

2.5 MeV 이하 단색 중성자 표준장에 대한 중성자 실험실내의 산란 중성자 분포 전산모사

박중헌, 김기동

한국지질자원연구원 지질자원분석센터

2011년 2월 18일 접수 / 2011년 6월 17일 1차 수정 / 2011년 6월 24일 2차 수정 / 2011년 6월 27일 채택

가속기 기반 중성자 표준장은 검출기 및 도시미터 교정, 핵자료 생산, 동위원소 생산등 에 필수적으로 필요한 기반 장비이다. 가속기 기반 중성자 표준장 실험실을 설계하는데 있어서 원하는 에너지의 직접적인 중성자 이외에 산란되어서 입사하는 산란 중성자를 줄이는 것은 매우 중요하다. 따라서 그러한 조건을 얻어내기 위하여 다양한 조건을 가정하여 MCNPX 모사계산을 수행하였다. 우선은 기존의 실험실 조건에서 양성자 운동방향인 0도 방향에 있는 중성자 Flux 측정용 공기로 이루어진 가상의 Chamber에 직접 입사하는 중성자 flux와 벽이나 바닥에 충돌을 한 후에 입사하는 간접적인 산란 중성자 flux를 각각 계산하였다. 그 결과 충돌 한 후에 0도 방향의 Chamber에 입사하는 산란 중성자 flux 중에 바닥에 충돌을 한 후 0도 방향의 Chamber로 입사하는 산란 중성자 flux가 가장 많다는 것을 알 수 있었다. 따라서 바닥의 콘크리트만을 없앴을 때와 콘크리트를 제거하고 땅을 1m 정도 파내려갔을 때를 가정하여 재계산을 하였고 그 결과 콘크리트를 없애고 땅을 1m 정도 파면 바닥에 충돌하고 Chamber로 들어오는 산란 중성자 flux가 다른 곳에 충돌하고 들어오는 것보다 낮아지는 정도까지 줄어드는 것을 알 수 있었다.

중심어: 중성자 표준장, 산란 중성자, MCNPX, 가속기

1. 서론

중성자를 얻는 방법은 크게 보면 3가지 정도를 생각해 볼 수 있다. 첫 번째는 원자로에서 핵분열 반응 후 감속체를 통과한 후 나오는 열중성자가 있다. 원자로로부터 얻는 열중성자는 평균 에너지가 수십 meV 정도로 에너지가 매우 낮고 Maxwellian 분포를 가진다. 두 번째는 중성자 선원들을 이용하여 중성자를 얻어낼 수 있다. 원자로에 비해서는 높고 여러 가지 분포를 가지는 에너지의 중성자를 얻을 수 있지만 단일 에너지의 중성자를 얻기 어려운 경우가 많고 높은 중성자 flux를 얻기 어려울 뿐만 아니라 중성자 flux를 조절하는 것도 어렵다. 세 번째는 가속기를 이용하여 이온을 가속시킨 후에 표적에 충돌시켜서 핵반응에 의해서 중성자를 얻을 수 있다. 이 경우에는 중성자 선원을 사용하는 것보다 더 많은 종류의 에너지를 가지는 중성자를 얻을 수가 있고 중성자 flux도 조절이 가능하다. 게다가 준 단일 에너지의 중성자를 얻을 수 있다. 그렇지만 가속기와 같은 거대한 장치가 있어야 한다.

이와 같이 얻어지는 중성자를 이용하여 핵반응 반응단

면적을 측정하거나 혹은 측정 장비를 보정하는 등의 정밀한 실험을 하기 위해서는 실험실내의 중성자의 특성이 잘 파악된 중성자 표준장이 만들어져야 한다[1,2]. 특히 가속기를 이용하여 이온을 표적에 충돌시켜서 중성자를 얻는 중성자 표준 장에서는 표적에서 직접 나오는 중성자와 표적 혹은 실험실 벽이나 바닥에 충돌 후 나오는 산란 배경 중성자의 양을 잘 파악해야 한다. 특히 정밀한 중성자 실험을 하기 위해서는 표적에서 나오는 단일에너지의 직접적인 중성자만이 존재하고 그 외의 다른 산란 중성자는 없는 것이 좋으나 현실적으로는 산란 중성자는 항상 존재하고 단지 그 양을 줄이거나 혹은 그 양을 제대로 파악하는 수밖에 없다.

