2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3, JEFF-3.0에 근거한 MCNP4C용 중성자 라이브러리의 검증 계산 및 비교

Comparisons for Benchmark Calculations with MCNP4C Libraries Based on ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3, and JEFF-3.0

김도헌, 길충섭, 김정도, 장종화
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

최신의 ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3, JEFF-3.0에 근거한 MCNP4C용 중성자 라이브러리를 생산하여, 총 91개의 LANL 임계도 벤치마크 문제에 대한 검증 계산을 수행하였다. 이들 중 특이한 계산 결과를 보이는 11개의 벤치마크 문제를 선정하였고, 라이브러리에 대한 민감도 계산을 수행함으로써 그 원인을 분석하였다. 고농축 U-233 및 고농축 U-235 연료로 장전된 고속로 노심에서는 JENDL-3.3 및 JEFF-3.0을 사용할 경우 각 핵종의 핵분열 반응율의 증가로 인해 k_{eff}가 상승한다. Normal 우라늄 반사체를 지닌 고속로 노심에서는 JENDL-3.3 및 JEFF-3.0을 사용할 경우 U-238 포획 반응의 증가 및 핵분열 반응의 감소로 인해 k_{eff}가 하락한다. 특히, 비분리공명 (unresolved resonance, UR) 영역의 자기 차폐 (self-shielding) 효과를 고려하기 위해 도입된 UR 확률표를 사용할 경우, ENDF/B-VI.8의 W 동위원소와 JENDL-3.3의 U-238은 포획 반응의 감소 또는 U-235 핵분열 반응의 증가로 인해 k_{eff}를 크게 상승시킨다.

Abstract

The comparative study on the neutron data libraries processed for MCNP4C code has been performed with the latest evaluated nuclear data libraries ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3, and JEFF-3.0. The benchmark calculations for the libraries have been conducted for 91 criticality benchmarks established for validating MCNP library by LANL. Out of these benchmarks, 11 assemblies have been selected to clarify the cause of large differences among three MCNP4C libraries. For the fast systems loaded with highly enriched U-233 or U-235, the effective multiplication factors resulting from the use of JENDL-3.3 or JEFF-3.0 have been increased due to the large U-235 fission reaction rates in the fast energy region. For the fast assemblies reflected with normal uranium, the k_{eff}'s by JENDL-3.3 or JEFF-3.0 have a tendency to decrease from the large capture and small fission rates of U-238. Considering the use of unresolved-resonance probability tables, the benchmark results for fast assemblies including W-isotopes of ENDF/B-VI.8 or U-238 of JENDL-3.3 tend to excessively increase

the k_{eff}'s because of the small U-238 capture rates or the large U-235 fission rates.

1. 서 론

원자로심 해석, 각종 차폐 해석, 실험 자료의 검증 등에 널리 사용되고 있는 MCNP (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code)[1] 코드용 중성자 라이브러리로는 LANL에서 생산, 배포하고 있는 라이브러리가 널리 사용되고 있다. MCNP4A와 함께 생산되어 배포된 ENDF60[2] 라이브러리는 현재까지도 널리 사용되고 있지만, 평가 핵자료로 사용된 ENDF/B-VI.2가 약 10년 전에 생성된 핵자료이기 때문에 이 라이브러리에는 최신의 평가 내용이 반영되어 있지 않다. 또한, LANL의 라이브러리는 주로 ENDF/B를 토대로 생산되었으며, JENDL 및 JEFF를 사용한 MCNP용 라이브러리의 생산은 수행되지 않고 있다.

본 연구에서는 MCNP용 라이브러리 업데이트 작업의 일환으로, 최신의 평가핵자료집인 ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3, JEFF-3.0에 근거한 MCNP4C용 라이브러리를 생산하여 Los Alamos National Laboratory (LANL)의 라이브러리 검증용 임계도 벤치마크 문제에 대한 검증 계산을 수행하였다.[3,4] 총 91개의 벤치마크 문제들 중 특이한 계산 결과를 보이는 11개의 벤치마크 문제를 선정하였고, 각 핵종에 대한 라이브러리를 변경해 가며 민감도 계산을 수행함으로써 그 원인을 분석하고자 하였다.

