단면적 세트를 사용하여 소듐이 기화된 상태에 대하여 직접 계산하는 방법과 1차 근사섭동방법 그리고 정확한 섭동방법으로 크게 나눌 수 있다. 1차 근사섭동방법의 경우 소듐기화 변화에 따른 효과를 간단하고 효율적으로 구할 수 있으나, 다량의 변화의 경우에는 정확하게 소듐이 기화할 때 중성자 스펙트럼 경화현상에 의하여 영향을 받는 단면적의 변화 및 이에 따른 스펙트럼 변화를 고려할 수 없기 때문에 이번 계산에서는 섭동이 발생하지 않은 초기상태의 단면적 세트와 섭동이 발생한 상태의 단면적 세트를 이용하여 중성자속 계산을 수행한 후 각각의 중성자 속 계산에서 나타난 유효증배계수의 차로써 소듐기화 반응도가를 구하는 직접계산방법을 사용하였다.

표 3에 소듐기화 실험치와 계산치와의 비교결과를 보인다. 표에서 나타난 결과는 모두 중심부분에서 소듐

기화인 경우이다. 중심부분을 제외한 부분은 계산치와의 차이가 너무 크게 나타나 이번 비교에서는 제외하였다. 표에서 보면 BFS-75-1 노심의 경우 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.2491으로 JEF(9g)의 비로 보면 7% 정도 JEF(9g)가 ENDF(9g)에 비하여 우수한 것으로 보인다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.5443으로 ENDF(9g)의 비로 보면 16%정도 군구조 효과가 있는 것으로 보인다. ENDF(25g)과 JEF(9g)의 차이가 0.2952로 JEF(9g)의 비로 보면 9%정도로 차이를 보인다. BFS-55-2 노심의 경우 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.2513으로 JEF(9g)의 비로 보면 17%정도 JEF(9g)가 ENDF(9g)에 비하여 우수한 것으로 보인다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.2637으로 ENDF(9g)의 비로 보면 18%정도 군구조 효과가 있는 것으로 보인다. ENDF(25g)과 JEF(9g)의 차이가 0.0124로 JEF(9g)의 비로 보면 1%정도로 서로 일치하는 것으로 보인다. BFS-55-1 노심의 경우 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.117으로 JEF(9g)의 비로 보면 9%정도 JEF(9g)가 ENDF(9g)에 비하여 우수한 것으로 보인다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.002으로 ENDF(9g)의 비로 보면 1%미만으로 거의 영향이 없다. ENDF(25g)과 JEF(9g)의 차이가 0.119로 ENDF(25g)의 비로 보면 9%정도의 차이를 보인다.

이상의 결과를 보면 다소간의 차이를 보이지만 대체적으로 소듐기화 효과는 군구조의 영향을 받으며 JEF 2.2 9군과 ENDF/B-VI 25군의 결과가 거의 같은 크기를 보인다. 이러한 경향은 그림 5의 breakeven 노심의 계산결과에서 보는 바와 같이 중심부 즉 drive fuel 부분의 소듐기화에서 계산치에서 보는 바와 같이 JEF 2.2 9군과 ENDF/B-VI 25군 계산치가 거의 같은 크기를 가짐을 알 수 있다.

4.4 유효지발중성자분율

실험에서 구하여지는 모든 반응도가들은 대상노심의 유효지발중성자율 β_{eff} 의 상대적인 비(ρ / β_{eff})로써 구하여진다. 따라서, 계산에서 구한 반응도와 실험에서 구하여지는 반응도를 비교하기 위하여는, 실험대상노심에 대한 직접적인 변환 파라메터인 β_{eff} 값의 결정이 매우 중요하다. 임계실험노심의 유효지발중성자분율(β_{eff})의 측정방법은 크게 나누어서 2 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 노심에 변화에 따른 반응도 변화를 측정하여 값을 유추하는 방법인데 대표적인 것으로 Cf-252 소스를 사용하는 방법이다. 두 번째는 직접 핵분열에서 발생하는 중성자 신호를 계측하는 방법으로서 중성자를 측정하는 방법 및 계측된 중성자 수를 계산하는 방법에 따라 Rossi-α, varience-to-mean, covarience-to-mean 방법 등이 있다. 이번 실험에는 Cf –252 소스방법과 Rossi-α방법을 사용하여 측정하였다. 유효지발중성자율 계산코드인 BETA-K[8]를 사용하여 계산을 수행하였다. BETA-K로 β_{eff} 를 계산하기 위하여서는 먼저 중성자속과 수반중성자속이 필요하며, DIF-3D계산을 통하여 필요한 중성자속과 수반 중성자속을 구하였다. β_{eff} 계산에 필요한 지발중성자 방출수(yield number) 및 선행핵종 6 족(family)에 대한 자료 등은 평가핵자료 ENDF-VI의 자료를 사용하였다.

