pISSN : 1976-0620, eISSN : 2384-0633
http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2015.9.5.295 "J. Korean Soc. Radiol., Vol. 9, No. 5, August 2015"

400 MeV/nucleon ^{12}C Ions Shielding Benchmark Calculations using MCNPX with Different Nuclear Data Libraries

Shin Yun Sung*, Kim yong min*, Kim dong hyun**, Jung nam suk**, Lee hee seock**

*Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu**
*Pohang Accelerator Laboratory , POSTECH***

400 MeV/nucleon ^{12}C 이온의 MCNPX 와 핵자료를 이용한 차폐 벤치마킹 계산

신윤성*, 김용민*, 김동현**, 정남석**, 이희석**

대구가톨릭대학교 방사선학과*, 포항가속기 연구소**

Abstract

There are various type of particle accelerators such as Kyoungju 100-MeV proton beam accelerator in Korea. And Korea plans to build large particle accelerator such as heavy ion accelerator and 4th generation light source facility. The accelerated high energy particles of these facility produce 2nd neutron after nuclear reaction with target materials. And then these 2nd neutron activate structural materials and surrounding environment. Accordingly, it is important to consider the activation and shielding calculation on design of facility for safety operation.

In this study, we tried to calculate and compare the neutron flux from the interaction la150 beam with target material(Cu) according to thickness of iron and concrete shielding material by MCNPX 2.7 with nuclear library JENDL/HE 07and la150. To verify the properties of nuclear library, we compared computational results with experimental value. These results can be used for dose evaluation technology in planning of the shielding of large particle accelerator.

Keyword : 400MeV/nucleon ^{12}C beam, neutron sheild, MCNPX 2.7.0, Nuclear data, la150, JENDL/HE 07

요 약

현재 우리나라는 포항방사광가속기와 국립암센터의 양성자 치료용 가속기와 경주 양성자 가속기가 운영되고 있고 중이온 가속기, 4세대 방사광가속기 등 대형가속기 시설이 건설 중에 있다.

이들 시설에서 고에너지로 가속된 입사입자는 표적물질과 상호작용 후 2차 중성자를 발생시키고, 이 중성자는 가속기 구조물 및 주변 콘크리트, 토양, 지하수 등을 방사화 시킨다. 따라서 이러한 가속기 시설의 안전적 측면을 고려할 때 방사화를 일으키는 중성자의 차폐가 중요하다.

본 연구는 차폐해석에 사용되는 몬테카를로 코드 중 MCNPX를 이용하여 ^{12}C beam빔과 표적물질(Cu)과의 상호작

Corresponding Author: Yong Min Kim E-mail:ymkim17@cu.ac.kr Tel: +82-053-850-2522
Addr. D13-13 HAYANG-RO, HAYANG-EUP, GYEONGSAN-SI, GYEONGSANGBUK-DO, REP. OF KOREA, 712-702, Catholic University of Daegu
Received : June 10, 2015 Revised : July 10, 2015 Accepted : August 25, 2014

용 후 생성되는 중성자를 계산하고, 그 중성자의 철 차폐체와 콘크리트 차폐체의 두께별 투과 후 스펙트럼을 MCNPX의 JENDL/HE 07과 la150을 이용해 비교하여 계산하였다. 빔의 방향과 차폐체의 종류 및 두께에 따라 그 결과를 실험값과 비교하여 검증함으로써 핵자료의 특성을 확인하였으며 향후 대형가속기시설의 선량평가용 기반기술로 활용하고자 하였다.

중심단어: 400MeV/nucleon ^{12}C beam, 중성자차폐, MCNPX 2.7.0, 핵자료, la150, JENDL/HE 07

Ⅰ. INTRODUCTION

우리나라의 경우 포항방사광가속기와 국립암센터의 양성자 치료용 가속기와 경주 양성자 가속기가 운영되고 있고 중이온가속기, 4세대 방사광가속기 등 대형가속기시설이 건설 중에 있다.