본 모사계산 연구는 표 1에 나타낸 바와 같이 한국지질자원연구원에 설치된 1.7 MeV Tandem accelerator와 ^3H 및 ^7Li 표적을 이용하여 0.144 MeV, 0.25 MeV, 0.565 MeV, 2.5 MeV 등 단일 에너지 표준 중성자장을 제작하는 것을 목적으로 하여 수행하였다. 실험실내의 중성자의 특성이 잘 정립된 중성자 표준장을 제작하기 위하여 산란 중성자들이 생성되는 궤적과 그 발생량을 MCNPX Code를 이용하여 모사계산을 수행하였다. 또한 본 모사계산의 결과를 활용하여 산란중성자를 효율적으로 감소시킬 수 있도록 중성자 실험실 구조 변경 방법을 제시하였다.

책임저자 : 박중헌, junghun@kigam.re.kr
대전시 유성구 과학로 92 한국지질자원연구원

Table 1. Neutron Energy Used for MCNPX Calculation, Nuclear Reaction for Neutron Production, Used Proton Energy, Target (*T:Ti>1.5)

Nuclear reaction	Neutron energy(MeV)	Proton energy(MeV)	Target	Target thickness (um)	Nuclear cross section (barn)
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	0.144	1.935	Li	2	0.281
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	0.25	2.016	Li	2	0.274
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	0.565	2.293	Li	2	0.525
${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$	2.5	3.281	*Ti(T)	4.2	0.508

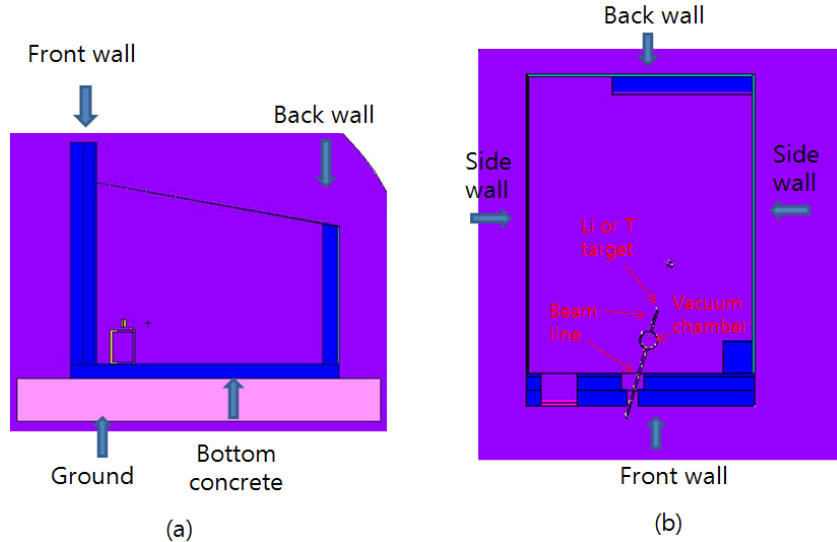


Figure 1. Original neutron laboratory structure. Side (a) and top (b) views of the neutron-reference-field laboratory.