표 4에 유효지발중성자분율에 대한 실험치와 계산치와의 비교결과를 보인다. 표에서 BFS-73-1 노심의 Cf source pseudo reactivity 방법에 의한 실험치와의 비교에서는 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.0031으로 ENDF(9g)의 비로 보면 0.2%정도로 거의 차이점이 없다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.0036으로 ENDF(9g)의 비로 보면 0.3%정도로 효과는 미미하다. Rossi-alpha 방법인 경우 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.0029으로 ENDF(9g)의 비로 보면 0.3%정도로 거의 차이점이 없다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.0035로 ENDF(9g)의 비로 보면 0.3%정도 차이를 보인다. BFS-55-1 노심의 Cf source pseudo reactivity 방법에 의한 실험치와의 비교에서는 JEF(9g)와 ENDF(9g)의 차이가 0.0019으로

JEF(9g)의 비로 보면 0.2%정도 차이를 보인다. 군구조 효과의 경우 ENDF(9g)와 ENDF(25)g의 차이가 0.0062으로 ENDF(9g)의 비로 보면 0.6%정도로 효과는 미미하다.

이상의 결과를 보면 유효지발중성자분율은 서로 다른 라이브러리를 사용한 효과 및 군구조 효과는 큰 영향이 없는 것으로 보인다. Breakeven 노심의 계산결과에서는 서로 다른 라이브러리를 사용한 효과가 조금 보인다.

5. 결론

액체금속로 핵계산용 단면적 라이브러리의 액체금속로용 군정수 생산체제 개선작업의 일환으로 ENDF/B-VI 핵자료로부터 150군 KAFAX-E66 라이브러리가 생산되었다. 이를 이용하여 breakeven 노심 및 러시아 IPPE의 BFS 실험으로 얻어진 반응도가를 계산하고 실험치와 비교. 분석하였다. 또한 이전에 사용한 JEF-2.2와의 비교계산 및 군구조 효과도 아울러 조사하였다

조사결과에 따르면 이전의 적분량 추정에서는 ENDF/B-VI의 결과는 지금까지 사용해온 JEF-2.2의 결과와 잘 일치한 반면에 이번의 반응도가 실험치와의 비교에서는 다소 차이를 보였다. 제어봉 반응도가의 경우는 큰 차이점을 가지지 않은 반면에 소듐기화 효과는 군구조의 영향을 받으며 JEF 2.2 9군과 ENDF/B-VI 25군의 결과가 거의 같은 크기를 보였다. 도플러 효과의 경우는 ENDF/B-VI경우가 다소 우수한 것으로 보이며 유효지발중성자분율은 큰 차이점을 발견할 수 없었다.

감사의 글

이 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기 사업의 지원으로 수행되었읍니다.

참고문헌

[1] H. Song, et al, "Evaluation of Core Nuclear Analysis for LMR using Measured Physics Parameters of BFS-73-1 Critical Assembly", Annals of Nuclear Energy, Vol. 27(2000).

[2] 송훈 외 2인, "BFS-75-1 임계실험 분석", KAERI/TR-1786/2001, 한국원자력연구소 (2001).

[3] 김정도, 길충섭, "KAFAX-E66: KALIMER 우라늄 금속연료 노심설계를 위한 중성자 150군 및 광자 12군 다군 단면적 라이브러리", NDL-23/01, 한국원자력연구소 (2001).

[4] 송훈 외 1인, "액체금속로용 150군 군정수 라이브러리 벤치마크 계산", 2001 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (2001).

[5] 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증", KAERI/TR-842/97, 한국원자력연구소 (1995).

