2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

양성자의 표적 철 충돌로 발생되는 중성자 스펙트럼과 선량 분포의 벤치마크 계산

Benchmark Calculation of Neutron Spectra and Dose Distribution from an Iron Target for Protons

권정완,장기원,홍종호,이재기
한양대학교
서울시 성동구 행당동 17

요 약

양성자의 표적 철 충돌로 발생되는 중성자 스펙트럼과 콘크리트 두께에 따른 중성자 선량 분포 계산을 몬테칼로 코드를 이용하여 수행하였다. 다양한 방출각도에서 계산된 중성자 스펙트럼은 선행연구자들의 실험 및 계산에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 콘크리트 두께에 따른 중성자 선량 분포 또한 모든 방출각도에서 실험치를 과대평가 하기는 하지만 그 차이는 크지 않았다. 본 계산을 통해 향후 수행될 몬테칼로 코드를 이용한 양성자 가속기 설치 건물내의 차폐 해석 및 차폐 계산을 통한 선량평가의 가능성 및 타당성을 확보하였다.

Abstract

Neutron spectra from an iron target for protons and dose distribution according to thickness of concrete were calculated using MCNPX code. Calculated neutron spectra at various emission angles were in good agreement with the experimental and calculated results of preceding researchers. The calculated dose distribution overestimated the experimental data for all emission angles, but the discrepancies were small. Through this calculation, the possibility and validity of the shielding analysis and dose evaluation in building of proton accelerator by Monte Carlo code were obtained.

1. 서 론

양성자 빔을 이용한 치료는 광자 및 전자에 비해 국소 집중면에서 우수한 치료법으로 수정체 암과 같은 경우 유일한 치료법으로 제안되고 있으며 전세계적으로 증가 추세에 있다[1]. 국내의 경우도 국립암센터(NCC)에 사용빔 최대 에너지가 235 MeV인 암 치료용 양성자 가속기가 도입중에 있다. 그러나 사이클로트론에 의해 가속된 고에너지의 양성자는 가속기 구성 물질 및 표적 물질과 반응하여 원치 않는 중성자를 생성하게 되며, 이렇게 발생된 방사선원은 작업자나 일반인의 피폭을 야기시킨다. 몇몇의 선행연구자들은 에너지 및 방출각에 의존적인 중성자 수율을 계산 및 실험에 의해 획득하고 이를 방사선 차폐 설계에 이용하고 있다.[2,3] 몬테칼로 기법을 이용하는 다양한 코드는 이런 평가에 중요한 역할을 수행에 오고 있으며 앞으로도 중요한 역할을 수행하게 될 것이다. 이에 본 연구에서는 선행연구자들의 실험 및 계산에 의한 중성자 스펙트럼과 본 연구에서 생성된 중성자 스펙트럼을 비교함으로써 최신의 몬테칼로 코드인 MCNPX ver. 2.4.0 코드[4]를 이용하여 생성된 중성자 스펙트럼의 정확성을 확인하고자 하였다. 또한 230 MeV 양성자에 의한 콘크리트 차폐체 내에서의 중성자 선량분포 계산을 수행함으로써 중성자 수율 및 방사선 차폐계산의 정확성을 확인하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 MCNPX ver. 2.4.0

몬테칼로 기법을 이용하는 다양한 계산코드 중 정교한 방사선의 거동모사와 복잡한 기하학적 구조 모사가 가능한 MCNPX(ver. 2.4.0)을 사용하였다. 단면적 자료는 150 MeV 이하의 에너지에서는 테이블화 되어 있는 LA150 library[5]를 이용하였으며, 150 MeV이상의 에너지를 가진 입자에 대해서는 Intranuclear cascade(INC) model로 ISABEL 모델[6]을 이용하였다. 또한 default physics module을 사용하였는데 예를 들면 중성자와 양성자의 탄성산란과 Intranuclear cascade 후의 pre-equilibrium model이다.