2. 계산 방법

MCNPX 모사계산을 수행할 중성자 실험실의 구조는 위의 그림 1과 같다. 중성자 실험실 구조는 표적에서 1.13 m 아래 콘크리트 바닥(두께, 40 cm)이 있고 옆쪽 벽간의(패널 두께, 5 cm) 간격이 5.0 m이다. 표적에서 뒤쪽 벽이(패널 두께, 5 cm) 5.21 m에 위치하고 있고 뒤쪽 벽의 일부분에 콘크리트구조물이 만들어져있다. 표적에서 천정이(패널 두께, 5 cm) 3.87 m에서부터 경사져서 높아지는 구조로 되어있고 실험실의 콘크리트와 벽돌로 이루어진 앞쪽 벽은(두께, 70 cm) 표적에서 1.41 m 거리에 있다. 가속기에서 생성된 양성자 빔이 실험실의 앞쪽 벽으로부터 입사하고 빔 라인 안쪽을 따라 진공 챔버를 통과한 후, Li 또는 T 표적에 충돌하여 중성자를 발생시킨다. 이와 같이 핵반응에 의해 생성된 중성자는 각분포를 갖는 중성자 빔을 형성한다. 본 연구에서는 이와 같이 양성자 빔을 이용하여 중성자 빔을 제작하는 과정을 MCNPX 모사계산을 통하여 구현하였고 그 계산과정은 아래와 같이 두 단계로 이루어져 있다.

1. 계산 시간을 단축시키기 위해서 그림 1과 같은 구조를 생략하고 양성자가 Li혹은 T과 충돌하여 중성자 생성되는 것만을 가정하여 중성자의 각분포를 표 1의 네 가지 에너지에 대하여 MCNPX code를 사용하여 계산하였다. 중성자 각분포를 구하기 위하여

Tally에 사용된 가상의 Cell들은 Li이나 T 표적(지름 0.01 mm, 두께: 표1과같이) 주위에 반지름 0.03 mm 두께 0.01 mm의 구 모양의 shell을 가정하고 양성자 빔의 진행방향을 0도로 하여 10도 간격으로 원추를 만들어 구를 10도 간격으로 잘라서 180도인 양성자 진행방향의 반대 방향까지 18개로 잘라내어 만들었다. 18개로 잘라진 두께 0.01 mm의 구의 부분에 들어오는 중성자의 개수를 저장하여 4개의 중성자 에너지에 대하여 각분포를 구하였다. 중성자 에너지의 각분포의 통계오차를 줄이기 위하여 23개의 MCNPX input file에 각각 21억 개의 양성자를 다른 Random seed number를 사용하여 발생시켜서 계산에 사용된 양성자 개수는 483억 개가 되도록 하였다.

2. 다음으로는 이와 같이 구해진 각분포를 가지는 중성자가 Li이나 T 표적 중심에서 발생하는 것으로 하고 그림 1의 구조도를 이용해서 MCNPX 입력 파일을 작성하였다. 따라서 그림 1의 바닥만을 바꾸면서 MCNPX 계산을 할 때 중성자의 분포를 다시 계산하지 않으므로 해서 계산시간을 많이 단축시킬 수가 있었다. 계산은 3가지 경우에 대하여 하였는데 우선은 콘크리트 바닥이 있는 경우, 두 번째는 콘크리트 바닥을 없애고 땅이 있는 경우, 세 번째는 콘크리트 바닥을 없애고 땅을 1 m 정도 파내려가는 경우를 가정하여 MCNPX 모사계산을 수행하였다.