2장에서는 MCNP4C용 라이브러리의 생산 과정이 간단히 기술되었으며, 3장에서는 생산된 라이브러리에 대한 검증 계산 및 결과가 논의되었다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 내용을 간단히 요약하였다.

2. 라이브러리 생산

현재 원자력계에서는 각 나라별로 다양한 종류의 평가 핵자료집이 제작되어 사용되고 있다. 그 중에서도 미국 BNL (Brookhaven National Laboratory)의 ENDF/B-VI, 일본 JAERI의 JENDL, 유럽 OECD/NEA의 JEFF 등은 방대한 양의 신뢰성 높은 평가 핵자료들을 포함하고 있어 전세계적으로 널리 사용되고 있다. 특히, 비교적 최근에 이들 핵자료집에 대한 새로운 release가 제작·배포되었기 때문에, 새롭게 평가된 핵자료가 기존의 계산 체계에 미치는 영향 등을 살펴 보기 위한 작업이 여러 연구자들에 의해 진행되고 있다. 본 연구에서도 최신 버전의 평가 핵자료집을 토대로 MCNP4C용 라이브러리 생산 및 검증 계산을 수행하고자 하였다. 계산에 사용된 평가 핵자료집은 2001년 10월에 배포된 ENDF/B-VI.8, 2002년 5월에 배포된 JENDL-3.3, 2002년 4월에 배포된 JEFF-3.0 등이다.

핵자료 처리 코드로는 최신 버전인 NJOY99.81 코드가 사용되었다. NJOY 코드의 핵자료 처리 절차는 기존의 MCNP용 라이브러리 생산 절차와 유사하다. 본 계산에서는 PURR 모듈이 새롭게 추가되어 UR 에너지 영역에서의 자기 차폐 효과를 고려하기 위해 생성된 UR 확률표 자료가 라이브러리에 포함된다. 벤치마크 계산에 필요한 핵종들의 평가 핵자료는 293.6K의

온도에서 처리되어 ACE 포맷 라이브러리로 만들어졌다. KNE68 (KAERI NDL ENDF/B-VI Release 8) 라이브러리는 ENDF/B-VI.8에 근거하여 생산된 라이브러리이며 ZAID identifier로는 ".80c"를 사용하였다. KNJ33 (KAERI NDL JENDL-3.3) 라이브러리는 JENDL-3.3에 근거하여 생산된 라이브러리이며 ".90c"를 ZAID identifier로 사용하였다. 마지막으로, KNF30 (KAERI NDL JEFF-3.0) 라이브러리는 JEFF-3.0에 근거하여 생산된 라이브러리이며 ".70c"를 ZAID identifier로 사용하였다.

3. 벤치마크 계산

새롭게 생산된 KNE68, KNJ33, KNF30 라이브러리를 검증 (validation)하기 위해서 LANL의 라이브러리 검증용 임계도 벤치마크 문제에[5] 대한 임계도 계산을 수행하였다. 계산 결과들은 기존의 ENDF60 라이브러리를 사용한 계산 결과와 비교되었으며, 새롭게 포함된 UR 확률표에 의한 UR 에너지 영역에서의 자기 차폐 효과 등도 함께 살펴보았다.

3.1. 임계도 벤치마크 계산

LANL에서는 생산된 MCNP 코드용 라이브러리의 검증을 위해서 ICSBEP (International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project)[6] 및 CSEWG (Cross Section Evaluation Working Group) specifications[7]의 벤치마크 자료와 비교 계산을 수행하고 있다. 비록 이들 벤치마크 문제들이 모든 동위원소와 관심 있는 에너지 영역들을 모두 포괄할 수는 없지만, 가능한 한 넓은 범위의 에너지 영역과 다양한 중요 반사체 (reflector) 물질 등을 테스트할 수 있도록 선택되었다. 본 임계도 벤치마크 문제는 총 91개로 구성되어 있으며, 문제의 성격에 따라 13개의 그룹으로 구분된다.