2.2 계산방법

중성자 스펙트럼

가속된 양성자의 표적 철 충돌로 발생되는 중성자 스펙트럼 계산에 사용된 기하학적 모델은 그림2-1과 같다. 즉 표적물질의 중심에서 2m 떨어진 곳에 1 mm 두께의 spherical shell을 두고 Track length estimator인 MCNPX 계산자(tally) F4를 사용하여 중성자 플루언스를 계산하였다. 선원은 256 MeV 양성자를, 표적물질로는 양성자를 제동하기에 충분한 두께의 실린더 형태의 철(Φ=160 mm × 80 mm)을 이용하였다. 이때 방출각도는 7.5, 30, 60, 120, 150。 이며 각 방출각은 그림2-1과 같이 ±2° 의 각폭을 지닌다. 각 에너지 구간의 상대오차가 수 %에 달하는 유의한 수준의 계산결과를 얻기 위하여 10^7 개의 history를 사용하였다.

중성자 선량 분포

230 MeV 양성자의 표적 철 충돌로 발생되는 중성자에 의한 콘크리트 차폐체 내에서의 선량분포 계산 수행을 위해 그림2-2와 같은 기하학적 구조가 기하학적 모델로 가정되었다. 표적의 중심에서 콘크리트 안쪽 벽까지의 두께와 콘크리트 벽 두께는 각각 1 m와 4 m이다. 표적물질은 직경 116 mm 길이 75.1 mm 실린더형 철로 모델의 중심에 위치하며 230 MeV 양성자 빔 소스가 중심으로 입사됨을 가정하였다. 콘크리트의 밀도와 조성은 표1에 제시된 Siebers등[7]의 실험에 기초한 값을 사용하였다. 우선 중성자 스펙트럼 계산에서와 마찬가지로 0, 22, 45, 90 ° 에 해당하는 방향으로 방출되는 중성자 플루언스를 계산하고 여기에 플루언스-선량 환산인자를 적용함으로써 선량분포 계산을 수행하였다. 그림2-3에 제시된 것처럼 200 MeV이하의 에너지에서는 ICRP 74[8]의 자료에, 200 MeV이상의 에너지에서는 Iwai등[9]에 의해 평가된 자료에 기초한 플루언스-선량 환산인자가 사용되었으며 유의한 수준의 결과를 얻기 위해 5×10^{7} 개의 history를 사용하였다.

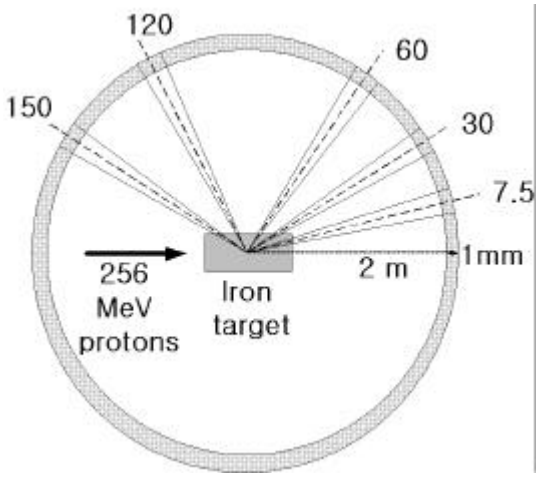

Fig. 2-1. Geometrical model for neutron yield calculation.

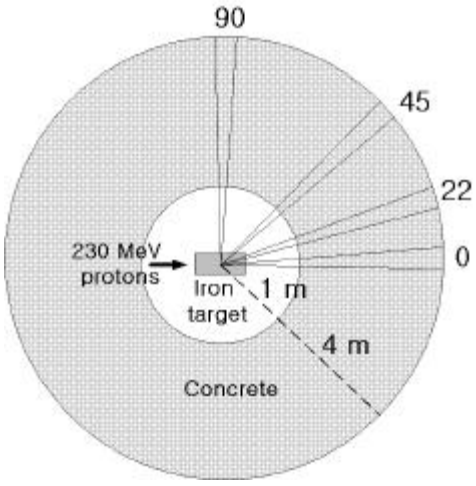

Fig. 2-2. Geometrical model for radiation shielding calculation.