이러한 대형가속기시설에서 수백 MeV ~ 수 GeV까지 가속된 입사입자는 표적물질과 상호작용 후 2차 중성자를 발생시킨다. 이때 발생된 2차중성자는 가속기 시설 및 시설 구조물 등을 방사화 시키고[2], 방사선 피폭을 일으킨다.

2차 중성자의 효율적인 차폐를 위해 차폐체의 구성물질 및 두께 등의 결정은 몬테카를로 전산 해석을 통하여 이루어진다. 하지만 그 결과는 전산코드별 성능과 코드별 특징에 따라서 차이가 발생할 수 있다[3],[4] . 이러한 코드별 해석의 차이는 시설 설계의 차이로 이어질 수 있다.

본 연구는 몬테카를로 코드 중 하나인 MCNPX 2.7.0[5]를 이용하여 400 MeV/nucleon ^{12}C beam과 표적물질(Cu)과 상호작용 후 생성되는 중성자의 콘크리트 차폐체와 철 차폐체 투과한 후 스펙트럼을 측정한 HIMAC(Heavy-Ion Medical Accelerator In Chiba, Japan)의 M. Sasaki et al. 의 실험[6]과 NEA database, SINBAD(Shielding INtegral Benchmark Archivement Database)[7]를 벤치마킹하여, 20 MeV이상 중성자 등의 반응 핵자료(JENDL/HE 07[8], la150[9])에 따라 각각의 차폐체의 두께를 투과 후 검출되는 2차 중성자의 스펙트럼 차이를 실험값과 비교 검증하고자 하였다.

Ⅱ. MATERIAL AND METHOD

1. 핵자료 설명 및 계산구조 · 조건

계산에 사용된 MCNPX는 랜덤넘버를 이용하여 방사선수송해석을 하는 전산시뮬레이션이며, 핵자료 JENDL/HE 는 일본 원자력 연구소의 핵 데이터 센터에서 개발 하여 106가지 핵종을 최대 에너지 3 GeV까지 평가하였으며, la150 은 Los Alamos 연구소에서 41가지 주요핵종을 최대에너지 150 MeV 까지 평가하여 발표한 자료이다.

코드 계산에 사용된 Geometry는 SINBAD 중 HIMAC의 400 MeV/nucleon ^{12}C beam과 Cu 표적과의 반응 후 생성되는 2차 중성자의 스펙트럼을 각각 콘크리트 차폐체, 철 차폐체를 투과 후에 측정한 실험을 benchmark 하여 단순화하였다.

1.1 선원항 검증에 사용된 계산구조 및 계산조건

400 MeV/nucleon ^{12}C beam과 표적물질(Cu)과 상호작용 후 생성되는 중성자 스펙트럼 계산을 위해 HIMAC 의 실험[10],[11]을 선정하여 중성자 선원항 검증계산을 하였다.

계산에 사용된 표적물질은 직육면체 (10 cm(w)×10 cm(l)×5 cm(t))모양의 Cu (63Cu 70%, 65Cu 30%, 밀도 8.96 g/cm3)이다.

중성자 스펙트럼 검출 각도는 실험과 같은 0°, 7.5°, 15°, 30°, 60°, 90° 이다. 선원항 계산에 사용된 계산구조는 Fig. 1과 같다.

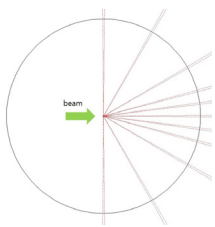

Fig. 1. Geometry used for source term calculation.

해당하는 각도에서의 중성자 스펙트럼을 검출하기 위해 각도마다 2개의 cone 구조를 이용하여 cone의

바깥쪽과 안쪽의 겹치는 부분을 얇은 띠 모양으로 tally를 설정하였다.

표적물질에서 검출부까지의 거리는 10 m로 설정하였고, cone의 검출 각도는 검출 각도에서 ± 0.5° 로 설정하였으며 F2 tally(Surface Flux : #/cm^2)를 이용하여 각 영역에서의 불확도는 10% 미만이되게 충분한 이력수로 중성자 flux값을 구하였다.

