

## 고에너지 핵자료를 이용한 중성자 수율 계산

# Calculation of Neutron Yields Using The Latest High Energy Files

조영식, 장종화

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

양성자 가속기의 보급과 산업 및 연구 분야에서의 고에너지 핵자료의 수요 증가로 인하여 세계 각처의 핵자료 평가 기관에서는 핵자료의 에너지 영역을 20 MeV 이상으로 확장하는 작업을 현재 진행하고 있다. 지금까지 공식적으로 발표되었거나 발표 준비 중인 고에너지 핵자료로는 Los Alamos 의 LA150과 KAERI High Energy Files, JENDL High Energy Files 등이 있다. 고에너지 핵자료와 더불어 이러한 에너지 영역에서 정확한 입자 수송 계산이 가능한 코드의 개발이 요구되며 현재 대표적인 코드로는 Monte Carlo 코드인 MCNPX를 들 수 있다. 또한 이와는 달리 수송방정식을 사용해서 계산을 수행하는 코드로 KASKAD-S가 있다. 본 논문에서는 KASKAD-S 와 MCNPX 라는 두 가지 상이한 코드와 세 가지 고에너지 핵자료를 사용하여 양성자를 임의의 표적에 입사하였을 경우의 중성자 수율을 계산해 보고 그 결과를 측정치와 비교해 보았다.

### Abstract

Growing interest in the proton accelerator and accelerator-driven system (ADS) is accompanied with evaluation of nuclear data and development of a code system to simulate the elementary production of particles in spallation reactions and transport of these particles in the target. Up to now, three kinds of evaluations for high energy region have been released or in the preliminary stage. These evaluations include LA150, KAERI and JENDL HE Files. Total neutron yields for several targets bombarded by protons were calculated by particle transport codes such as MCNPX and KASKAD-S using the latest evaluations and then compared with the measured data.

## 1. 서 론

양성자가속기의 보급과 이를 이용한 ADS(Accelerator Driven System) 시설 등에 대한 큰 관심과 더불어 고에너지 양성자 및 중성자 핵자료와 고에너지 하전입자 수송계산이

가능한 코드에 대한 요구가 점차 늘어나고 있다. 고에너지 핵자료는 ENDF 형태로 입수할 수 있으며 현재 널리 사용 중인 것으로 41 가지 주요 핵종을 150 MeV 까지 평가하여 Los Alamos 연구소에서 발표한 LA150[1] 이 있다. 일본의 경우 평가에너지를 3 GeV 까지 확장한 JENDL HE Files를 발표할 예정이고 국내에서도 한국원자력연구소 핵자료평가랩에서 C-12, Fe-56, Cu-63, Cu-65, Pb-208 등의 11 가지 핵종에 대해 250 MeV 까지 평가한 고에너지 핵자료[2]를 발표한 바 있다.

고에너지 하전입자 수송계산을 할 수 있는 대표적인 코드로는 MCNP와 LAHET를 결합한 Monte Carlo 코드인 MCNPX[3] 가 있다. MCNPX 는 고에너지 핵자료를 사용한 수송계산이 가능하며 핵자료가 없는 에너지 구간에서는 Bertini INC 모델 등의 내장 모델을 사용할 수도 있다. 이 코드는 상세한 3차원 모델링이 가능한 반면 Monte Carlo 코드의 특성상 메모리 요구량이 많고 계산시간이 지나치게 길다는 단점이 있다.

이와 대비되는 코드로 KASKAD-S[4] 가 있다. 이 코드는 러시아의 KIAM (Keldysh Institute of Applied Mathematics)에서 개발한 코드로서 discrete ordinates method를 사용하여 수송방정식을 계산한다. x,z 및 r,z, r,θ geometry를 이용한 2D 계산만 가능하지만 Monte Carlo 코드에 비해 메모리 요구량이 적고 계산시간이 월등히 짧다는 장점이 있다. 20 MeV 이상의 양성자 및 중성자 수송 계산의 경우 단면적자료를 내장하고 있는 SADCO-2[5] 시스템의 FOROS라는 코드로부터 얻은 핵자료를 사용하도록 설계되어 있지만 몇 가지 유틸리티 코드를 개발하여 최신평가핵자료의 사용이 가능하도록 개량하였다.