Table 1. Density and compositions of concrete used in shielding calculation.

Density (g/cm^3)	Element	number density (10^{22} atom/cm^3)	Element	number density (10^{22} atom/cm^3)
1.88	O	3.84e+00	Mg	1.60e-01
	H	1.90e+00	Al	1.60e-01
	Si	6.80e-01	Fe	4.00e-02
	Ca	3.60e-01	K	3.00e-02
	C	3.30e-01	Na	1.00e-02

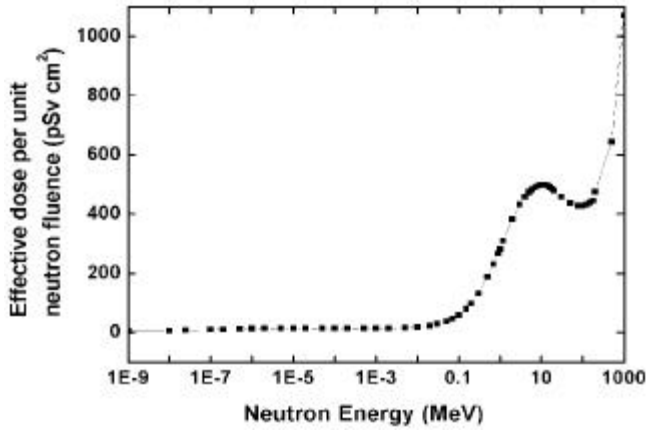

Fig. 2-3. Fluence-to-dose conversion factors were based on ICRP Pub. 74 up to 200 MeV neutrons and data evaluated by Iwai et al.

3. 결과 및 토의

중성자 스펙트럼

그림3-1은 256 MeV 양성자의 표적 철 충돌로 발생되는 중성자 스펙트럼에 대한 Ryuichi Tayama[2]등의 MCNPX ver. 2.1.5 및 NMTC/JAM + MCNP-4A 코드를 이용한 계산결과와 Meier등[3]의 측정결과를 다양한 방출각도에 따라 비교한 것이다. 한편, 그림 3-2는 최신의 MCNPX ver. 2.4.0 코드를 이용하여 본 연구에서 계산된 중성자 스펙트럼으로 모든 방출각도에서 선행연구자들의 실험 및 계산에 의한 값과 잘 일치한다.

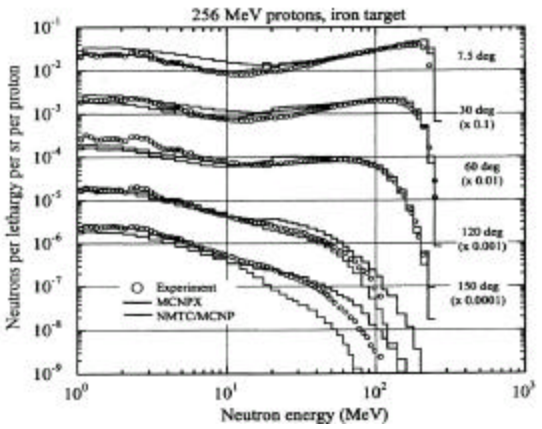

Fig. 3-1. Comparison between measured and calculated neutron leakage spectra from a thick iron target bombarded with 256 MeV protons at various angles in reference.