[6] 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).

[7] 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).

[8] 김택겸 외 4인, "유효지발중성자분율 계산코드, BETA-K 개발", KAERI/TR-1120/98, 한국원자력연구소 (1998).

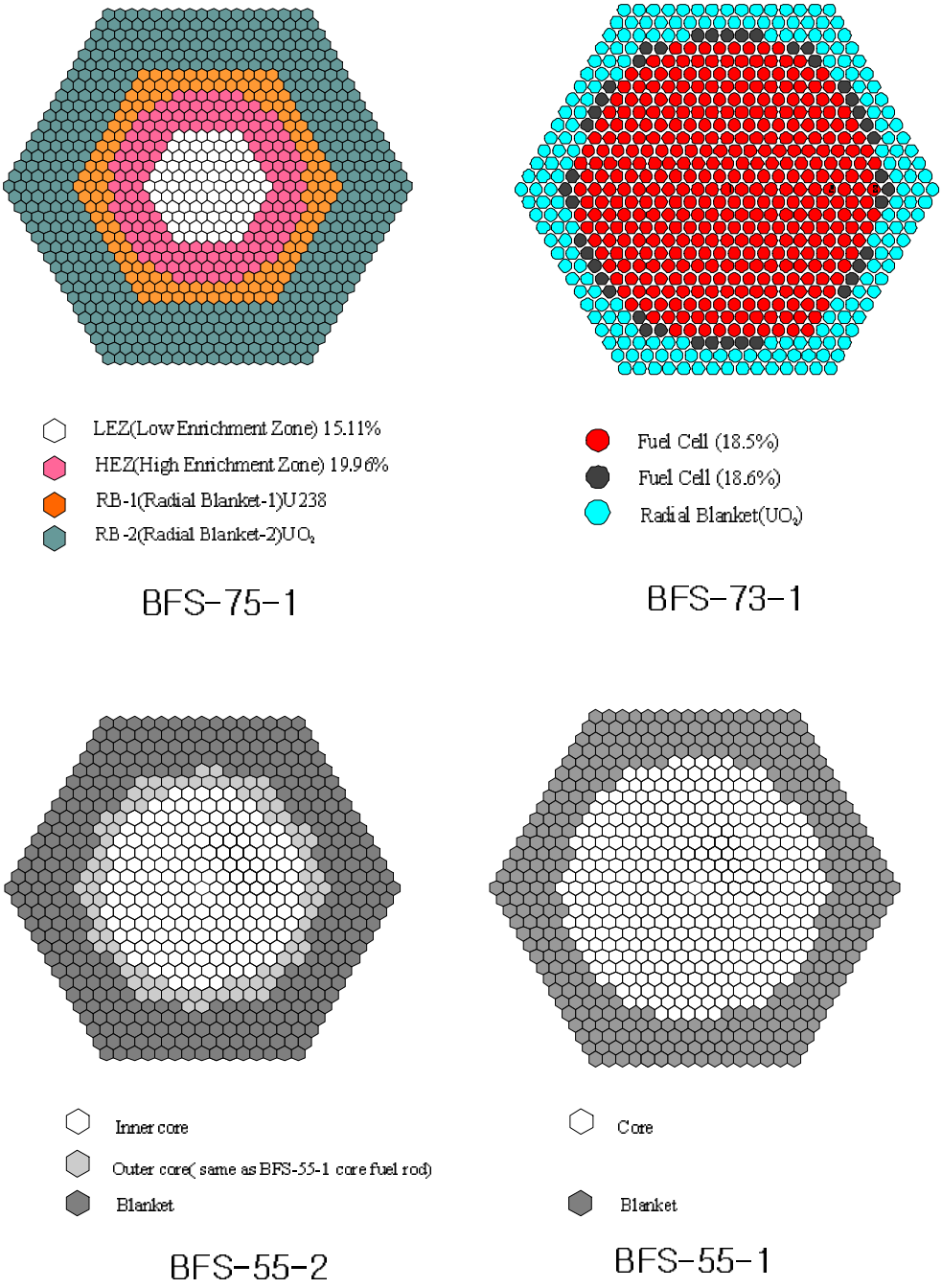

그림 1. BFS 노심 layout

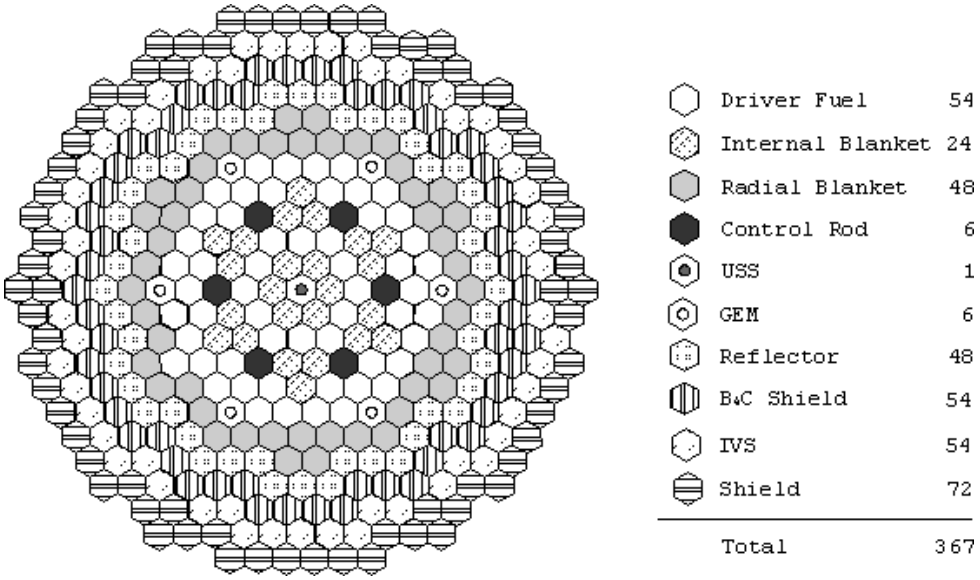

그림 2. Breakeven 노심 layout

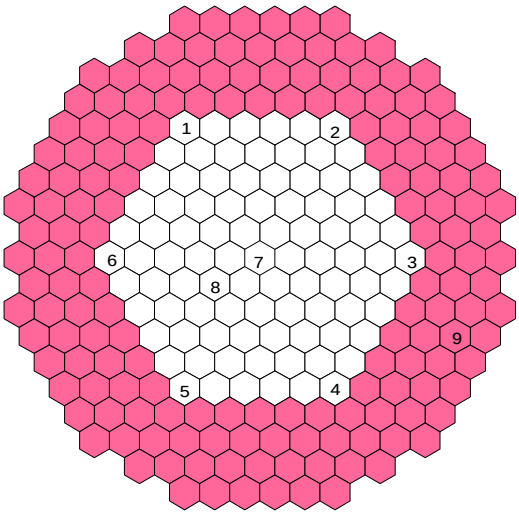

그림 3. 제어봉반응도가 실험 위치

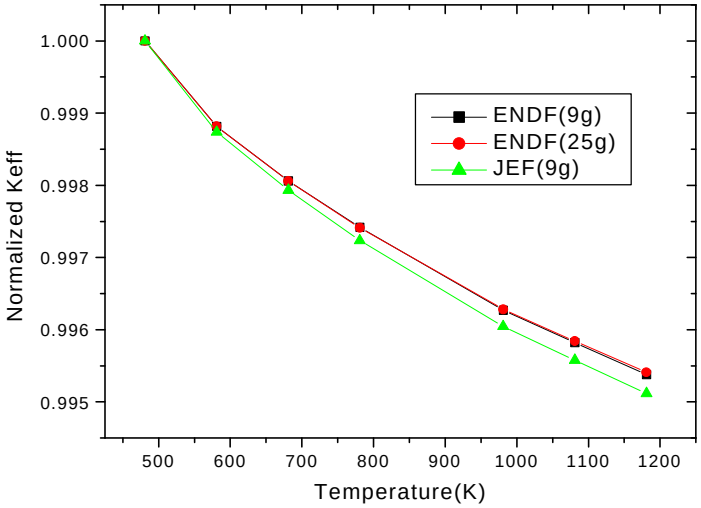

그림 4. Breakeven 노심의 도플러 효과

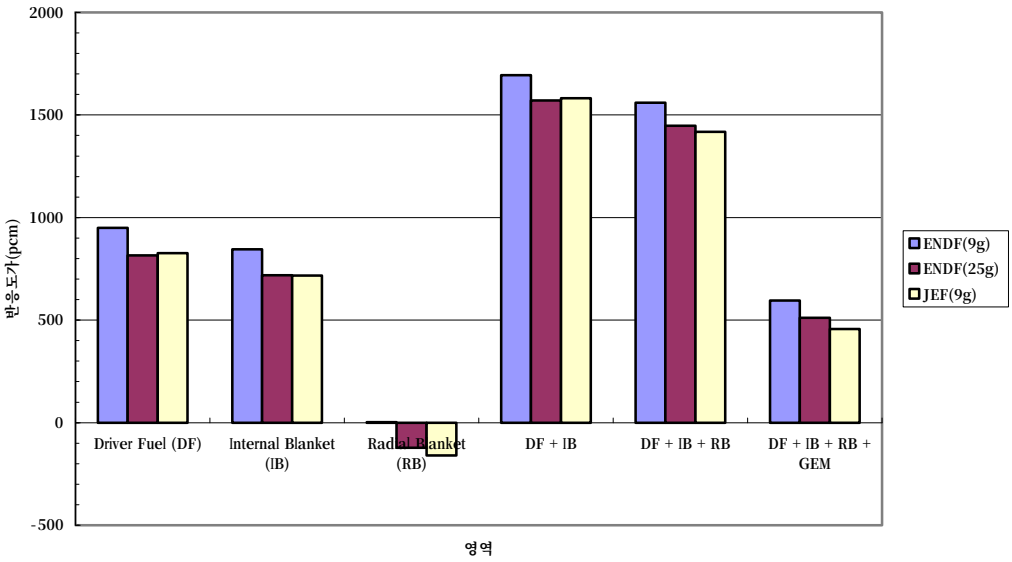

그림 5. Breakeven 노심의 소듐기화

표 1. 제어봉반응도가 비교(C/E)

