

핵변환로 설계를 위한 MAs 핵자료 검증

Evaluation of Minor Actinides's Libraries for Transmutor Design

민의섭, 김명현

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요약

핵변환로의 관점에서 노심설계시 필요한 마이나 액티나이드 핵종과 핵분열 생성물 핵종을 ENDF/B-VI와 JENDL3 마스터 라이브러리 별로 기존의 KAFAX-F22의 핵자료에 추가 하였다. 우라늄과 플루토늄의 핵자료를 각분할 수송계산 코드인 DANTSYS 체계를 이용하여 실험자료의 k-eff.값과 중심반응율비를 비교하였다. k-eff.값 비교에서 최대 1700pcm의 차이를 보였지만, 중심 반응율비의 오차는 5% 이내로 만족스러운 결과를 보였다. CSEWG에서 권고하는 검증문제로 우라늄 노심인 GODIVA와 ZPR3-11, 그리고 플루토늄 노심인 VERA11A와 JEZEBEL을 선정하였다. 마이나 액티나이드 핵종의 라이브러리 검증을 위해 JEZEBEL과 FLATTOP 문제에 대한 반응도 가를 계산 하였다. 마지막으로 우라늄, 플루토늄과 마이나 액티나이드가 혼합된 핵연료와 Pb-Bi 냉각재를 사용하는 고속로 조건을 가정하였다. MCNP 참조계산과 TRANSX/DANTSYS계산을 통하여 k-eff.값을 비교하였고, 그결과 ENDF/B-VI 기반의 핵자료를 이용한 계산 결과가 354pcm 하향 평가되었다.

Abstract

From the transmutation's point of view, MAs and FPs which are needed for designing Transmutor are added to the original KAFAX-F22's library for each ENDF/B-VI and JENDL3 evaluated library. By using DANTSYS which is discrete ordinate code, I compared the k values of the experiment's data and central reaction rate ratio in Uranium and Plutonium's library. In the comparison of k values, the maximum difference was 1700pcm, but it was a satisfying result that the central reaction rate ratio's difference is less than 5%. I verified GODIVA and ZPR3-11 which are Uranium Core and VERA11A and JEZEBEL which are Plutonium Core as recommended by CSEWG. MAs sample's reactivity calculated by using JEZEBEL and FLATTOP for verifying MAs. Lastly, A pseudo benchmark problem was made which is composed with mixture of the fast reactor condition which uses a Pb-Bi coolant. Compared with k-eff by using MCNP and DANTSYS code. The result which show the least difference was DANTSYS calculation using the library based ENDF/B-VI and it was downward evaluated as 354pcm.

1. 서론

기존의 고속로 설계가 증식 목적에서 핵변환로의 성격으로 바뀌고 있는 현실 속에서 마이나 액티나이드 핵종(MAs)의 검증 사례가 드문 실정이다. 고속로 핵 설계시 장수명 핵종인 핵분열 생성물(FPs)과, 고준위 방사능을 띠는 핵분열 생성물의 반응단면적이 중요시 되고 또한 마이나 액티나이드의 소멸처리 능력이 관건이 되고 있다. 현재 고속로 설계용 핵자료로서 MATXS 형태의 KAFAX-F22^[1]가 한국원자력연구소에서 개발 되어 사용되고 있으며, 본 연구의 요구에 의해서 JEFF2.2 기반의 KAFAX-F22에 ENDF/B-VI 와 JENDL3 마스터 핵자료 기반의 핵분열생성물 핵종과 마이나 액티나이드 핵종을 추가하였다. 고속로 노심 설계용 툴로는 TRANSX/DANTSYS/REBUS-3(DIF3D) 체계를 사용하고 있다. 핵자료에서 오는 오류 외의 다른 변수를 배제하기 위해 간단한 기하학 구조를 지니는 검증 문제를 CSEWG와 ICSBEP DATABASE^[2]에서 검색하여, 실험자료의 k 값 및 중심반응율비를 비교 하였다. 가상의 검증 문제를 만든 경우에는 MCNP 계산의 k 값과 비교를 하였다.

2장에서는 핵자료 KAFAX-F22의 수정사항과 구조를 살펴보고, 3장에서는 계산에 이용된 코드의 설명을 간략히 하였다. 4장에서 각 검증문제의 설명과 계산자료를 분석하였다. 4.1절은 정확하리라 예상하는 우라늄과 플루토늄 핵자료의 검증을 통해 TRANSX/DANTSYS 코드 체계가 실험을 제대로 묘사 하는지 알아보았고, 4.2절에서 마이나 액티나이드 핵종의 검증을 다루었다. 마이나 액티나이드 검증은 실험자료가 있는 Cm-244의 검증, Np-237의 검증과, 실험자료가 없는 마이나 액티나이드 핵종에 대해서 MCNP 계산을 토대로 비교한 것으로 나뉜다. 4.3절은 Pb-Bi 냉각제를 이용하는 고속로 조건에서 가상의 셀을 만들어 MCNP 계산과 DANTSYS 계산을 비교하였다. 5장에서는 논문의 결론과 향후 연구 계획 말하고 있다.

2. 핵자료 KAFAX-F22의 구조.