## 2. 고에너지 양성자 및 중성자 핵자료 평가 현황

현재 널리 사용되고 있는 고에너지 핵자료로는 Los Alamos 연구소에서 평가한 LA150 이 있다. C, Fe, Cu, Pb, W 등의 41개 핵종에 대하여 150 MeV 까지 평가하였으며 현재 ENDF/B-VI Release 6에 포함되어 있다. 이 핵자료는 또한 MCNPX 고에너지 라이브러리 형태로 변환되어 MCNPX 코드 패키지에 포함되어 있다.

두 번째로 입수한 고에너지 핵자료는 한국원자력연구소 핵자료평가랩에서 자체적으로 평가한 자료이다. 현재 C-12, Fe-56, Cu-63, Cu-65, Pb-208 등 11 가지의 핵종에 대하여 250 MeV 까지 평가한 상태이며 추후 평가 핵종의 수는 더 늘어날 전망이다.

일본에서 발표 예정인 JENDL HE Files의 경우 평가에너지 영역을 최대 3 GeV 까지 확장하고 있다. 현재 평가가 완전히 끝난 상태가 아니라서 실제 계산에 적용할 수 있는 핵종의 수는 C-12, O-16, Al-27, Cu-63, Cu-65 등을 포함하여 15 개 정도이다.

## 3. 고에너지 입자수송계산용 코드의 소개 및 계산절차

### 3.1 KASKAD-S

KASKAD-S 는 러시아의 모스크바에 위치하고 있는 KIAM (Keldysh Institute of

Applied Mathematics)에서 개발한 코드로서 discrete ordinates method를 사용하여 수송 방정식을 계산한다. MCNPX와는 달리 계산속도가 빨라서 Pentium IV 1.8GHz CPU를 사용할 경우 반경 3 cm, 두께 1.61 cm의 구리(Cu)에 입사하는 100 MeV 양성자에 의한 중성자 수송 계산의 소요시간은 대략 10초 정도이다. 중성자 수송계산의 경우 전통적인 Boltzmann 수송방정식을 사용하며 하전입자 수송 계산을 위해서는 Boltzmann-Fokker-Plank (BFP) 방정식을 사용한다. 계산에 필요한 단면적자료는 FMAC-M 포맷으로 준비해야 한다.

20 MeV 이하의 단면적자료는 CONSYST[6]라는 코드를 이용하여 ABBN-93 단면적 라이브러리로부터 얻도록 되어 있으며 20 MeV 이상의 경우 계산에 필요한 단면적을 자체적으로 내장하고 있는 FOROS 라는 코드를 사용하여 생산한다. 하지만 ABBN-93 라이브러리와 FOROS 에 내장된 단면적자료는 갱신이 어렵고 최근의 고에너지 핵자료를 포함하고 있지 않으므로 임의의 핵자료로부터 KASKAD-S 계산용 단면적자료를 생산할 수 있도록 별도의 유틸리티 코드 2종을 개발하였다. 먼저 NJOY[7]와 TRANSX[8]을 이용하여 ENDF 포맷의 핵자료로부터 ANSN 포맷의 단면적자료를 생산한 후 새로 개발한 코드들을 사용하여 FMAC-M 포맷의 KASKAD-S 계산용 단면적자료를 얻을 수 있었다. 하전입자 계산을 위해 필수적인 stopping power 는 SRIM2003 이라는 별도의 코드를 통해 계산할 수 있었다.

### 3.2 MCNPX

MCNPX 는 MCNP 와 LAHET를 결합한 Monte Carlo 코드로서 현재 버전 2.5d 까지 나와 있다. 고에너지 영역에서의 입자 수송 계산을 위하여 Bertini, ISABEL, CEM INC (Intranuclear cascade) 등의 다양한 모델을 내장하고 있으며 필요시 핵자료를 NJOY로 처리한 후 외장 라이브러리 형태로 읽어서 사용할 수도 있다. 복잡한 형태의 3차원 모델링이 가능하며 pion을 포함한 다양한 입자의 수송계산이 가능한 반면 메모리 요구량이 많고 계산 시간이 길다는 단점이 있다. 본 논문에서는 중성자용 핵자료는 LA150 라이브러리를 사용하고 양성자 수송 계산을 위해서는 현재 널리 사용되고 있는 Bertini INC 모델을 적용하여 중성자 수송 계산을 수행하였다.