본 연구에서는 91개의 벤치마크 문제들에 대한 검증 계산을 수행한 후, 각 라이브러리에 대한 계산 결과를 상호 비교해 보았다. 새롭게 생산된 세 라이브러리 간에 특이한 계산 결과를 보이는 문제들 중, 중성자 스펙트럼 및 핵반응율 (reaction rate) 등의 분석에 용이한 11개의 벤치마크 문제들을 대표로 선정하였다. 선정된 문제들의 입력문 명칭, 계산 모델, 개요 등을 표 1에 정리하였다. 본 연구에 선정되지 않은 문제들도 대체로 이들 11개의 벤치마크 계산 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

3.2. 계산 결과

본 계산에서는 임계도 (k_{eff}) 계산 결과에만 초점을 맞추었다. 모든 벤치마크 계산은 HP C-3600 워크스테이션에서 수행되었으며, MCNP version 4C 코드를 사용하였다. 그림 1은 본 연구에 선정된 11개 벤치마크 문제에 대한 ENDF60, KNE68, KNJ33, KNF30을 사용한 계산 결과와 벤치마크 실험값과의 차이를 보여주고 있다. 이들 11개 벤치마크 문제들을 사용된 핵연료 및 반사체, 노심 특성 등에 따라 분류하면 대체로 다음과 같이 6개의 그룹으로 구분할 수 있다.

(1) 고농축 U-233 연료 장전 고속로 노심 (23umt1)

23umt1은 반경 5.9838cm인 구형의 고농축 U-233 금속 연료로 장전된 JEZEBEL-23 노심이다. 이 노심은 전형적인 고속로 노심으로서 전체 중성자속의 97% 이상이 0.1 ~ 10 MeV 에너지 구간에 속한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, ENDF/B-VI에 근거한 ENDF60 및 KNE68을 사용한 계산 결과는 벤치마크 실험값과 비교할 때 k_{eff}가 약 7mk 정도 작게 계산되는데 비해 KNJ33과 KNF30은 k_{eff}를 각각 ~4mk와 ~13mk 정도 크게 계산되었다.

이에 대한 원인을 파악하기 위해, U-233 핵종의 라이브러리를 서로 변경해 가며 민감도 계산을 수행하였고 일부 에너지 구간에서 주요 악티나이드 핵종에 대한 핵분열 및 포획 반응율 (reaction rate)을 계산해 보았다. 즉, 벤치마크 문제에 필요한 모든 핵종에 대하여 KNE68 라이브러리를 사용한 계산을 기준으로 삼고, U-233 핵종만을 KNJ33과 KNF30으로 변경하며 벤치마크 계산을 수행하였다. 그 결과, 1 ~ 10 MeV 구간에서의 U-233 핵분열 반응율의 변화에 따라 k_{eff}가 민감하게 변화된다는 사실을 확인할 수 있었다. KNJ33을 사용할 경우, U-233 핵분열 반응율은 약 1.29% 증가하며, 그 때의 k_{eff}도 약 1.19% 증가한다. 마찬가지로, KNF30을 사용할 경우, U-233 핵분열 반응율은 약 3.56% 증가하며, 그 때의 k_{eff}도 약 2.08% 증가한다.

JENDL 라이브러리의 경우, JENDL-3.2에서 JENDL-3.3으로 개량되면서 수십 keV 이상의 U-233 핵분열 단면적이 새롭게 평가되었다. 이는 JENDL-3.2를 사용한 고속 중성자 노심에 대한 임계도 계산시 임계도가 과대평가 (overestimate) 되는 문제를 해결하기 위함이었다. 23umt1의 계산 결과를 살펴 보면 k_{eff}가 실험값에 매우 근접하게 계산되고 있어 이런 문제가 다소 개선되었음을 알 수 있다. 그러나, JEFF 라이브러리의 경우, JEF-2.2에서 JEFF-3.0으로 개량되면서 U-233의 중성자 반응 단면적으로 JENDL-3.2의 자료를 그대로 채택하였다. 따라서, 예전에 JENDL-3.2에서 나타났던 k_{eff}의 과대평가 문제가 JEFF-3.0에 그대로 재현되고 있다.

(2) 고농축 U-235 연료 장전 고속로 노심 (umet1ss)

umet1ss는 반경 8.7407cm인 구형의 고농축 U-235 금속 연료로 장전된 GODIVA 노심이다. 이 노심도 전형적인 고속로 노심으로서 전체 중성자속의 96% 이상이 0.1 ~ 10 MeV 구간에 속한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, KNE68 및 KNF30을 사용한 계산 결과는 벤치마크 실험값에 비해 k_{eff}가 작게 계산되는데 반해, KNJ33에서는 k_{eff}가 약간 크게 계산되고 있다.