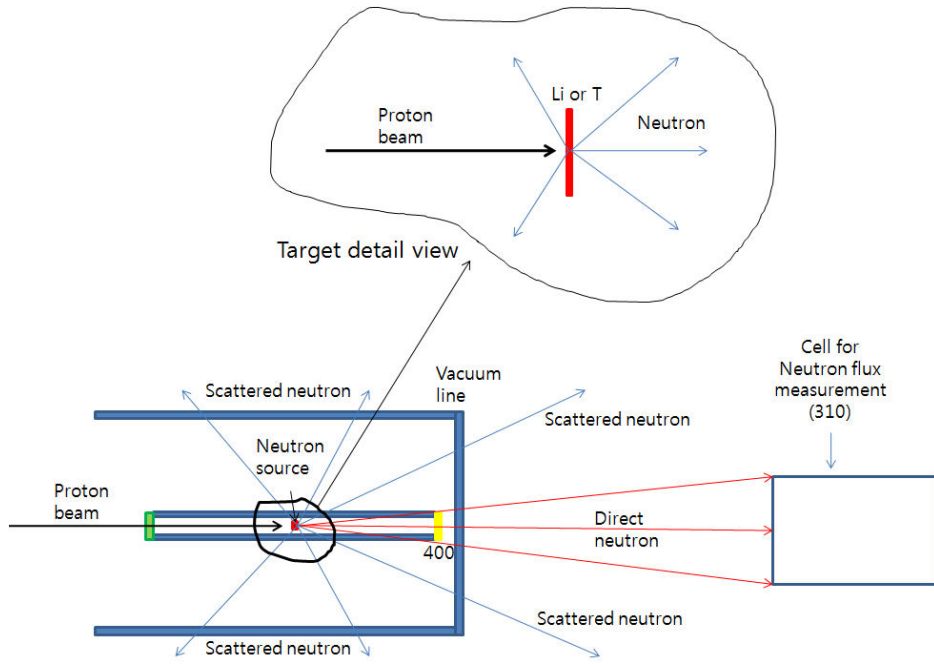


Figure 2. Schematic diagram of the neutron-beam line assumed in the current MCNPX simulation. (Target detail view shows the target structure used in first stage).

Table 2. Simulation Result by MCNPX Code for the Structure of Fig. 1.

Maximum neutron energy (MeV)	Ratio of direct neutron flux (%)	㉑ Ratio of scattered neutron flux (%)	㉒ Ratio of neutron flux after scattering bottom (%)	㉓/㉑ (%)
0.144	98.36±0.19	1.64±0.02	1.02±0.02	62
0.25	97.71±0.30	2.29±0.05	1.47±0.04	64
0.565	96.98±0.34	3.02±0.06	1.87±0.05	62
2.5	97.24±0.33	2.76±0.05	1.44±0.04	52

위와 같이 두 단계로 나누어서 MCNPX 모사계산을 한 것은 첫 번째 단계의 중성자 분포를 구하는 과정은 한 번 구하면 변화의 여지가 없고 계산 시간이 전체 계산 시간에 비추어 볼 때 90% 이상이기 때문이다. 즉 에너지 별로 4개의 중성자 각분포를 구한 후에는 중성자 실험실의 구조를 바꾸어 다시 계산할 때 중성자 각분포를 다시 구할 필요 없이 이전에 구한 각분포를 사용하여 계산 시간을 10배 이상 단축시킬 수 있었다.

중성자의 flux는 표적에서 1 m 지점에 가상의 공기रो 이루어진 중성자 측정용 검출기를 설치한다고 가정하여 계산하였다. 그림 2는 MCNPX 모사계산 프로그램에 입력된 진공 양성자 빔 라인 내에 설치된 표적과 표적에서 생성되어 검출기에 직접 입사하는 중성자의 범위를 나타낸 그림이다. 본 모사계산에서는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 표적과 검출기를 연결하여 형성한 원추 면 밖의 공간을 지나 산란되어 검출기로 입사하는 중성자는 산란중성자로 정의하고, 직접 입사하는 중성자와 구분하였다. 뿐만 아니라 중성자 Source에서 나온 중성자가 그림 1의 (a)에 표시된 바닥에 산란되어 중성자 검출기에 입사한 중성자를 또한 별도로 정의하였다. 이때 사용한 Tally는

f4이며, Cell-flagging card를 사용하여 다른 Cell을 통과한 후에 고려하는 Cell에 들어오는 중성자 flux를 계산할 수 있도록 하였다.