1.2 중성자수송 검증에 사용된 계산구조 및 계산조건

수송능력 계산 benchmark 이용된 HIMAC 실험의 입사빔은 선원항문제와 같은 400 MeV/nucleon ^{12}C beam과 표적물질 Cu (^{63}Cu 70%, ^{65}Cu 30%,밀도 8.96 g/cm3), 차폐물질은 Fe(^{54}Fe 5.8%, ^{56}Fe 91.72%, ^{57}Fe 2.2%, ^{58}Fe 0.28% 7.8 g/cm3)와 콘크리트(^{1}H 17.2%, ^{12}C 0.18%, ^{16}O 57.2%, ^{24}Mg 0.15%, ^{27}Al 2.1%, ^{30}Si 20.7%, ^{40}Ca 1.8%, ^{56}Fe 0.43%, 밀도 2.2 g/cm3)이다[7].

실험과 정확한 결과를 비교하기 위하여 표적물질 Cu는 5 cm(w)×5 cm(l)×5 cm(t)의 정육면체이며, 차폐물질은 50 cm(w)×50 cm(l)의 정사각형 모양에 철 차폐체 두께(t)는 20 cm, 80 cm, 100 cm, 콘크리트 차폐체는 50 cm, 100 cm, 200 cm로 실험과 같게 설정하였고, 검출기에서 불확도는 5%미만이되게 충분한 이력수로 계산하였다.

계산에 사용된 계산구조는 Fig. 2 와 같다.

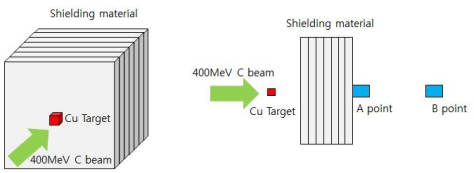

Fig. 2. Geometry used for calculation of the neutron transport.

효율적인 계산을 위하여 분산감소 기법을 사용하였으며, 따라서 차폐체는 10 cm 단위로 분할하여 두께에 맞게 설정하였다.

검출기의 위치는 A point는 차폐체가 끝나는 부분, B point는 철 차폐체 실험의 경우 표적에서 503 cm, 콘크리트의 경우 498 cm 떨어져있다. 검출기 모양은 지름 6.35 cm, 높이 12.7 cm의 실린더 형태이며, F4 tally(Track length estimate of cell flux : #/cm2)를 이용하여 중성자 flux값을 구하였다.

Ⅲ. RESULT

1. 선원항 검증 계산 결과

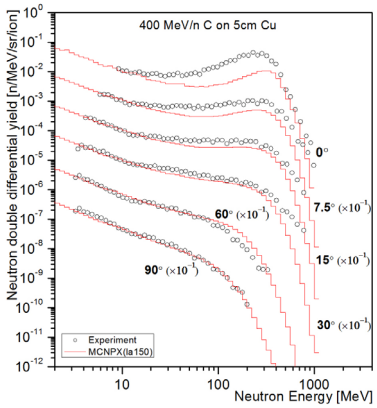

Fig. 3. Neutron flux produced using the nuclear data (la150) from the interaction of 400MeV/nucleon ^{12}C beam and 5cm Cu target depending on an angle.

Fig. 3은 400 MeV/nucleon의 ^{12}C 입사빔이 Cu 표적과 반응 후 생성되는 중성자 flux를 각각 0°, 7.5°, 15°, 30°, 60°, 90°에서 실험값과 계산결과의 비교 그래프이다. 표적물질과 핵자료(JENDL/HE 07 , la150)차이에 따른 중성자생성률은 크게 차이가 없었던 선행 연구[12],[13] 결과를 토대로 표적물질과의 반응에는 Cu 원소가 포함된 핵자료 la150을 사용하였다. 계산결과 표적물질과 반응 후 생성된 중성자는 빔의 진행방향에 가까울수록 저평가 되는 양상을 확인 할 수 있다[14].