이에 대한 원인을 파악하기 위해, 23umt1의 경우와 마찬가지로 U-235 핵종의 라이브러리를 서로 변경해 가며 민감도 계산을 수행하였고 일부 에너지 구간에서 주요 악티나이드 핵종에 대한 핵분열 및 포획 반응율을 계산해 보았다. 그 결과, 이 노심은 1 ~ 10 MeV 구간에서의 U-235 핵분열 반응율의 변화에 따라 k_{eff}가 민감하게 변화된다는 사실을 확인할 수 있었다. KNJ33을 사용할 경우, U-235 핵분열 반응율은 약 1.84% 증가하며, 그 때의 k_{eff}도 약 0.81% 증가한다.

JENDL 라이브러리의 경우, JENDL-3.2에서 JENDL-3.3으로 개량되면서 우라늄 핵연료로 장전된 노심에 대한 k_{eff}의 과대평가 문제를 해결하기 위해 U-235의 분리 공명 상수 (resolved resonance parameter)와 즉발 핵분열 중성자 스펙트럼 (prompt fission neutron spectrum)을 수정하였다. JENDL-3.3을 사용할 경우, 고속 에너지 구간에서 증가되는 U-235 핵분열 반응율에 의한 영향은 대부분의 고농축 U-235 연료 장전 고속로 노심 계산에서 나타나고 있다.

(3) Pu 연료 장전 고속로 노심 (pumet2)

pumet2는 반경 6.6595cm인 구형의 Pu 금속 연료로 장전된 JEZEBEL-Pu 노심이다. 이 노심의 연료로는 약 74%의 Pu-239와 약 20%의 Pu-240이 사용되며, 97% 이상의 중성자속이 0.1 ~ 10 MeV 구간에 속하는 전형적인 고속로 노심이다. 그림 1에서 보는 바와 같이, Pu 동위원소는 라이브러리 변경에 따른 영향이 비교적 적게 나타나며, KNJ33 및 KNF30을 사용한 계산 결과가 KNE68에 비해 k_{eff}를 약간 크게 예측하고 있음을 알 수 있다.

이에 대한 원인을 파악하기 위해, Pu-239 및 Pu-240 핵종의 라이브러리를 서로 변경해 가며 민감도 계산을 수행하였다. 그 결과, KNJ33 라이브러리의 Pu-239 자료는 1 ~ 10 MeV 구간에서의 Pu-239 핵분열 반응율을 감소시키며, Pu-240 자료는 동일 에너지 구간에서의 Pu-240 핵분열 반응율을 증가시킨다. 즉, KNJ33을 사용하면 두 핵종에 의한 서로 상반된 효과로 인해 k_{eff}가 약간 증가한다. 그러나, KNF30 라이브러리를 사용할 경우에는 Pu-239 및 Pu-240 자료 모두 핵분열 반응율을 증가시키는 역할을 하므로 k_{eff}가 KNJ33에 비해 조금 더 상승한다.

(4) 열중성자로 노심 (23usl1a, usol13a, pnl1)

23usl1a는 U-233 nitrate solution으로 된 구형의 ORNL-5 노심이고, usol13a는 U-235 nitrate solution으로 된 구형의 ORNL-1 노심이며, pnl1은 Pu nitrate solution으로 된 구형의 PNL-1 노심이다. 고속로 노심에서 비교적 큰 영향을 미쳤던 U-233, U-235, Pu-239, Pu-240 등이 열중성자로에 미치는 영향을 파악하기 위해 대표로 이들 3개의 벤치마크 문제를 선정하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 열중성자로는 라이브러리에 변경에 따른 k_{eff}의 영향이 작게 나타나며, KNJ33 및 KNF30을 사용한 계산 결과는 KNE68에 비해 k_{eff}가 조금씩 증가하는 것으로 나타났다.