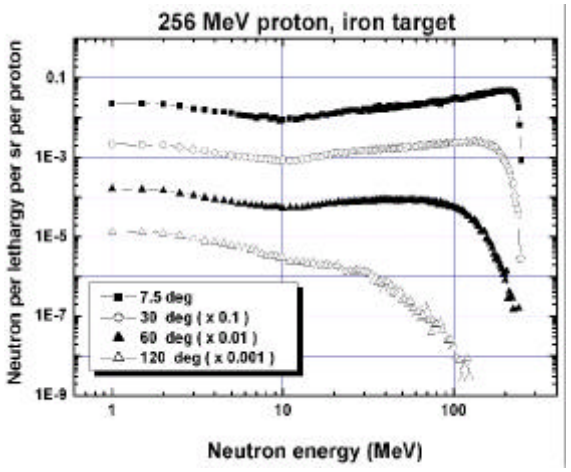

Fig. 3-2. Calculated neutron leakage spectra from a thick iron target bombarded with 256 MeV protons at various angles with MCNPX code in this study.

중성자 선량 분포

그림3-3은 230 Mev 양성자의 철 표적 충돌로 발생되는 중성자에 의한 콘크리트 차폐체 내에서의 선량분포 대한 Ryuichi Tayama등의 MCNPX ver. 2.1.5를 이용한 계산결과와 Sibers등의 측정결과를 다양한 방출각도에 따라 비교한 것이다. 한편, 그림3-4는 본 연구에서 계산된 콘크리트 두께에 따른 선량분포로서 선행연구자의 계산결과와 마찬가지로 모든 중성자 방출각도에서 실험치를 과대평가 하지만 그 차이는 factor 3 안에 든다. 본 연구에서 계산된 선량분포를 아래의 식에 의해 fitting하여 Attenuation parameters H_o 와 λ를 계산하고 이를 표3에 제시하여 선행연구자들의 결과와 비교하였다. 실험치와 본 연구의 계산결과는 최대 50% 오차 범위내에서 일치하였으며 Tayama등의 계산결과와는 모든 중성자 방출각도에서 일치하는 결과를 보였다.

$$H(t) = H_o \exp(-t/\lambda)/r^2$$

여기서, H(t) : Equivalent dose(pSv) at concrete thickness t (g/cm^2)

H_o : source term($pSv\ cm^{-2}$)

λ : attenuation length for equivalent dose through concrete (g/cm^{-2})

r : distance from the source to the calculation points

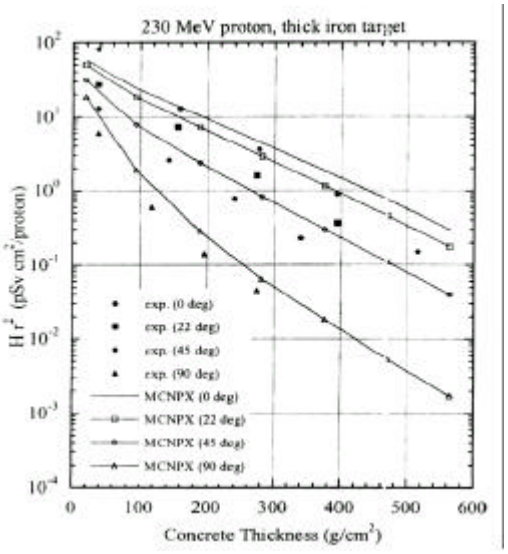

Fig. 3-3. Comparison between measured and calculated dose distribution of concrete from a thick iron target for 230 MeV protons multiplied by the distance from target to calculation point squared in reference.