이 결과로 보아 표적물질과 입사빔과 반응에서 중성자 생성정도는 빔의 진행 방향에 대해서는 실험값과 비교하여 약 30% 과소평가 하고 있으므로 차폐시 고려해야한다.

2. 철 차폐의 중성자 수송능력 검증 결과

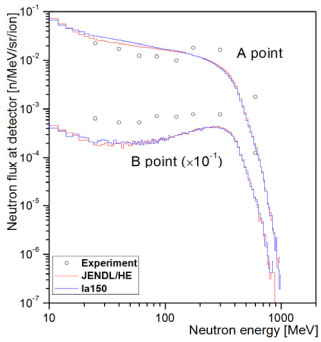

Fig. 4. Neutron flux after penetration of 20 cm iron shielding form the neutron flux of 400 MeV/nucleon ^{12}C beam and 5 cm Cu target.

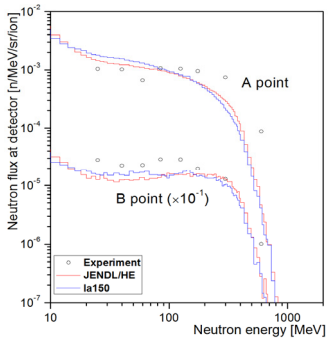

Fig. 5. Neutron flux after penetration of 80 cm iron shielding form the neutron flux of 400MeV/nucleon ^{12}C beam and 5 cm Cu target.

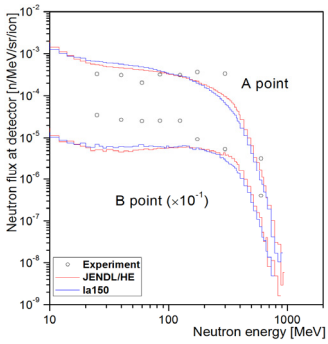

Fig. 6. Neutron flux after penetration of 100 cm iron shielding form the neutron flux of 400 MeV/nucleon ^{12}C beam and 5 cm Cu target.

Fig. 4~6은 400 MeV/nucleon ^{12}C beam과 Cu 표적과의 반응 후 생성된 중성자가 철 차폐체(20 cm, 80 cm, 100 cm)를 투과 후 A, B point에서 계산된 결과이다. 20 cm 두께에서는 핵자료간 차이가 크지 않으나 두께가 증가할수록 100 MeV 이하 영역에서는 JENDL/HE 07을 이용한 계산결과가 la150을 이용한 계산결과보다 저평가 하는 것을 보여주고 있으며, 100 MeV 이상 영역에서는 la150을 이용한 계산결과가 JENDL/HE 07을 이용한 계산결과보다 저평가 하는 것을 보이며, 그 차이는 차폐체의 두께가 증가할수록 커지는 것이 확인되었다.

차폐체를 투과 후 계산된 총 중성자의 평가정도는 차폐체의 두께가 20 cm 일 때 la150을 이용한 계산결과가 JENDL/HE 07을 이용한 계산결과 보다 약 15% 저평가 하고 있으며, 차폐체의 두께가 증가함에 따라 저평가 양상은 증가하여 100 cm 두께에서는 약 23% 까지 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

측정 거리에 따른 차이로는 A point에서는 100 MeV 이하 영역에서는 계산값이 실험값보다 과평가 하는 양상을 보이며, 100 MeV 이상 영역에서는 계산값이 실험값보다 저평가 하는 양상을 보이는 반면, B point 영역에서는 핵자료에 상관없이 모두 저평가 양상을 보이고 있다.

3. 콘크리트 차폐의 중성자 수송능력 검증 결과

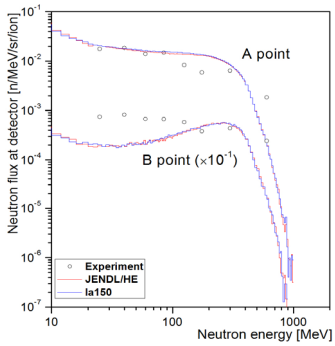

Fig. 7. Neutron flux after penetration of 50 cm concrete shielding form the neutron flux of 400 MeV/nucleon ^{12}C beam and 5 cm Cu target.