### 4. 계산 결과

먼저 기존의 FOROS 코드로 생산한 단면적자료를 사용해서 계산한 결과와 최신핵자료로부터 얻은 단면적자료를 사용해서 새로 계산한 결과가 표 1, 2, 3에 나와 있다. 표에서 알 수 있듯이 30 MeV 에서의 계산 결과를 제외하면 최신핵자료를 사용한 계산결과가 전반적으로 측정치에 더 근접하는 모습을 보여주고 있다. 특히 구리와 철의 경우 다른 핵종에 비해 측정치와의 차이가 적으며 이 중 구리는 거의 일치하는 계산 결과를 보여주고 있다.

그림 1에서 그림 5까지 세 종류의 평가핵자료를 사용해서 KASKAD-S로 계산한 주요 핵종에 대한 중성자 수율 계산 결과와 Bertini INC모델을 사용한 MCNPX 계산 결과 및 측정치를 서로 비교한 그림을 수록하였다. 그림 1에 나타난 탄소의 경우 KASKAD-S 계산 결과는 사용한 라이브러리와 무관하게 측정치 및 MCNP 계산 결과와 큰 차이를 보여주고 있으며 특히 JENDL 계산결과는 에너지가 증가함에 따라 더 큰 폭의 차이를 보여주고 있다. 그림 2의 철에 대한 계산 결과를 보면 KASKAD-S 계산 결과는 측정치 및 MCNPX 계산 결과와 큰 차이를 보이지 않으며 이 중 KAERI 고에너지 핵자료를 사용한 계산 결과는 MCNPX 계산 결과와 유사한 추이를 보여주고 있다. 그림 3은 구리에 대한 계산 결과로서 KASKAD-S 계산 결과와 측정치가 대체로 잘 일치하는 모습을 보여주고 있지만 에너지가 증가함에 따라 KAERI 핵자료를 사용해서 계산한 중성자 수율이 나머지 두 자료를 사용한 값보다 커지는 양상을 보이고 있다. 텅스텐 계산 결과인 그림 4의 경우 KASKAD-S 계산결과와 MCNPX 계산 결과가 큰 차이를 보이고 있으며 납에 대한 계산결과를 나타내고 있는 그림 5의 경우 KAERI 고에너지 핵자료 계산결과와 MCNPX 계산결과가 유사한 추이를 보여주고 있다.

## 5. 결론

LA150, JENDL 및 KAERI HE Files 등 세 종류의 고에너지 핵자료로 KASKAD-S를 사용하여 5가지 원소에 대한 중성자 수율 계산을 수행하였다. 이를 위해서 고에너지 핵자료로부터 KASKAD-S 용 단면적 자료를 생산할 수 있는 별도의 유틸리티 코드를 개발하였다. 또한 고에너지 핵자료를 사용해서 계산한 중성자 수율을 MCNPX 계산 결과 및 측정치와 비교해서 고에너지 핵자료 및 KASKAD-S 코드의 정확성을 검증해 보았다.

세 종류의 고에너지 핵자료를 사용해서 KASKAD-S로 계산한 중성자 수율은 핵종에 따라 서로 간에 큰 차이를 보이기도 하지만 전반적으로 잘 일치하며 MCNPX 계산 결과 및 측정치와 유사한 추이를 보여주고 있다. 또한 계산 결과에서 보듯이 모든 핵종에서 측정치를 완벽히 만족하는 핵자료는 없었으며 핵종 및 에너지 영역에 따라서 MCNPX 계산결과 및 측정치와 잘 일치하거나 혹은 그렇지 않은 양상을 보여주고 있다.