3. 결과

그림 3은 MCNPX 모사계산의 첫 번째 단계에서 최대 에너지가 144 keV인 중성자가 나오는 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 반응을 모사계산하여 얻어진 중성자 각 분포이다. 전방 각으로 갈수록 중성자 발생 확률이 증가하고 후방 각으로 가면 발생 확률이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 중성자 에너지의 분포를 보면 전방 각일 때는 발생하는 최대 중성자 에너지가 크고 좁은 에너지 영역을 가지고 후방 각일 때는 최대 중성자 에너지가 감소하면서 넓게 퍼지는 경향이 있다. 다른 세 개의 중성자 에너지에 대하여도 MCNPX 모사계산을 수행한 결과, 최대 에너지가 144 keV인 중성자의 각분포 경향인 그림 3의 결과와 유사한 결과를 도출하였다.

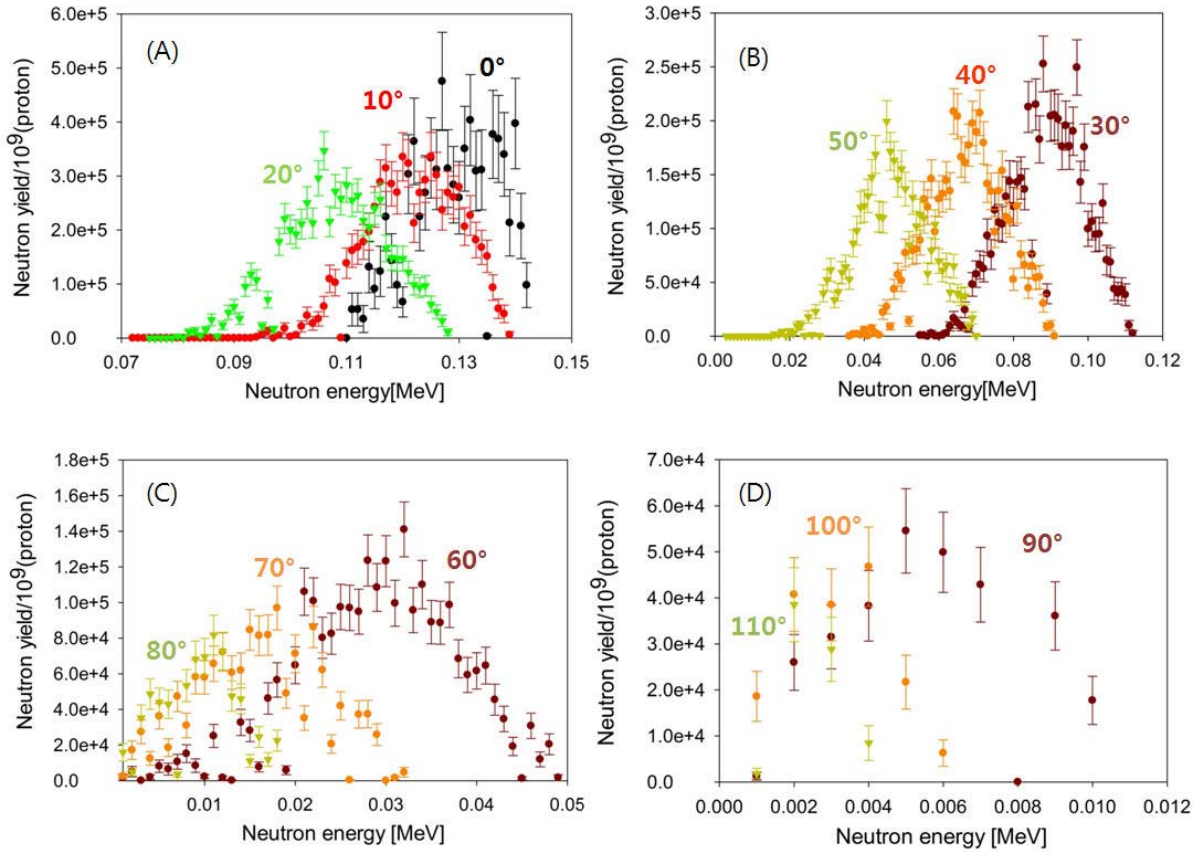


Figure 3. After first stage of MCNPX simulation, the obtained angular and energy distributions of the neutrons emitted by the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ reaction in the current MCNPX simulation. The energy distributions emitted at various polar angles are shown in (A) (0o, 10o, and 20o), in (B) (30o, 40o, and 50o), in (C) (60o, 70o, and 80o), and (D) (90o, 100o, and 110o).

Table 3. The Calculated Result Using the Structure which Concrete Bottom is removed in the Structure of Figure 1.

Maximum neutron energy (MeV)	Ratio of direct neutron flux (%)	㉔ Ratio of scattered neutron flux (%)	㉕ Ratio of neutron flux after scattering bottom (%)	㉖/㉔ (%)
0.144	98.76±0.18	1.24±0.02	0.62±0.01	50