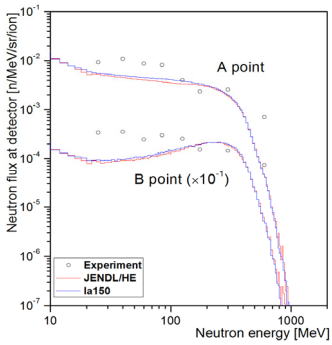

Fig. 8. Neutron flux after penetration of 100 cm concrete shielding form the neutron flux of 400 MeV/nucleon ^{12}C beam and 5 cm Cu target.

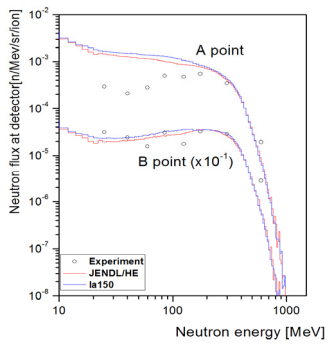

Fig. 9. Neutron flux after penetration of 200 cm concrete shielding form the neutron flux of 400 MeV/nucleon ^{12}C beam and 5 cm Cu target.

Fig. 7~9은 400 MeV/nucleon ^{12}C beam과 Cu 표적과의 반응 후 생성된 2차 중성자의 콘크리트 차폐체(50 cm, 100 cm, 200 cm)를 투과 후 A, B point에서 계산된 결과이다. 앞서 계산한 철 차폐체와 같은 양상으로 50 cm 두께에서 핵자료간 차이가 크지 않으나 두께가 증가할수록 JENDL/HE 07을 이용한 계산결과와 la150을 이용한 계산결과의 차이가 발생하며, 철 차폐체와는 다르게
JENDL/HE 07을 이용한 계산결과가 la150을 이용한 계산결과보다 저평가 되는 것을 확인 할 수 있었다.

차폐체를 투과 후 계산된 총 중성자의 평가정도는 차폐체의 두께가 50 cm 일 때 JENDL/HE 07을 이용한 계산결과가 la150을 이용한 계산결과 보다 약 2.5% 저평가하고 있으며, 차폐체의 두께가 증가함에 따라 저평가 양상은 증가하여 200 cm 두께에서는 약 18.6% 까지 증가 하는 것을 확인할 수 있었다.

Ⅳ. CONCLUSION

본 연구에서는 MCNPX를 이용하여 구리 표적과의 상호작용 후 생성되는 2차 중성자의 철 차폐체, 콘크리트 차폐체 투과 후의 스펙트럼을 핵자료에 따라 비교계산 해보았다.

선원항 계산결과와 실험값을 비교한 결과, 빔의 진행방향에 가까운 방향일수록 저평가 양상이 커지는 것이 확인되었다.

생성된 중성자의 철 차폐체를 투과 후 계산결과 역시 실험값에 비해, 사용되는 핵자료와 관계없이 저평가되는 양상을 보이고 있다.

철 차폐체의 두께가 증가할수록 핵자료에 따른 계산결과의 차이가 두께 100 cm 에서 약 23%까지 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

차폐체가 콘크리트인 경우에도 계산결과가 실험값보다 저평가되고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 콘크리트 차폐체의 두께가 증가할수록 핵자료에 따른 계산결과의 차이가 두께 200 cm 에서 약 18.6%까지 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

핵자료별 계산결과가 차폐체의 물질에 따라 계산의 차이가 존재하며, 그 차이는 차폐체의 두께가 증가함에 따라 커지는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 향후 MCNPX를 이용하여 대형가속기 시설의 차폐벽 설계 계산을 할 경우 핵자료별 특징을 고려하여야 할 것이며, 이때 발생되는 중성자에 대한 피폭선량과 방사화 정도는 보수적으로 평가 할 필요성이 있다고 판단된다.