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

## 참고문헌

- 1) M. B. Chadwick, P. G. Young, R. E. MacFarlane, P. Moller, G. M. Hale, R. C. Little, A. J. Koning, and S. Chiba, "LA150 Documentation of Cross Sections, Heating, and Damage," LA-UR-99-1222 (1999).
- 2) Y. O. Lee et al., "Evaluation of Neutron Production Cross Sections and Emission

Spectra in the Proton-induced Reaction of C-12, Fe-56, and Pb-208 up to 250 MeV", *Proc. of PHYSOR 2002: ANS International Topical Meeting onin Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium*, Seoul, Korea, October 7-10, (2002).

- 3) "MCNPX User's Manual , Version 2.4.0," LA-CP-02-408, Los Alamos National Laboratory (2002).
- 4) A. M. Voloschenko and A. V. Shwetsov, "KASKAD-S-2.0 Two-Dimensional Discrete-Ordinates Neutron, Photon and Charged Particles Transport Code," User's Guide, Report No. 7-2-2000, Keldysh Inst. of Appl. Math., Moscow (2000).
- 5) D. V. Gorbakov and V. P. Kryuchkov, "SADCO-2: A Modular Code System for Generating Coupled Nuclear Data Libraries to Provide High-Energy Particle Transport Calculation by Multigroup Methods," *Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., A* **372**, 297 (1996).
- 6) G. N. Manturov, M. N. Nikolaev and A. M. Tsyboulia, "CONSYST/ABBN Data Code System," IPPE Report No. 9865, Obninsk (1998).
- 7) R. E. MacFarlane and D. W. Muir, "The NJOY Data Processing System Version 91," LA-12740-M (1994).
- 8) R. E. MacFarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS (1992).
- 9) T. Nakamura, M. Fujii and K. Shin, "Neutron Production from Thick Targets of Carbon, Iron, Copper, and Lead by 30- and 52-MeV Protons," *Nuclear Science and Engineering*, **83**, 444-458 (1983).
- 10) M. A. Lone, R. T. Jones and B. M. Townes, "Total Neutron Yields from 100 MeV Protons on Cu, Fe, and Th," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A256**, 135-142 (1987).

표 1. 30 MeV 양성자에 의한 중성자 수율 비교

Target	Conventional method CONSYST/ FOROS/ KASKAD-S	New method LA150/ NJOY/ KASKAD-S	Experimental Results [9]
Carbon	$4.52 \times 10^{-3}$ (296%)	$1.09 \times 10^{-4}$ (-90%)	$1.14 \times 10^{-3}$
Iron	$7.45 \times 10^{-3}$ (-25%)	$4.18 \times 10^{-3}$ (-58%)	$9.90 \times 10^{-3}$
Copper	$2.86 \times 10^{-3}$ (-76%)	$5.45 \times 10^{-3}$ (-55%)	$1.21 \times 10^{-2}$
Lead	$9.47 \times 10^{-3}$ (-45%)	$8.50 \times 10^{-3}$ (-51%)	$1.73 \times 10^{-2}$

표 2. 52 MeV 양성자에 의한 중성자 수율 비교

Target	Conventional method CONSYST/ FOROS/ KASKAD-S	New method LA150/ NJOY/ KASKAD-S	Experimental Results [9]
Carbon	$1.82 \times 10^{-2}$ (140%)	$3.27 \times 10^{-3}$ (-57%)	$\sim 7.58 \times 10^{-3}$
Iron	$4.33 \times 10^{-2}$ (112%)	$2.11 \times 10^{-2}$ ( 3%)	$\sim 2.04 \times 10^{-2}$
Copper	$1.08 \times 10^{-2}$ (-56%)	$2.78 \times 10^{-2}$ ( 13%)	$\sim 2.45 \times 10^{-2}$
Lead	$8.00 \times 10^{-2}$ (162%)	$4.86 \times 10^{-2}$ ( 59%)	$\sim 3.05 \times 10^{-2}$

표 3. 100 MeV 양성자에 의한 중성자 수율 비교

Target	Conventional method CONSYST/ FOROS/ KASKAD-S	New method LA150/ NJOY/ KASKAD-S	Experimental Results [10]
Iron	1.241 (979%)	0.093 (-19%)	0.115
Copper	0.072 (-50%)	0.144 (-0.7%)	0.145
Lead	0.398 ( 16%)	0.215 (-37%)	0.343