0.25	98.26±0.30	1.74±0.04	0.94±0.03	54
0.565	97.66±0.34	2.34±0.05	1.2±0.04	51
2.5	97.74±0.33	2.26±0.05	0.95±0.03	42

표 2는 그림 1에 나타난 중성자 실험실을 가정하였을 때 도출한 결과를 요약한 표이다. 표 2에 나타난 바와 같이 전체 산란 중성자의 flux의 비율은 1.6 ~ 3% 정도이다. 바닥의 콘크리트와 충돌 후 측정되는 산란 중성자 flux의 비율은 1 ~ 1.9% 정도이므로 산란 중성자의 약 60% 정도가 바닥의 콘크리트와 충돌 후 측정되는 중성자임을 알 수 있다. 따라서 바닥을 구성하는 콘크리트와 콘크리트 밑에 있는 땅이 산란 중성자를 낮추는데 있어서 가장 중요한 구조물임을 알 수 있었다. 따라서 콘크리트 구조물을 제거한 상태에서 동일한 모사계산을 하였으며 그 결과를 표 3에 요약하였다. 표 3에 나타난 결과로부터 전체 산란 중성자 flux의 비율이 1.2 ~ 2.3% 정도로 감소하였고 바닥의 땅과 충돌 후 측정되는 중성자의 flux의 비율도 0.6 ~ 1.2% 정도로 감소한 것을 알 수 있다. 산란

중성자 중에 바닥의 땅과 충돌 후 측정되는 중성자의 비율이 약 50% 정도로 감소하였으며, 전체 산란 중성자의 비율에도 그 감소량만큼 기여한 것을 알 수 있다.

바닥의 땅과 충돌 후 측정되는 중성자의 비율을 보다 더 낮추기 위해 바닥을 1 m 정도 낮춘 조사실 구조를 가정하여 동일한 계산을 하였으며, 그 결과는 표 4에 요약하였다. 표 4에 나타난 바와 같이 바닥의 땅과 충돌 후 측정되는 산란 중성자의 flux의 비율이 0.4 ~ 0.7% 정도로 감소한 것을 알 수 있다. 즉 산란 중성자 flux 중에 바닥의 땅과 충돌 후 측정되는 중성자의 비율이 약 30% 이하로 줄어들었다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 전체 산란 중성자의 비율은 1.5 ~ 2.6%로 오히려 약간 증가하고 있다. 이것은 그림 1에 표시된 뒤쪽의 콘크리트 벽으로 인한 것이다. 바닥이 깊어지면서 뒤쪽의 콘크리트 벽도 바

Table 4. Simulation Result by MCNPX Code for the Corrected Structure, where Concrete Bottom is removed and Ground is moved under 1m in the Structure of Figure 1.