기존의 KAFAX-F22는 JEFF2.2 평가 핵자료집으로 부터 중성자 80군, 광자 25군의 구조로 97개 핵종에 대해서 만들어진 고속로 설계용 핵자료였다. 그러나 핵변환로 설계시 반드시 고려해야 하는 핵종인 Tc-99와 I-129 외에 방사능 독성이 높은 핵분열생성물 들인 Se-79, Sr-90, Zr-93, Nb-94, Pd-107, Sn-126, Cs-135, Cs-137, Sm-151을 추가해야 할 필요성이 있었다. Np-237 및 Am, Cm의 마이나 액티나이드 동위원소 핵종 자료와 플루토늄, 우라늄의 동위원소는 KAFAX-F22에 이미 JEFF2.2 기반의 핵자료가 있었지만, 평가 핵자료 별로 차이가 존재하고, 고속로 설계에 적합한 핵자료를 찾기 위해 ENDF/B-VI와 JENDL3 평가 핵자료로부터 추가하였다. 더불어, Pu-236 핵자료의 누락으로 이를 추가하여, 총 109개 핵종 수를 가지는 KAFAX-F22를 보유하게 되었다. 표.1에 기존의 핵종과 추가된 핵종을 구분하여 수록하였다.

3. 계산 방법

1차원과 2차원 모델 계산에는 discrete ordinates 코드인 ONEDANT와 TWODANT를 사용하였다. 그림 1에서와 같이 1단계로 MATXS 형태의 KAFAX-F22 핵자료는 각 검증문제의 특성자료와 함께 TRANSX코드로 받아 들여, 영역별 거시적 반응단면적을 생산하고, ONEDANT나

TWODANT는 TRANSX의 출력물을 직접 받아 들여 영역별 중성자속을 마련 해준다. 2단계로 마련된 영역별 중성자속은 다시 TRANSX 입력으로 하여, 영역별 중성자속이 고려된 거시적 반응 단면적을 다시 생산하고, 이를 이용하여 DANTSYS 체계에서 임계계산이 이루어진다. 연소계산을 행할 때에는 2단계에서의 DANTSYS 코드체계 순서를 건너 띄고 중성자속이 고려된 영역별 거시적 반응단면적을 연소 계산 코드인 REBUS-3로 넘겨주어 임계계산과 연소계산을 같이 한다. 본 논문은 연소계산은 제외하고 DANTSYS 체계를 이용한 임계계산으로 핵자료를 평가하였다.

4. 검증 문제 모델.

먼저 우라늄과 플루토늄 핵자료의 평가를 통해 코드체계의 오차를 살펴보기 위한 목적으로 CSEWG에서 권고하는 검증문제와 ICSBEP DATABASE를 참고하여, 플루토늄 노심인 VERA11A, JEZEBEL^{[3],[4]} Assembly와 HEU Core인 ZPR3-11와 GODIVA^[5] Assembly를 선택하였다. 마이나 액티나이드 핵자료의 검증을 위해서는 Glory hole을 이용해 대체실험이 가능한 FLATTOP^{[6],[7]} Assembly와, JEZEBEL Assembly를 대상으로 하였다. 핵자료의 검증시 다른 변수 요인을 배제하기 위하여, 가상의 검증문제로서 가장 간단한 핀 셀을 구성했다. 이 검증 문제를 통해서는 U, Pu과 M.A.들로 복합적으로 구성된 핵연료를 가정하여 검증하였다.

4.1 U, Pu 핵자료 검증.

우라늄 핵자료 검토를 위해 선정된 검증 모델은 GODIVA와 ZPR3-11 Critical Assembly이다. GODIVA와 ZPR3-11은 구형대의 우라늄 금속 핵연료를 사용하고, ZPR3-11은 감손우라늄을 반사체로 사용하고 있다.

GODIVA는 약간씩 조성이 다른 우라늄 핵연료를 사용하여, 5개의 영역으로 나뉘고, Assembly 전체의 크기는 반경 8.7062cm 이다. 코드 모사시 보정인자를 통해 하나의 영역이 추가 되어 6개 꺾질 모델이 되며, 각 꺾질별 물질조성은 표.2에 나타내었다. 반경은 8.7499cm의 구형 모델이며, 총 우라늄 질량은 보정 영역 0.780kg을 포함하여 52.367kg이고 밀도는 18.806g/cm^3 이다.

GODIVA의 계산 결과는 CSEWG의 실험자료와 함께 표.3에 정리하였다. JEFF2 평가 핵자료 기반의 kfax-1, ENDF/B-VI 기반의 kfax-2, JENDL3 기반의 kfax-3를 사용한 계산 각각 k 값의 오차가 -440pcm, -300pcm, 200pcm씩 실험치와 차이를 보였다.

ZPR3-11은 CSEWG의 검증문제로 우라늄 노심을 사용하고 감손우라늄을 반사체로 사용하는 고속로 조건의 실험기구이다. 노심에 장전되는 우라늄의 총 질량은 46.43kg이며, 1차원 모델로 반지름 31.61cm의 크기를 가진다. 반사체의 두께는 30cm인 구 모델로 코드묘사를 하였다. CSEWG에서 1차원 모델로 제공 되는 물질조성과 기하학 구조 자료를 표.4에 나타내었다. 표.5에 계산결과를 보면, 앞선 GODIVA의 결과와 다르게 k 값의 차이가 kfax-2에서 1300pcm 차이를 보이고 있는데 이는 Pu-240의 핵분열반응단면적이 상대적으로 크게 평가되었기 때문이다. 다른 중심반응율비 항목에서는 3가지 핵자료 모두 5%이내에서 실험자료와 만족 할만한 오차를 보이고 있다.