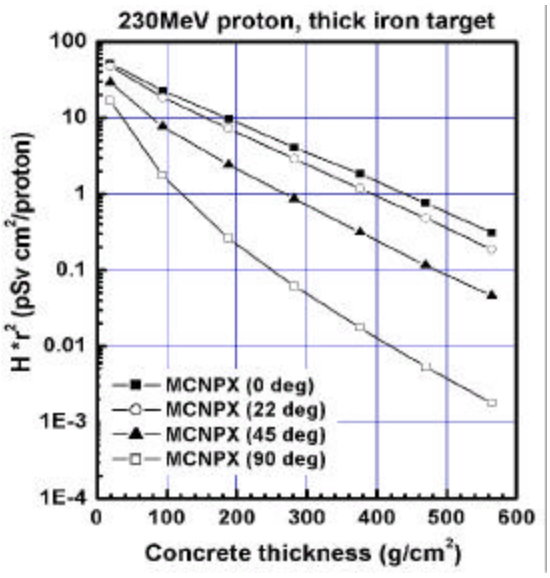

Fig. 3-4. Calculated dose distribution of concrete from a thick iron target for 230 MeV protons multiplied by the distance from target to calculation point squared with MCNPX code in this study.

Table 2. Comparison between calculated and measured attenuation parameters H_o and λ of concrete for 230 MeV protons.

Emission angle (deg)	Experiment - Siebers		Calculation - Tayama		Calculation - this study		Cal. this study / Experiment		Cal. this study / Cal-Tayama	
	Ho[a]	λ[b]	Ho	λ	Ho	λ	Ho	λ	Ho	λ
0	1.06E+02	8.00E+01	5.75E+01	1.07E+02	5.73E+01	1.08E+02	0.54	1.35	1.00	1.01
22	4.94E+01	8.06E+01	4.68E+01	1.01E+02	5.08E+01	1.00E+02	1.03	1.24	1.08	0.99
45	1.48E+01	8.20E+01	2.02E+01	9.00E+01	1.95E+01	9.22E+01	1.32	1.12	0.96	1.02
90	3.94E+00	6.06E+01	5.39E+00	6.84E+01	5.26E+00	6.95E+01	1.33	1.15	0.97	1.02

[a] H_o (pSv cm^2 p^{-1})
[b] λ (g cm^{-2})

4. 결 론

본 연구에서는 최신의 대표적 몬테칼로 코드인 MCNPX ver. 2.4.0**을 이용하여 고에너지 양성자의 표적 철 충돌로 발생되는 중성자 스펙트럼과 콘크리트 두께에 따른 중성자 선량 분포에 대한 벤치마크 계산을 수행하였다. 계산치는 다양한 중성자 방출각도에서 선행연구자들의 실험 및 계산에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 향후 수행될 몬테칼로 코드를 이용한 양성자 가속기 설치 건물내의 차폐해석 및 차폐 계산을 통한 선량평가의 가능성 및 타당성을 제공하였다. 또한 본 연구에서의 몬테칼로 코드를 이용하는 계산기법은 다른 고에너지 입자수송계산 및 선량평가에도 활용될 수 있을 것이다.**

참고문헌

1. J.V. Siebers et al, "Application of Monte Carlo to proton beam radiation theraphy", Medical college of Virginia, Virginia commonwealth University.
2. M.M. Meier et al, "Neutron yields from stopping and near-stopping length target for 256 MeV protons," *Nucl. Sci. Eng*. 104, 339(1990).
3. Ruuich Tamaya et al, "Benchmark calculations of neutron yields and dose equivalent from thick iron target for 52-256 MeV protons", *Nucl. Eng. and design* 213, 119-131(2002).
4. LANL, *MCNPX™ User's manual*, Los Alamos National Laboratory, MCNPX™ 2.4.0, LA-CP-02-408(2002).
5. M.B. Chadwick et al, "Cross-section evaluation to 150 MeV for accelerator driven system and implementation in MCNPX", *Nucl. Sci. Eng*. 131, 293(1999).

6. H.W. Bertni, Phys. Rev. 188, 1711.

7. J.V. Siebers et al„ "Sheilding measurements for 230 MeV protons," *Nucl. Sci. Eng*. 115, 13(1993).

8. ICRP, *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation,* International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 74, Pergamon Press(1996).

9. S. Iwai et al, "Overview of fluence to dose equivalent conversion coefficient for high energy radiations calculation methods and results of effective dose equivalents and effective dose per unit particle fluence", Proceeding of SATIF3(1997).