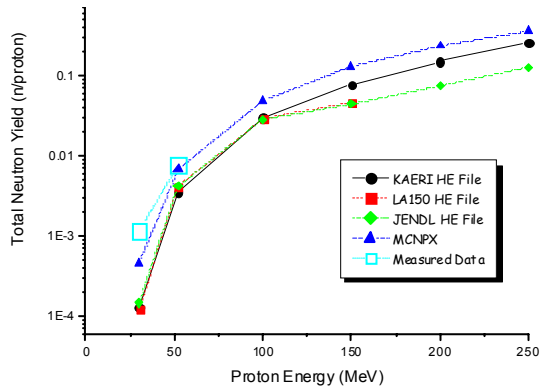


그림 1. 양성자에 의한 탄소(C)의 중성자 수율 계산 결과 비교

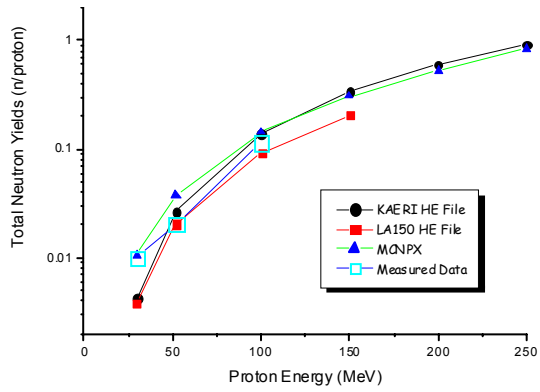


그림 2. 양성자에 의한 철(Fe)의 중성자 수율 계산 결과 비교

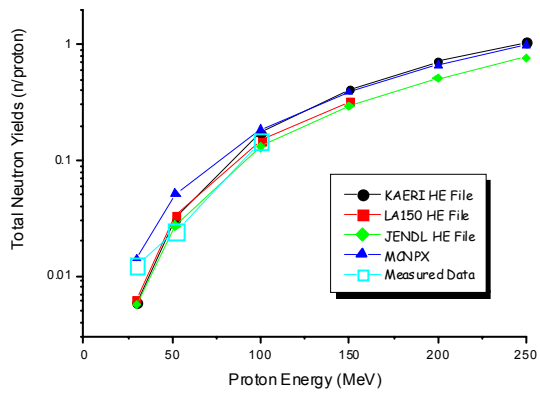


그림 3. 양성자에 의한 구리(Cu)의 중성자 수율 계산 결과 비교

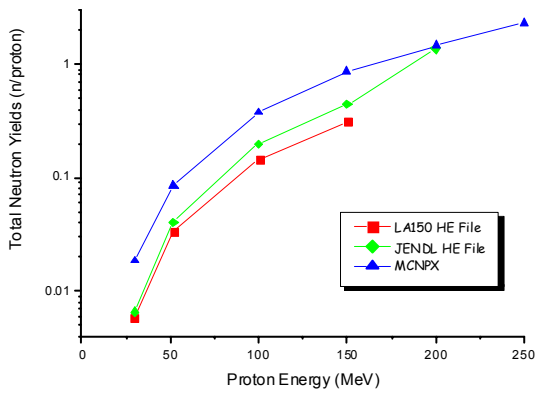


그림 4. 양성자에 의한 텅스텐(W)의 중성자 수율 계산 결과 비교

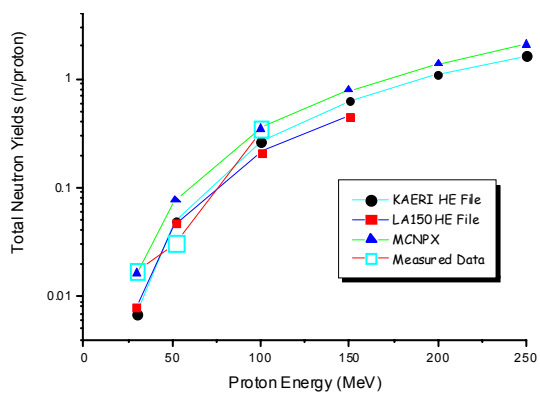


그림 5. 양성자에 의한 납(Pb)의 중성자 수율 계산 결과 비교