플루토늄 핵자료 검토를 위해 구형의 JEZEBEL과 VERA11A Critical Assembly를 선택하였다. VERA11A는 ZPR3-11 Assembly와 같은 감손우라늄 반사체를 사용한다.

JEZEBEL은 뒤에 M.A. 중 Cm-244 핵종의 검증을 위해서도 사용되는 Assembly로 여러 설정 중에서 4.5 at% Pu240 Assembly를 선택하였으며, Pu의 총 질량은 17.020kg 밀도 15.61g/cm^3 이

다. 반지름은 6.3849cm의 구형태이다. 자세한 물질조성은 표.6에 제시하였다. 표.7에서 비교 값 중 가장 큰 오차를 보이는 항목을 보면, k_{eff} 값에서는 kafax-1이 570pcm 과소 평가 되고, U-238의 핵분열반응단면적과 U-235의 핵분열반응단면적비 역시 kafax-1이 6.38% 과소평가되는 등 대체로 kafax-1이 과소평가되는 경향이 있다. 그리고, kafax-2가 모든 실험값 항목과 상대오차 4% 이내로 가장 가까운 결과를 보여주었다. 그러나 kafax-3 또한 모든 실험치 항목과 상대 오차 5% 이내의 오차를 보이므로 핵자료 간의 차이는 없다고 판단 된다.

VERA11A는 CSEWG에서 권장하는 임계 검증문제로 1차원 모델에 대한 제원 및 균질화된 물질조성을 표.8에 나타내었다. 플루토늄 노심과 감손우라늄을 반사체로 하여, 1차원 모델에 대한 노심의 반지름은 13.99cm, 반사체의 두께는 43cm이다. 표.9에 실험치의 k 값과 kafax-1이 1630pcm, kafax-2가 620pcm, kafax-3가 1700pcm의 차이를 보이고 있다. 살펴본 4가지 검증문제 중에서 가장 큰 k 값의 차이를 보여주고 있지만 중심반응율비의 상대오차는 모두 5% 이내로 평가 되고 있다.

4가지 검증문제를 종합해 볼때 ONEDANT의 계산과 실험자료의 k 값 차이가 작게는 200pcm, 크게는 1700pcm의 차이가 난다. 다른 평가 항목인 중심반응율비의 오차가 크지 않은 점을 볼때 k 값의 차이는 핵자료의 오차에 기인 한다가 보다는 코드 자체가 안고 있는 오차라고 판단 된다. 또 가장 많이 틀리고 있는 VERA11A의 실험자료를 비교에서 제외 시키면 k 값의 차이는 평균적으로 496pcm 정도이다.

4.2 M.A. 핵자료 검증.

4.2.1 실험자료를 통한 비교.

JEZEBEL Assembly를 이용한 대체측정 실험으로 Cm-244 핵종의 반응도가를 측정 한 실험을 이용하여 실험치와, TRANSX/DANTSYS 계산을 상호 비교하여 표.10에 정리하였다. JEZEBEL을 이용한 Cm-244의 검증 계산은 Glory hole에 Cm 샘플이 존재할 때와 빈공간 상태일 때의 k 값 차이로 Cm의 반응도가를 표현하여 비교 하였다. kafax-3의 ONEDANT 계산(P3S48)이 5.16% 과대평가 되는 것으로 실험치와 가장 근사치의 값으로 나왔으며, kafax-1, 2 핵자료는 각각 9.94%, 9.56%의 상대오차로 과대평가되고 있다. 이 검증문제에서 결과로 제시하고 있는 반응도가의 계산 방법은 $\Delta k_{Sample} = (k_{Cm-244} - k_{Void})$ 를 계산하여, 반응도 단위 cents로 환산하기 위해 Keepin data($\beta_{eff} = 0.00204$)를 이용하였다.

Np-237 핵종의 검증은 FLATTOP의 Glory hole을 통한 대체 실험을 이용하여 실험치와 비교가 가능하였다. FLATTOP의 물질조성은 표.11에 있는 것처럼 플루토늄 금속 핵연료와 우라늄 반사체로 구성된 모델로 Glory hole의 반지름이 0.7266cm이다. 플루토늄의 총 질량은 6.0426kg, 밀도 18.61g/cm³, 반지름은 Glory hole 부터 4.5332cm이고, 반사체의 두께는 19.6088cm로 전체 Assembly의 크기는 24.1420cm인 구형태의 기하학적 구조를 지니고 있다. FLATTOP을 이용한 Np의 핵자료검증에 대한 계산은 식 1과 같이 Glory hole에 각 샘플이 존재 할때의 k값과 비어 있는 void 상태의 k값의 차이(Δk_{Sample})와, HEU sample이 Glory hole에 있을 때의 k값을 마찬가지로 void 상태에서 계산된 k값의 차이(Δk_{HEU})를 계산하여 $\Delta k_{HEU} - \Delta k_{Sample}$ 를 cents 단위로 환산한 것이다. 반응도 단위 cents로 환산하기 위해 Keepin data($\beta_{eff} = 0.00276$)를 이용하였다.

$$\Delta\kappa_{HEU} = \frac{\kappa_{HEU} - \kappa_{void}}{\kappa_{HEU} \times \kappa_{void}}$$

$$\Delta\kappa_{Np} = \frac{\kappa_{Np237} - \kappa_{void}}{\kappa_{Np237} \times \kappa_{void}} \quad \text{-----} \quad 1$$

표.12의 FLATTOP에서의 계산 결과 Np-237 핵자료는 제일 작은 오차를 보이는 kafax-2가 실험치와 비교해 볼때 58.3% 정도 과대평가 되고 있다.