(5) WC 반사체를 지닌 고농축 U-235 연료 장전 고속로 노심 (umet3k)

umet3k는 반경 6.0159cm인 구형의 고농축 U-235 금속 연료 노심을 반경 22.5259cm까지 WC (tungsten carbide) 반사체로 둘러싸고 있는 형태의 TOPSY 노심이다. 이 노심도 전형적인 고속로 노심으로서 중앙 핵연료 영역의 중성자속은 약 90% 이상이 0.1 ~ 10 MeV 구간에

속한다. 반면, 외곽 반사체 영역의 중성자속은 약 81% 이상이 0.01 ~ 1 MeV 구간에 속하고, 약 18%의 중성자가 0.001 ~ 0.01 MeV와 1 ~ 10 MeV의 구간에 분포하고 있다. 즉, 일반적인 핵종들의 비분리공명 에너지 영역에 속하는 0.001 ~ 0.1 MeV 구간에서 비교적 큰 중성자속이 발생한다.

그림 1에서 보는 바와 같이, UR 확률표를 사용하지 않을 경우 KNJ33 및 KNF30을 사용한 계산 결과는 KNE68과 비교할 때 k_{eff}를 크게 예측하고 있다. 이것은 고농축 U-235 연료로 장전된 고속로 벤치마크 문제인 umet1ss에서와 마찬가지로 1 ~ 10 MeV 구간의 U-235 핵분열 반응율이 조금씩 증가하기 때문에 나타난다. KNE68을 사용한 계산 결과를 살펴보면, UR 확률표 사용으로 인한 UR 영역의 자기 차폐 효과가 과도하게 커졌음을 알 수 있다. 이런 현상은 W 동위원소에 포함된 UR 확률표 때문에 나타나며, W 동위원소의 UR이 존재하지 않는 KNJ33 및 KNF30 라이브러리에서는 이런 현상이 발생하지 않는다.

이에 대한 원인을 파악하기 위해, W 동위원소의 라이브러리를 서로 변경해 가며 민감도 계산을 수행하였다. 즉, W 동위원소 자료로는 UR이 존재하지 않는 KNJ33을 사용하고 그 밖의 모든 핵종 자료로는 KNE68을 사용하는 기준 노심을 구성하였고, 각각의 W 동위원소 자료를 KNE68 자료로 변경해 가며 KNE68에 포함된 UR 확률표의 영향을 살펴보았다.

그 결과, W-182의 확률표가 k_{eff}에 미치는 효과는 7.46%, W-183에 의한 효과는 4.78%, W-184에 의한 효과는 4.94%, W-186에 의한 효과는 4.32%로 나타나 W-182의 영향이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 이 때 W 동위원소 포획 반응율을 살펴보면, W-182는 0.01 ~ 0.1 MeV 구간에서 약 1/8로 감소하고, W-183은 0.001 ~ 0.01 MeV 구간에서 "0"으로 나타났다. 또한, W-184는 0.01 ~ 0.1 MeV 구간에서 약 1/2로 감소하고, W-186도 0.01 ~ 0.1 MeV 구간에서 약 1/2로 감소하였다. 포획 반응율을 통해 알 수 있듯이, 확률표 형태로 표현된 비분리 공명 영역의 핵반응 단면적은 W 동위원소의 경우 과도하게 감소하거나 심지어 "0"이 되는 중대한 문제를 내포하고 있다. LANL도 이런 문제를 인지하고 있으며, ENDF60의 후속인 ENDF66[8] 라이브러리의 배포도 이러한 UR 확률표의 문제로 인해 지연되고 있다고 알려졌다.

(6) Normal U 반사체를 지닌 고속로 노심 (umet3a, bigten1, pumet6, mixmet8)

Normal 우라늄을 반사체로 사용하여 다량의 U-238을 포함하고 있는 고속로 노심 벤치마크 문제로는 핵연료 및 노심의 형태에 따라 umet3a, bigten1, pumet6, mixmet8 등 네 개를 선정하였다.

umet3a는 반경 6.7820cm인 구형의 고농축 U-235 금속 연료 노심을 반경 11.8620cm까지 normal 우라늄 반사체로 둘러싸고 있는 형태의 TOPSY 노심이다. 이 노심도 전형적인 고속로 노심으로서 중앙 핵연료 영역의 중성자속은 약 95% 이상이 0.1 ~ 10 MeV 구간에 속하며, 외곽 반사체 영역의 중성자속도 약 93% 이상이 0.1 ~ 10 MeV 구간에 속한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, KNF30을 사용한 계산 결과만 비교적 큰 차이를 보이며, KNE68 및 KNJ33을 사용한

계산 결과는 서로 유사한 결과를 보이고 있다.