실험위치	제어봉 종류	ENDF(9g)	ENDF(25g)	JEF(9g)
1	5	0.9513	0.9760	0.9417
2	5	0.9591	0.9840	0.9494
3	5	0.9631	0.9880	0.9533
4	5	0.9494	0.9740	0.9398
5	5	0.9513	0.9760	0.9417
6	5	0.9611	0.9860	0.9513
1,4	5	0.9377	0.9601	0.9456
1,3,5	5	0.9518	0.9735	0.9662
1,2,3,4,5,6	5	0.9620	0.9754	0.9757
7	4	0.9735	0.9752	1.0033
8	4	0.9257	0.9399	0.9511
7,8	4	0.9424	0.9496	0.9699

*제어봉 종류(1) B_4C(natural) 103 pellet (2) Sodium 69 + Stainless steel pellet 34 (3) B_4C(80%) + B_4C(natural) pellet 2 (4) B_4C(natural) 52 + Sodium pellet 51(5)Sodium 34 + SS 34 + B_4C(natural) pellet 35

표 2. 도플러 효과 비교(C/E)

노심	샘플	ENDF(9g)	ENDF(25g)	JEF(9g)
BFS-75-1	UO_2	1.7647	0.9554	1.8935
	NpO_2	0.2461	0.1654	0.4316
BFS-73-1	UO_2	1.0089	0.0376	1.0801

표 3. 소듐기화 실험치와의 비교(C/E)

노심	ENDF(9g)	ENDF(25g)	JEF(9g)
BFS-75-1	3.3246	2.7803	3.0755
BFS-55-2	1.3989	1.1352	1.1476
BFS-55-1	1.2069	1.2089	1.0899

표 4. 유효지발중성자분율 실험치와의 비교 및 계산치 비교(C/E)

노심	실험조건	ENDF(9g)	ENDF(25g)	JEF(9g)
BFS-73-1	Case 1	1.0384	1.0348	1.0353
	Case 2	1.0103	1.0068	1.0074
BFS-55-1	Case 1	0.9708	0.9646	0.9727
Breakeven*	BOEC	0.00357	0.00355	0.00355

1:Cf source pseudo reactivity method, 2:Rossi-alpha method, *:계산치