4.2.2 MCNP4b 계산을 통한 비교.

Am-241, 243핵종의 계산과, Cm-242, 243, 244, 245, 246 핵종의 검증은 4.2.1 에서 JEZEBEL을 이용한 Cm-244 핵자료의 검증을 제외하고는 실험자료가 없기 때문에 FLATTOP Assembly를 이용하여 MCNP 계산자료를 기준으로 DANTSYS의 계산을 비교하였다. 계산방법 및 비교방법은 4.2.1에서 Np 핵자료 검증 때와 같다. 다만 비교 기준이 실험자료가 아닌 MCNP 계산을 토대로 한 것이다.

표.13에서 Am-241 핵자료는 ENDF/B-V를 사용한 MCNP4b 계산을 실제값이라고 가정 할때 kafax-2가 14.4% 과대 평가되었다. 하지만, 실험자료가 없고, ENDF/B-V를 사용한 MCNP4b 계산과 ENDF/B-VI를 사용한 MCNP4b 계산에서 조차 서로 110%이상 오차를 보이고 있어 Am-241 핵자료의 신빙성에 더욱 의심을 가지게 된다. 이는 Am-243의 계산에서 더욱 두드러지고 있다. 표.14의 Cm 계산결과도 마찬가지로 실험값이 존재하지 않고 비교대상이 되는 MCNP4b의 계산이 ENDF/B-V와 ENDF/B-VI간의 오차가 커 비교 자체가 힘들다. Cm-243, 245, 246의 경우 B-V 자료의 부재로 표.14에서 누락되었다. ENDF/B-VI를 사용한 MCNP계산을 기준으로 KAFAX-F22에서 작은 오차를 보이는 핵자료를 비교하면, Cm-242는 kafax-1이 28.9% 과대평가 되었고, Cm-243은 kafax-1이 2.3% 과대평가, Cm-244는 kafax-2가 11.5% 과소평가, Cm-245는 kafax-2가 10.9% 과소 평가, Cm-246은 kafax-2가 31.6% 과소 평가되었다.

4.3 U, Pu과 M.A. 복합 핵연료물질.

핵자료 외의 다른 변수를 제거하기 위해 가상적으로 R-Z 모델을 핀 셀 형태로 구성하여 물질조성에 대한 자료를 표.15에 나타내었다. Pb-Bi 냉각재를 이용한 고속로 조건으로 내부 핵연료의 반경을 0.32725cm, 그 주위를 납 본딩이 되어 있는 빈 공간의 형태로 두께 0.07275cm로 만들었다. Cladding의 두께는 0.1cm이며, Stainless steel 제질로 하였다. 핵연료 핀 주위로 Pb-Bi 냉각재를 두어 셀을 구성하였으며, 핵연료/냉각재 비가 1:1.7이 되도록 냉각재의 두께를 0.8220cm로 하였다. 코드 모델링시 TWODANT에서 묘사 할수 있는 모델의 차이로 냉각재 영역을 MCNP에서는 사각 형태로 하여 무한배열구조로 그림 2와 같이 표현하였으며, TWODANT에서는 MCNP와 같은 부피 비를 가지도록 R-Z 모델로 그림 3과 같이 원통형으로 묘사를 하였다. 표.16의 계산결과를 보면, ENDF/B-VI 기반으로 만들어진 kafax-2 핵자료가 ENDF/B-VI Continuous 핵자료를 이용한 MCNP4b 계산과 제일 작은 오차 354pcm의 차이를 보였으며 kafax-1, kafax-3 은 1000pcm 이상 오차를 보이고 있다. kafax-2가 가장 작은 오차를 보이는 결과가 나타난 것은 MCNP 계산 자체가 ENDF/B-VI 핵자료를 이용한 계산이기 때문이라고 생각 된다.

5. 결론 및 향후 계획

이상의 연구를 통해 보유하고 있는 KAFAX-F22의 평가를 해보면, 우라늄과 플루토늄의 계산은 k_{eff} 값 비교시 VERA11A의 계산 자료를 제외하면 평균적으로 490pcm 정도의 오차를 보였다. 이를 핵자료에서 오는 오차로 보기보다는 계산 틀 자체가 가지고 있는 오차로 판단 된다. 이유는 핵자료의 평가시 중심반응율비의 차이가 더 중요하며, 그 오차는 모두 실험오차 5% 이내에 머물고 있기 때문이다. 실험자료와 비교한 마이나 액티나이드의 경우 Cm-244와 Np-237 핵종의 반응도가는 각각 5.16%, 58.3% 정도 차이가 나고 있다. MCNP와 비교한 다른 마이나 액티나이드의 핵자료를 보면, kafax-1을 이용한 반응도가 계산에서는 Cm-242가 28.9%, Cm-243이 2.3%로 나타났고, kafax-2의 경우 Cm-244 핵자료 검증에서 11.5%, Cm-245가 10.9%, Cm-246이 31.6%로 차이를 보였다. Cm-244 핵자료는 실험치와 비교한 것에서 5.16%로 실험값과 근사한 오차를 보이는 것으로 평가 되었다. 따라서 MCNP계산과 비교한 Cm-244의 상대오차 11.5%는 반응도가 계산방법의 차이와 HEU 핵자료에서 오는 오차가 더해져서 크게 평가되어진 것으로 보인다. 평가 핵자료 ENDF/B-VI를 기반으로 만든 kafax-2를 이용한 계산이 여러 검증문제에서 다른 평가 핵자료 기반의 라이브러리보다 비교우위에 있다. 그리고 가상의 검증문제로 Pb-Bi 냉각재를 사용하는 고속로 조건의 핀 셀 계산에서 마이나 액티나이드의 무게비율이 2.37wt.%여서 k_{eff} 값에 크게 영향을 미치지 않았기 때문에, k_{eff} 값의 차이는 MCNP-4b 코드와 TWODANT 코드 간의 오차로 보인다.