이에 대한 원인을 파악하기 위해, U-235 및 U-238 핵종의 라이브러리를 서로 변경해 가며 민감도 계산을 수행하였다. 그 결과, KNJ33 라이브러리의 U-235 자료는 중앙 핵연료 영역에서 1 ~ 10 MeV 에너지 구간에서의 U-235 핵분열 반응율을 증가시키며, U-238 자료는 외곽 반사체 영역에서 0.1 ~ 1 MeV 구간에서의 U-238 포획 반응율은 증가시키고 1 ~ 10 MeV 에너지 구간에서의 U-238 핵분열 반응율은 감소시켰다. 즉, 임계도 측면에서 KNJ33은 U-235에 의한 k_{eff}의 상승 효과와 U-238에 의한 k_{eff}의 하락 효과가 서로 상쇄되는 것으로 판단된다. 반면, KNF30 라이브러리에서는 U-235에 의한 효과는 거의 나타나지 않으며 U-238에 의한 k_{eff}의 하락 효과만 크게 나타나므로 전체적인 k_{eff}가 KNE68 및 KNJ33에 비해 작게 계산되었다.

bigten1은 반경 30.48cm인 구형의 U-235 연료 노심을 반경 45.72cm까지 normal 우라늄 반사체로 둘러싸고 있는 형태의 BIGTEN 노심이다. 이 노심에서는 중앙 핵연료 영역의 중성자속은 약 68% 정도가 0.1 ~ 1 MeV 구간에 속하며, 외곽 반사체 영역의 중성자속은 약 93% 이상이 0.01 ~ 1 MeV 구간에 속한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, UR 확률표를 사용하지 않을 경우 KNE68을 사용한 계산 결과는 k_{eff}를 벤치마크 실험값보다 크게 예측하고 있으며, KNJ33 및 KNF30은 k_{eff}를 작게 예측하고 있다. UR 확률표를 사용할 경우 KNE68 및 KNF30을 사용한 계산에서는 UR 확률표에 의한 자기 차폐 효과가 매우 적은 것으로 나타났지만, KNJ33을 사용한 계산에서는 UR 확률표의 영향이 과도하게 커졌음을 알 수 있다.

이에 대한 원인을 파악하기 위해, U-238 핵종의 라이브러리를 서로 변경해 가며 민감도 계산을 수행하였다. 그 결과, UR 확률표를 사용하지 않을 경우, KNJ33 및 KNF30을 사용한 계산에서는 중앙 핵연료 영역과 외곽 반사체 영역에서의 U-238 핵분열 반응이 크게 감소되어 노심 전체의 k_{eff}도 크게 감소하는 것으로 나타났다. UR 확률표를 사용할 경우, KNJ33을 사용한 계산에서는 중앙 핵연료 영역과 외곽 반사체 영역에서 0.01 ~ 0.1 MeV UR 에너지 구간의 U-238 포획 반응율이 약 10% 이상씩 감소한다. 또한, KNJ33을 사용할 경우 노심내 0.001 ~ 0.1 MeV 구간의 중성자속이 증가되어 동일 구간의 U-235 핵분열 반응율을 증가시키는 작용을 한다. 즉, 본 벤치마크 문제의 경우 KNJ33에 포함된 UR 확률표를 사용함으로써 과도한 k_{eff}의 상승을 야기시키는 것으로 나타났다.

pumet6는 반경 4.5332cm인 구형의 Pu 금속 연료 노심을 반경 24.142cm까지 normal 우라늄 반사체로 둘러싸고 있는 형태의 FLATTOP 노심이다. 이 노심도 앞의 두 노심과 마찬가지로 KNJ33 및 KNF30을 사용할 경우 U-238에 의한 k_{eff}의 하락 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. umet3a에서는 KNJ33을 사용할 경우 U-235에 의한 k_{eff}의 상승 효과가 나타나 전체적인 k_{eff}가 KNE68과 비슷했지만, 본 노심은 중앙 핵연료 영역이 Pu으로 이루어져 있어 이러한 임계도 상쇄 효과가 나타나지 않는다.