본 연구를 통해 도출된 결과들은 향후 대형가속기 시설의 선량평가용 기반기술 및 안전관리절차서 등의 개발에 활용이 가능할 것으로 생각된다.

Acknowledgement

This research was supported by Nuclear Safety Research Program through the Korea Radiation Safety Foundation

funded by Nuclear Safety and Security commission. (No.1303026).

Reference

[1] Ryu, Y., Dong, K., Chung, W., Cho, J., Park, Y., & Jung, H. (2012). A survey on the knowledge of radiation safety management (RSM) in the context of industrial use of radiation. Journal of the Korean Society of Radiology, 6(3), 159-166.

[2] d'Errico, F. (2005). NCRP report no. 144—Radiation protection for particle accelerator facilities national council on radiation protection and measurements issued 31 december 2003; revised 7 january 2005: NCRP, Radiation Protection Dosimetry, 113(4), 456-457.

[3] Hideo, H. (2005). Intercomparison of medium-energy neutron attenuation in iron and concrete (7). Shielding aspects of accelerators, targets and irradiation facilities-SATIF-9.

[4] H. Hirayama and T. Sanami, Inter-comparison of particle production, Proc. of SATIF-12, Fermi National Laboratory, 2014.

[5] D.B. Pelowitz et al., MCNPX 2.7.0 Extensions, LA-UR-11-02295, 2011.

[6] Sasaki, M., Kim, E., Nunomiya, T., Nakamura, T., Nakao, N., Shibata, T., et al. (2002). Measurements of high-energy neutrons penetrated through concrete shields using self-TOF, NE213, and activation detectors. Nuclear Science and Engineering, 141(2), 140-153.

[7] OECD Nuclear Energy Agency Data Bank SINBAD (Shielding Integral Benchmark Archive and Database) https://www.oecd-nea.org/science/wprs/shielding/sinbad/

[8] Watanabe, Y., Fukahori, T., Kosako, K., Shigyo, N., Murata, T., Yamano, N., et al. (2005). Nuclear data evaluations for JENDL high-energy file. AIP Conference Proceedings, , 769. (1) pp. 326.

[9] Chadwick, M., Young, P., & Moller, P. (1998). LA150 library ENDF neutron cross-section benchmarks. And "LA150 Library ENDF Proton Cross-Section Benchmarks", Los Alamos National Laboratory, Unpublished,

[10] Kurosawa, T., Nakao, N., Nakamura, T., Uwamino, Y., Shibata, T., Nakanishi, N., et al. (1999). Measurements of secondary neutrons produced from thick targets bombarded by high-energy helium and carbon ions. Nuclear Science and Engineering, 132(1), 30-57.

[11] Kurosawa, T., Nakao, N., Nakamura, T., Uwamino, Y., Shibata, T., & Fukumura, A. (2000). Measurements of thick target neutron yields from 100 to 800 MeV/Nucleon heavy ions. Journal of Nuclear Science and Technology, 37(sup1), 135-141.

[12] Yun sung Shin, Yong min, Da yeong Kwon. "A study on the verification of transmittance in the shielding material of neutron produced after interaction between carbon beam and cooper target from the nuclear library in MCNPX." Journal of The Korean association for radiation protection. autumn. 2014, 294-295.

[13] D.H. Kim, Y.S. Shin, Mokhtari Oranj, J.H. Oh. N.S. Jung, D.Y .Kwon, Y.M.Kim and H.S. Lee. "benchmarking study for high energy carbon ion induced neutron using several Monte Carlo Codes." Transaction of Korean Nuclear Society. Autumn 2014.

[14] OH, J., LEE, H., PARK, S., KIM, M., HONG, S., KO, S., et al. (2011). Comparison of the FLUKA, MCNPX, and PHITS codes in yield calculation of secondary particles produced by intermediate energy proton beam. Carbon, 3, 5.83.