비교방법을 달리하여 더 많은 사례의 연구가 앞으로 진행될 예정이고 마이나 액티나이드 핵종과 핵분열생성물들의 실제 연소계산을 통한 연구, 평가가 필요하다. 앞으로 REBUS-3 코드를 이용한 연소계산과, MOCUP 코드를 상호 비교할 예정이다.

6. 참고 문헌

- [1] 김정도, 길충섭, “KAFAX-F22:JEF-2.2를 이용한 고속로용 다균 단면적 라이브러리 생산 및 검증,” KAERI/TR-842/97 한국원자력연구소 (1997).
- [2] “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiment,” NEA/NSC/DOC(95)03/Setember 2002 edition, Los Alamos National Labortory (2002).
- [3] R.Douglas O’Dell, “Bare sphere of Plutonium-239 Metal,” NEA/NSC/DOC(95)03/I (2002).
- [4] Roger W.Brewer, “Replacement measurements performed with Curium-244, Plutonium-239, and HEU using JEZEBEL,” NEA/NSC/DOC(95)03/VII (2002).
- [5] Raphael J. LaBauve, “Bare, Highly enriched Uranium sphere,” NEA/NSC/DOC(95)03/II (2002).
- [6] R.W.Brewer, “Plutonium sphere reflected by Normal Uranium using FLATTOP,” NEA/NSC/DOC(95)03/I (2002).

- [7] R.W.Brewer, "Neptunium-237 and Highly Enriched Uranium replacement measurements performed using FLATTOP," : NEA/NSC/DOC(95)03/VII (1997).
- [8] R.E. Alcouffe, et. all, "DANTSYS:
A Diffusion Accelerated Neutral Particle Transport Code System," LA-12969-M, LANL, NM, USA, (1995).
- [9] R.E. MacFavlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport codes," LA-12312-MS, LANL, NM, USA, (1992).

표.1 Master library 기준별 KAFAX-F22 SET

해종 번호	해종 ID	OLD KAFAX-F22	NEW KAFAX-F22			해종 번호	해종 ID	OLD KAFAX-F22	NEW KAFAX-F22			해종 번호	해종 ID	OLD KAFAX-F22	NEW KAFAX-F22			
			KAFAX-1	KAFAX-2	KAFAX-3				KAFAX-1	KAFAX-2	KAFAX-3				KAFAX-1	KAFAX-2	KAFAX-3	
1	h1	JEFF2.2	JEFF2.2			41	cunat	JEFF2.2	JEFF2.2			81	pu236	X	JEFF2.2	ENDF	JENDL	
2	h2	JEFF2.2				42	ganat	JEFF2.2				82	pu238	JEFF2.2				
3	he3	JEFF2.2				43	y89	JEFF2.2				83	pu239	JEFF2.2				
4	he4	JEFF2.2				44	zrnat	JEFF2.2				84	pu240	JEFF2.2				
5	li6	JEFF2.2				45	nb93	JEFF2.2				85	pu241	JEFF2.2				
6	li7	JEFF2.2				46	monat	JEFF2.2				86	pu242	JEFF2.2				
7	be9	JEFF2.2				47	ag107	JEFF2.2				87	am241	JEFF2.2				
8	b10	JEFF2.2				48	ag109	JEFF2.2				88	am242	JEFF2.2				
9	b11	JEFF2.2				49	cdnat	JEFF2.2				89	am242m	JEFF2.2				
10	cnat	JEFF2.2				50	snnat	JEFF2.2				90	am243	JEFF2.2				
11	n14	JEFF2.2				51	eu151	JEFF2.2				91	cm242	JEFF2.2				
12	n15	JEFF2.2				52	eu153	JEFF2.2				92	cm243	JEFF2.2				
13	o16	JEFF2.2				53	gd152	JEFF2.2				93	cm244	JEFF2.2				
14	f19	JEFF2.2				54	gd154	JEFF2.2				94	cm245	JEFF2.2				
15	na23	JEFF2.2				55	gd155	JEFF2.2				95	cm246	JEFF2.2				
16	mgnat	JEFF2.2				56	gd156	JEFF2.2				96	cm247	JEFF2.2	JEFF2.2			
17	al27	JEFF2.2				57	gd157	JEFF2.2				97	cm248	JEFF2.2				
18	sinat	JEFF2.2				58	gd158	JEFF2.2				98	cf252	JEFF2.2				
19	p31	JEFF2.2				59	gd160	JEFF2.2				99	se79	X	JEFF2.2			
20	clnat	JEFF2.2				60	ta181	JEFF2.2				100	sr90	X				
21	ar40	JEFF2.2				61	w182	JEFF2.2				101	zr93	X				
22	knat	JEFF2.2				62	w183	JEFF2.2				102	nb94	X				
23	canat	JEFF2.2				63	w184	JEFF2.2				103	tc99	X				
24	tinat	JEFF2.2				64	w186	JEFF2.2				104	pd107	X				
25	vnat	JEFF2.2				65	re185	JEFF2.2				105	n126	X				
26	cr50	JEFF2.2				66	re187	JEFF2.2				106	i129	X				
27	cr52	JEFF2.2				67	au197	JEFF2.2				107	cs135	X				
28	cr53	JEFF2.2				68	pbnat	JEFF2.2				108	cs137	X				
29	cr54	JEFF2.2				69	bi209	JEFF2.2				109	sm151	X				
30	mn55	JEFF2.2				70	th232	JEFF2.2				X						
31	fe54	JEFF2.2	71	pa233	JEFF2.2													
32	fe56	JEFF2.2	72	u232	JEFF2.2													
33	fe57	JEFF2.2	73	u233	JEFF2.2													
34	fe58	JEFF2.2	74	u234	JEFF2.2	JEFF2.2	ENDF	JENDL										
35	co59	JEFF2.2	75	u235	JEFF2.2													
36	ni58	JEFF2.2	76	u236	JEFF2.2													
37	ni60	JEFF2.2	77	u237	JEFF2.2	JEFF2.2												
38	ni61	JEFF2.2	78	u238	JEFF2.2													
39	ni62	JEFF2.2	79	np237	JEFF2.2													
40	ni64	JEFF2.2	80	np238	JEFF2.2													