mixmet8은 slab 형태의 얇은 Pu 연료 노심을 graphite와 normal 우라늄 반사체가 위 아래로 덧붙여진 형태의 ZEBRA 8A/2 노심이다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 이 노심에 대한

벤치마크 계산 결과는 bigten1 계산 결과와 매우 유사한 경향을 보인다. 특히, 이 노심에서는 KNJ33 라이브러리의 U-238 자료에 포함된 UR 확률표의 자기 차폐 효과가 극단적으로 증가하는 문제가 발생한다.

4. 요약 및 검토

최신의 평가 핵자료집인 ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3, JEFF-3.0에 근거한 MCNP4C 연속에너지 ACE 포맷 중성자 라이브러리인 KNE68, KNJ33, KNF30을 생산하였고, 총 91개의 LANL 임계도 벤치마크 문제에 대한 검증 계산을 수행하였다. 이들 중 특이한 계산 결과를 보이는 11개의 벤치마크 문제를 선정하였고, 각 핵종에 대한 라이브러리를 변경해 가며 민감도 계산을 수행함으로써 그 원인을 분석하였다. 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 고농축 U-233 연료로 장전된 고속로 노심에서는 KNJ33과 KNF30을 사용할 경우 U-233 핵분열 반응의 증가로 인해 k_{eff}가 상승한다. 특히, KNF30은 k_{eff}를 매우 크게 상승시킨다.
- 고농축 U-235 연료로 장전된 고속로 노심에서는 KNJ33을 사용할 경우 U-235 핵분열 반응의 증가로 인해 k_{eff}가 상승한다.
- Pu 연료로 장전된 고속로 노심과 열중성자로 노심에서는 라이브러리 변경에 따른 영향이 비교적 적으며, KNJ33과 KNF30을 사용할 경우 k_{eff}가 조금씩 상승한다.
- WC 반사체를 지닌 고농축 U-235 연료 장전 고속로 노심에서는 KNJ33과 KNF30을 사용할 경우 U-235 핵분열 반응의 증가로 인해 k_{eff}가 상승한다. 특히, KNE68의 UR 확률표를 고려할 경우 W 동위원소 포획 반응의 과도한 감소로 인해 k_{eff}가 크게 상승한다.
- Normal 우라늄 반사체를 지닌 고속로 노심에서는 KNJ33과 KNF30을 사용할 경우 U-238 포획 반응의 증가와 핵분열 반응의 감소로 인해 k_{eff}가 하락한다. 특히, KNJ33의 UR 확률표를 고려할 경우 U-238 포획 반응의 감소와 U-235 핵분열 반응의 증가로 인해 k_{eff}가 크게 상승한다.

마지막으로, KNE68의 W 동위원소와 KNJ33의 U-238에 대한 UR 확률표는 현재 문제점을 내포하고 있으므로 그 사용에 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중·장기계획사업 중 "원자력 연구개발용 핵자료 구축·평가" 과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. J.F. Briesmeister, "MCNP−A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C," LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory (2000).
2. J.S. Hendricks, S.C. Frankle, and J.D. Court, "ENDF/B-VI Data for MCNP," LA-12891, Los Alamos National Laboratory (1994).
3. 김도헌, 길충섭, 김정도, 장종화, "비분리공명 영역의 자기 차폐 효과를 고려하기 위한

MCNP4C용 라이브러리의 생산 및 검증," 한국원자력학회 2002추계학술발표회, 용평리조트 (2002).

4. 김도헌, 길충섭, 장종화, "ENDF/B-VI.8, JENDL-3.3, JEFF-3.0에 근거한 MCNP4C용 중성자 라이브러리 생산 및 벤치마크 계산," KAERI/TR-xxxx/2003, 한국원자력연구소 (2003). (to be printed)
5. S.C. Frankle, "A Suite of Criticality Benchmarks for Validating Nuclear Data," LA-13594, Los Alamos National Laboratory (1999).
6. "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments," NEA Nuclear Science Committee, NEA/NSC/DOC(95)03 (2001).
7. "Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specifications," ENDF-202, BNL19302, Brookhaven National Laboratory (1991).
8. J.M. Campbell, S.C. Frankle, and R.C. Little, "ENDF66: A Continuous-Energy Neutron Data Library for MCNP4C," 12th Biennial RPSD Topical Meeting, Santa Fe, NM (2002).