Maximum neutron energy (MeV)	Ratio of direct neutron flux (%)	㉔ Ratio of scattered neutron flux (%)	㉕Ratio of neutron flux after scattering bottom (%)	㉕/㉔ (%)
0.144	98.51±0.37	1.49±0.04	0.37±0.02	25
0.25	98.04±0.43	1.96±0.06	0.53±0.03	27
0.565	97.43±0.49	2.57±0.08	0.72±0.04	28
2.5	97.59±0.44	2.41±0.07	0.53±0.03	22

닥 쪽으로 길어지는데 중성자의 각분포는 전방 각에 대해 flux가 증가함에 기인한다. 즉, 뒤쪽의 콘크리트와 충돌 후 측정되는 중성자 flux 또한 증가하는 결과를 가져왔다.

5. 결론

본 중성자 실험실은 그 구조상 중성자가 바닥의 콘크리트와 충돌 후 측정되는 산란 중성자의 flux가 전체 산란 중성자의 60% 이상을 차지하고 전체 산란 중성자의 비율이 1.6 ~ 3% 정도이었다. 그러나 바닥의 콘크리트를 제거한 후에 계산된 결과를 살펴보면, 바닥의 땅과 충돌 후 측정되는 산란 중성자의 flux가 전체 산란 중성자의 50% 로 줄고 바닥의 땅을 1 m 정도 낮출 경우 30% 이하로 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만 바닥을 1 m 정도 낮추면 뒤쪽의 콘크리트와 충돌 후 측정되는 중성자 flux가 증가하여 전체 산란 중성자의 flux가 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 중성자 실험실 구조에서 대해서는 바닥의 콘크리트만 제거하는 것이 전체 산란 중성자의 flux를 낮추는 가장 좋은 방법이라는 결론을 내릴 수 있다.

중성자 표준장 실험실을 설계하는데 있어서 간접적인 산란 중성자를 줄이고 직접적인 중성자의 비율을 증가시키는 것은 정밀한 중성자 표준을 마련하는데 가장 중요한 요소이다. 본 MCNPX 모사계산 연구를 수행함으로써 산란 중성자장 효과를 정밀하게 산출하였으며 가장 효율적인 실험실 구조를 설계하는 필수적인 조건을 제시하였다.

참고문헌

- Nolte R, Allie MS, Bottger R, Brooks FD, Buffer A, Dangendorf V, Friedrich H, Guldbakke S, Klein H, Meulders JP, et al.. Quasi-monoenergetic neutron reference fields in the energy range from thermal to 200 MeV. Radiation Protection Dosimetry 2004; 110:97-102.
- Schuhmacher H, Brede HJ, Dangendorf V, Kuhfuss M, Meulders JP, Newhauser WD, Nolte R. Quasi-monoenergetic neutron beams with energies from 25 to 70 MeV. Nucl. Instrum. Meth. A, 1999; 421(1-2):284-295.

MCNPX Simulation of Scattered Neutron Distribution in Experimental Room for the Neutron Reference Field of Monoenergetic Neutron below 2.5 MeV

Jung-Hun Park and Gi-Dong Kim
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract - It is important to reduce indirect scattered neutron beside direct neutron of chosen energy for designing a neutron-reference-field laboratory with neutron produced from a nuclear reaction by a accelerator. Therefore MCNPX simulation was performed with various conditions for obtaining such condition. At first in the original laboratory condition we calculated the direct neutron flux which was inserted in chamber (virtual chamber composed of air) of 0 degree (proton moving direction) for neutron flux measurement and the scattered neutron flux which is inserted in the chamber after scattering wall or bottom. In the result, the scattered neutron which was inserted after scattering bottom is more than that which was inserted after scattering the others. Therefore MCNPX simulation was again performed with removing the concrete bottom and with removing the concrete bottom and digging 1 m in the ground. In the result of removing concrete bottom and digging 1 m in the ground, scattered neutron which was inserted after scattering bottom became less than that which was inserted after scattering the others.

Keywords : Neutron reference field, Scattered neutron, MCNPX, Accelerator