표.2 Shell Model에 대한 GODIVA 의 구성 물질 및 제원

Region	Radius (cm)	U Mass (kg)	U-235 Content(wt%)	Concentration(atoms/barn-cm)	
Shell#1	1.0216	0.084	93.26	U-234	4.9357E-4
				U-235	4.4936E-2
				U-238	2.7213E-3
Shell#2	6.2809	19.426	93.90	U-234	4.9357E-4
				U-235	4.5244E-2
				U-238	2.4168E-3
Shell#3	7.7525	17.065	93.95	U-234	4.9357E-4
				U-235	4.5268E-2
				U-238	2.3930E-3
Shell#4	8.2527	7.438	93.58	U-234	4.9357E-4
				U-235	4.5090E-2
				U-238	2.5690E-3
Shell#5	8.7062	7.754	93.89	U-234	4.9357E-4
				U-235	4.5239E-2
				U-238	2.4215E-3
Shell#6	8.7499	0.780	93.86	U-234	4.8974E-4
				U-235	4.4874E-2
				U-238	2.4169E-3

표.3 GODIVA의 CSEWG 실험 data 및 ONEDANT 결과

Quantity	Experiment	KAFAX-1 (JEFF)	KAFAX-2 (ENDF/B-VI)	KAFAX-3 (JENDL3)
Keff	1.0000	0.9956(-440pcm)	0.9970(-300pcm)	1.0020(200pcm)
F28/F25	0.1643	0.1603(-2.43%)	0.1605(-2.31%)	0.1593(-3.04%)
F23/F25	1.5900	1.5380(-3.27%)	1.5390(-3.21%)	1.5220(-4.28%)
F37/F25	0.8516	0.8168(-4.09%)	0.8288(-2.68%)	0.8376(-1.6%)
F49/F25	1.4150	1.3950(-1.41%)	1.3870(-1.98%)	1.3780(-2.61%)

표.4 ZPR3-11 Critical Assembly의 구성 물질 및 제원

Material	Number Density(#/barn-cm)	
	Core (31.61cm ¹)	Reflector (30.00cm ¹)
U-234	0.000046	
U-235	0.004567	0.000089
U-236	0.000019	
U-238	0.034373	0.040025
Cr	0.001486	0.001196
Fe	0.005681	0.004925
Ni	0.000718	0.000536
Mn	0.000208	0.000111

표.5 ZPR3-11의 CSEWG 실험 data 및 ONEDANT 결과

Quantity	Experiment	KAFAX-1 (JEFF)	KAFAX-2 (ENDF.B-VI)	KAFAX-3 (JENDL3)
Keff	1.000	1.0040(400pcm)	1.0130(1300pcm)	0.9946(-540pcm)
F28/F25	0.038	0.0374(-1.58%)	0.0383(0.79%)	0.0362(-4.74%)
F49/F25	1.190	1.1560(-2.86%)	1.1650(-2.1%)	1.1500(-3.36%)
F40/F25	0.340	0.3333(-1.97%)	0.3572(5.06%)	0.3279(-3.56%)
C28/F25	0.112	0.1081(-3.48%)	0.1071(-4.38%)	0.1086(-3.04%)
C28/F49	0.0941	0.0935(-0.64%)	0.0919(-2.34%)	0.0945(0.43%)

표.6 JEZEBEL Critical Assembly의 구성 물질 및 제원

Material	Number Density(#/barn-cm)
	Core (1-d radius 6.3849cm)
Pu-239	0.037047
Pu-240	0.0017512
Pu-241	0.00011674
Ga	0.0013752

표.7 JEZEBEL의 CSEWG 실험 data 및 ONEDANT 결과

Quantity	Experiment	KAFAX-1 (JEFF)	KAFAX-2 (ENDF/B-VI)	KAFAX-3 (JENDL3)
Keff	1.000	0.9943(-570pcm)	0.9971(-290pcm)	0.9958(-420pcm)
F28/F25	0.2133	0.1997(-6.38%)	0.2082(-2.39%)	0.2084(-2.30%)
F23/F25	1.5780	1.5240(-3.42%)	1.5280(-3.17%)	1.5040(-4.69%)
F37/F25	0.9835	0.9163(-6.83%)	0.9617(-2.22%)	0.9574(-2.65%)
F49/F25	1.4610	1.4280(-2.26%)	1.4280(-2.26%)	1.4180(-2.94%)