Table 1. Criticality Benchmark Descriptions

No.	Filename	1D/2D/3D	Benchmark Description
1	23umt1	1D	Jezebel-23, Bare Sphere of U-233
2	umet1ss	1D	Godiva, Unreflected Sphere of HEU, Simple Sphere Representation
3	pumet2	1D	Jezebel-Pu (20%), Bare Sphere of Pu-239 with 20% Pu-240
4	23usl1a	1D	ORNL-5, 1.0226g/l Unreflected 27.24" Sphere of U-233 Nitrate Solution
5	usol13a	1D	ORNL-1, Unreflected Sphere of Uranyl (20.12g/l) Nitrate
6	pnl1	1D	PNL-1, Idealized (No Container) Unreflected Sphere of Pu Nitrate Solution
7	umet3k	1D	6.5" Tungsten Carbide-Reflected HEU (93.5) Sphere, Topsy Assembly
8	umet3a	1D	2" Tuballoy-Reflected HEU (93.5) Sphere, Topsy Assembly
9	bigten1	1D	Bigten, 1D Model: U(N)-Reflected Uranium Sphere
10	pumet6	1D	Normal Uranium-Reflected Pu (93.80) Sphere, Flattop Assembly
11	mixmet8	3D	ZEBRA 8A/2, Graphite and Natural Uranium-Reflected Pu

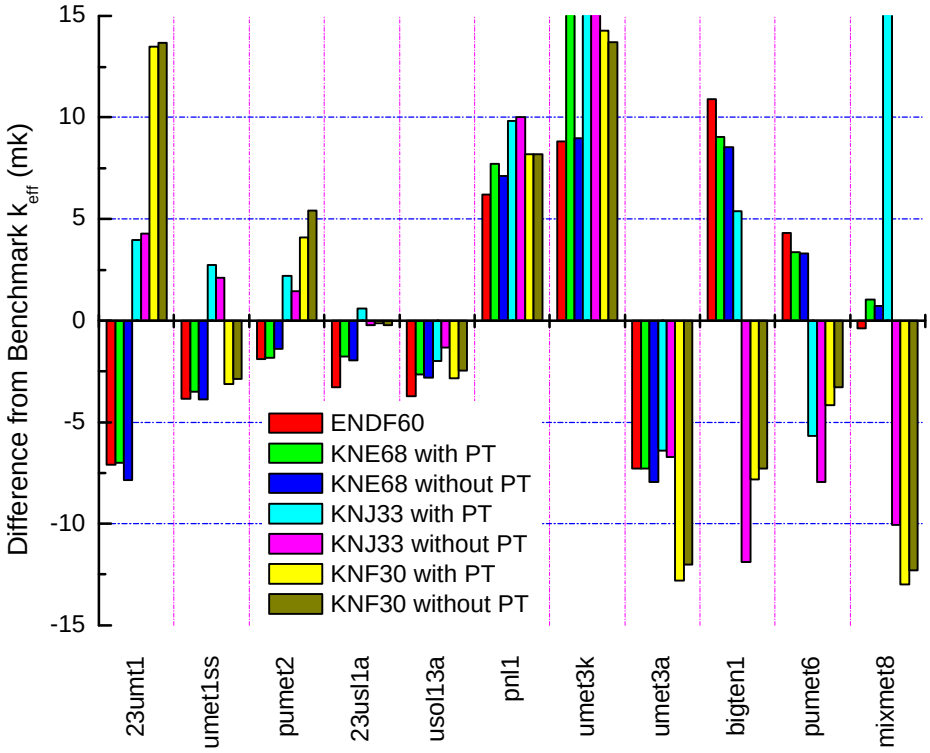

Figure 1. Comparisons of Calculated k_{eff} Differences from Benchmark k_{eff} Values