표.8 VERA11A Critical Assembly의 구성 물질

Material	Number	
	Density(#/barn-cm)	
	Core (13.99cm ¹)	Reflector (43.00cm ²)
U-235		0.000250
U-238		0.03440
Pu-239	0.007213	
Pu-240	0.000370	
Pu-241	0.000028	
C	0.046204	
Cr	0.001579	0.00170
Fe	0.006084	0.00650
Ni	0.000665	0.000710
Cu	0.007402	
Ga	0.000449	
Sn	0.000043	
Pb	0.000035	

표.9 VERA-11A의 CSEWG 실험 data 및 ONEDANT 결과

Quantity	Experiment	KAFAX-1 (JEFF)	KAFAX-2 (ENDF/B-VI)	KAFAX-3 (JENDL3)
Keff	1.000	0.9837(-1630pcm)	0.9938(-620pcm)	0.9830(-1700pcm)
F28/F25	0.077	0.0774(0.52%)	0.0794(3.12%)	0.0807(4.81%)
F49/F25	1.070	1.1060(3.36%)	1.1020(2.99%)	1.1110(3.83%)
F40/F25	0.475	0.4537(-4.48%)	0.4668(-1.73%)	0.4621(-2.72%)

표.10 JEZEBEL을 이용한 Cm-244 검증

Library	Code	$k_{\text{eff}}(\text{Cm244})$	$\Delta k_{\text{eff}}(\text{¢/g})$ (P3S16)	$\Delta k_{\text{eff}}(\text{¢/g})$ (P3S48)	수행자
Experiment	-	-	5.23		-
ENDF/B-VI	MCNP	-	5.32±0.10(1.72%)		LANL
27Group ENDF/B-IV	ONEDANT	0.999885	-	5.98(14.34%)	
KAFAX-1 (JEFF)	ONEDANT	0.99414	5.75(9.94%)	5.75(9.94%)	KHU
KAFAX-2 (ENDF/B-VI)	ONEDANT	0.99684	6.17(17.97%)	5.73(9.56%)	
KAFAX-3 (JENDL3)	ONEDANT	0.998172	5.55(6.12%)	5.50(5.16%)	

표.11 FLATTOP near-Critical Assembly의 구성 물질

Isotope	Sample(wt.%)		FLATTOP Pu Core(wt.%)
	Sample A	HEU	
U-234	-	1.1	-
U-235	-	93.2	-
U-236	-	0.2	-
U-238	-	5.5	-
Sample A	99.87	-	-
Pu-239	-	-	94.90
Pu-240	-	-	4.80
Pu-241	-	-	0.30
Impurities	0.13	-	-
Density(g/cm3)	20.45	18.61	15.53

표.12 FLATTOP을 이용한 Np-237 검증

Library	Code	K_{HEU}	K_{Np-237}	K_{Void}	$\Delta K_{HEU} - \Delta K_{Np-237}$	수행자
Experiment	-	-	-	-	6 . 40 ± 0.40 ¢	-
ENDF/B-V	MCNP	-	-	-	5.23 ± 0.97 ¢	LANL
ENDF/B-VI	MCNP	-	-	-	4.56 ± 0.04 ¢	
27Group ENDF/B-IV	ONEDANT	0.999100	0.998866	-	8.50 ¢ (32.8%)	
KAFAX-1 (JEFF)	ONEDANT (P3S16)	0.983973	0.983425	0.981532	20.52 ¢ (220.63%)	KHU
	ONEDANT (P3S48)	0.982931	0.982388	0.980501	20.37 ¢ (218.28%)	
KAFAX-2 (ENDF/B-VI)	ONEDANT (P3S16)	1.0007344	1.0004543	0.99834587	10.13 ¢ (58.28%)	
	ONEDANT (P3S48)	0.9996799	0.99940274	0.99730173	10.15 ¢ (58.59%)	
KAFAX-3 (JENDL3)	ONEDANT (P3S16)	0.989653	0.989212	0.987198	16.32 ¢ (155%)	
	ONEDANT (P3S48)	0.988601	0.988164	0.986157	16.21 ¢ (153.28%)	

표.13 FLATTOP을 이용한 Am 검증

Library	CODE	$\Delta k_{HEU} - \Delta k_{am241}$	$\Delta k_{HEU} - \Delta k_{am243}$
ENDF/B-V	MCNP	-20.22 ¢	-73.54 ¢
ENDF/B-VI	MCNP	2.16 ¢	-49.72 ¢
KAFAX-1 (JEFF)	ONEDANT	-10.66 ¢	17.48 ¢
KAFAX-2 (ENDF/B-VI)	ONEDANT	-23.14 ¢	5.79 ¢
KAKFAX-3 (JENDL3)	ONEDANT	-17.22 ¢	12.71 ¢

표.14 FLATTOP을 이용한 Cm 검증

Library	CODE	Cm242 $\Delta k(\%)$	Cm243 $\Delta k(\%)$	Cm244 $\Delta k(\%)$	Cm245 $\Delta k(\%)$	Cm246 $\Delta k(\%)$
ENDF/B-V	MCNP	38.25	-	86.48	-	-
ENDF/B-VI	MCNP	61.58	241.88	92.83	199.83	86.01
KAFAX-1 (JEFF)	ONEDANT	79.40	247.55	68.05	251.59	55.51
KAFAX-2 (ENDF/B-VI)	ONEDANT	6.1	-86.56	82.12	178.08	58.86
KAKFAX-3 (JENDL3)	ONEDANT	112.01	149.83	63.58	168.18	24.04

표.15 Pb-Bi 냉각재 조건의 검증문제 구성 물질

Material	isotope	NumberDensity #/barn-cm	Material	isotope	NumberDensity #/barn-cm	
Fuel	Th232	1.79E-10	Fuel	Cm246	2.63E-05	
	Pa233	4.95E-13		Zrnat	1.04E-02	
	U233	4.16E-09	Cladding	Fe54	2.29E-03	
	U234	8.34E-05		Fe56	3.61E-02	
	U235	4.73E-05		Fe57	8.62E-04	
	U236	9.65E-05		Fe58	1.30E-04	
	U238	2.05E-02		Ni58	1.47E-04	
	Np237	3.63E-04		Ni60	5.69E-05	
	Pu238	3.91E-04		Ni61	2.58E-06	
	Pu239	3.94E-03		Ni62	7.94E-06	
	Pu240	4.08E-03		Ni64	2.26E-06	
	Pu241	9.02E-04		Cr50	2.54E-04	
	Pu242	1.11E-03		Cr52	4.93E-03	
	Am241	1.66E-05		Cr53	5.62E-04	
	Am242	1.11E-09		Cr54	1.40E-04	
	Am243	3.03E-04		Monat	2.66E-04	
	Cm242	1.01E-06		Mn55	9.28E-05	
	Cm243	1.33E-07		Coolant	Pbnat	1.41E-02
	Cm244	2.53E-04			Bi209	1.74E-02
Cm245	4.64E-05					

표.16 Pb-Bi 냉각재 조건에서의 MCNP4b와 TWODANT k 값 비교

MCNP	TRANSX/TWODANT (pcm)		
	KAFAX-1 (JEFF3) P3S16	KAFAX-2 (ENDF/B-VI) P3S16	KAFAX-3 (JENDL3.3) P3S16
1.66339 ± 0.00048	1.63995 (2344pcm)	1.66693 (-354pcm)	1.64723 (1616pcm)

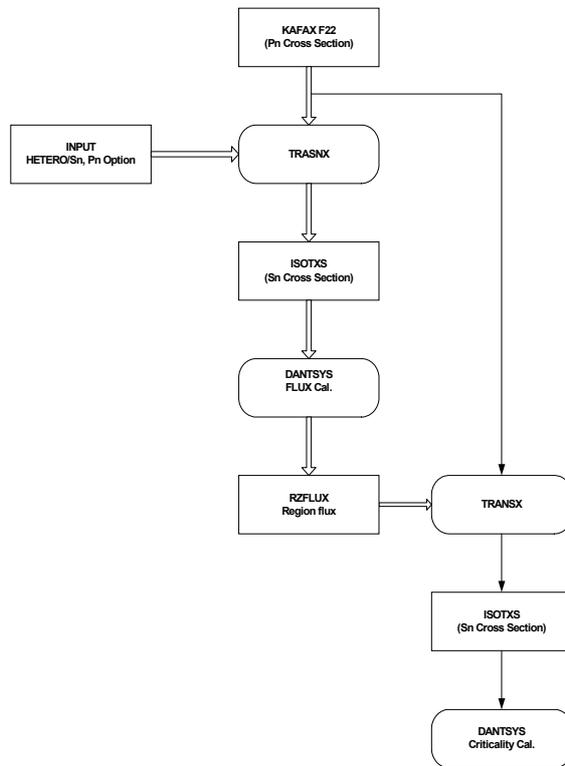


그림 1 코드 FLOWCHART

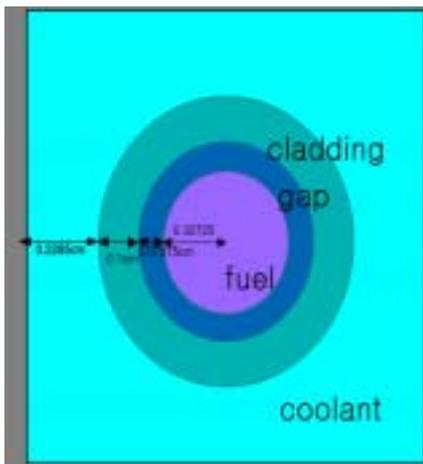


그림 2 Infinite Cell Design for MCNP

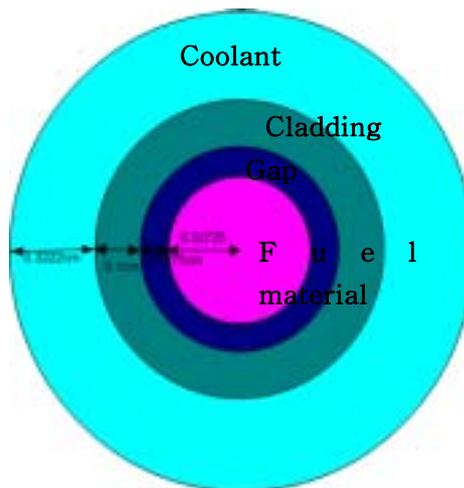


그림 3 Infinite Cell Design for TWODANT