

대용량 양성자 가속기 설계를 위한 이차 중성자 차폐계산 모델 개발 Development of a Secondary Neutron Shielding Calculated Model for High Power Proton Accelerator

박병일, 김명현
경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천1리

요 약

국내에서는 1997년부터 KAERI를 중심으로 20mA의 대용량 양성자 가속기인 KOMAC (Korea Multipurpose Accelerator Complex) 개발이 진행되고 있다. 대용량 양성자 가속기를 대상한 고에너지 양성자에 대한 차폐 연구는 국내 양성자 가속기 개발이 진행됨에 따라 부대 건설비용 및 가속기 운영에 직접적으로 영향을 미치는 기반 기술로서 연구가 이루어져야 한다. 본 논문에서는 차폐 설계 기술 측면에서 핵심이 되는 차폐체 내에서 양성자, 중성자, 감마의 거동을 해석할 수 있는 MCNP-X/DORT 전산체계를 개발하고 검증하였다. 그 결과 MCNP-X와 MCNP-X/DORT 전산체계 모두 보수적인 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 수 GeV이상의 고에너지 영역의 양성자 및 중성자의 핵반응 단면적 자료가 보완되어야 함을 확인하였다. 그리고 MCNP-X/DORT 전산체계를 이용하여 가상의 가속장치에 대하여 차폐 계산 시 DORT 라이브러리인 BUGLE96이 100MeV까지의 가속기 시설에 대한 차폐 설계에 대한 라이브러리로 활용 가능성을 보여주었다.

Abstract

Until 1997, KOMAC (Korea Multi-purpose Accelerator Complex) has developed by KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute). KOMAC has a high current proton/H⁺ linear accelerator capable of delivering a 1GeV proton beam with an intensity of 20mA in the final stage. Accelerator shielding study should be performed as a basic technology because shielding design effects directly to the cost of construction and operation. In this study, the code system of MCNPX/DORT was evaluated. The behaviors of proton, neutron and photon in the shield could be analyzed by this code system. Calculation results from MCNP-X/DORT and MCNP-X were compared with reference data which were calculated for arcs tunnel shield in Fermi lab's Proton Driver with MARS14 code. These results had good agreement with the reference data, and BUGLE96 library used in MCNPX/DORT code system was available to perform shielding calculation until 100MeV proton energy. However proton and neutron cross section data would be modified in higher energy range than ~GeV energy.

1. 서론

대용량 양성자 가속기는 수 TeV 이상의 고에너지의 양성자를 이용하여 입자 물리학뿐만 아니라 다양한 산업 분야에서 반도체 박막 기술 개발, 다기능 신소재 개발, 극소 기술개발, 방사성 동위원소 개발 및 의료용 암 진단장치 개발 등에 이용되고 있다. 특히 최근 주목 받는 핵변환 기술개발 및 의료용 암치료 장치 개발에 이용되기 위해서는 높은 에너지와 많은 양의 중성자 선원 및 양성자 선원이 필요하다. 이를 위해서는 800MeV이상의 고에너지와 1mA 이상의 양성자빔을 생산하는 대용량 양성자 가속기의 개발이 필요하다.

현재 국내에서는 1997년부터 KAERI를 중심으로 20mA의 대용량 양성자 가속기인 KOMAC 개발이 진행되고 있다. 현재 가속기 전단부(Front-End)인 이온발생장치와 3MeV RFQ(Radio Frequency Quadrupole) 가속장치의 개발이 완료되었으며, 앞으로 2012년까지의 목표로 20MeV와 100MeV 가속장치인 DTL-1(Drift Tube Linear accelerator-1)과 DTL-2(Drift Tube Linear accelerator-2) 및 여러 부대시설에 대한 개발을 진행하고 있다.

KOMAC의 경우 가장 큰 특징으로 다른 국외 대용량 양성자 가속기에 비하여 매우 높은 빔전류를 갖는다.(표 1.) 현재 국내 양성자 가속기는 대부분 50MeV 이하의 낮은 에너지와 1 μ A 이하의 낮은 빔전류를 갖고 있고, 2GeV의 전자를 가속시키는 포항방사광 가속기의 경우 가속 입자의 종류와 가속방식이 다르기 때문에 선형 양성자 가속기인 KOMAC과 같은 대용량 양성자 가속기에 적용하기 어렵다. 그래서 현재 국내 고에너지 양성자 차폐 기술은 매우 미흡한 상황이다. 현재까지 고에너지 양성자에 대한 차폐 연구는 경희대학교에서 우주 환경에서의 인공위성 내부에 대한 방사선 차폐 연구를 한 것이 유일하다. 하지만 인공위성의 차폐 연구의 경우 차폐 대상입자는 고에너지의 양성자이고, 양성자 가속기의 경우에는 고에너지 양성자와 반응하여 발생한 중성자 및 감마와 같은 2차방사선이기 때문에 대용량 양성자 가속기를 대상으로 고에너지 양성자에 대한 차폐 연구가 이루어져야 한다. 기술적으로는 수 MeV 이상으로 가속된 전자 또는 하전입자가 구조물과 반응하여 이차적으로 발생하는 2차 방사선을 모두 고려해야 한다는 점에서 20MeV 이하의 중성자와 감마선을 고려하는 원자로와 융합로 등의 차폐와 구별되며, 가속기 건설 후 차폐체의 재설치로 인한 예산 증가 문제 및 고방사선구역에 설치된 부품의 유지보수문제 그리고 덕트 스트리밍 문제 등을 해석하기 위해서 정밀한 차폐 해석이 필요하다.

본 연구에서는 차폐 설계 기술 측면에서 핵심이 되는 차폐체 내에서 양성자, 중성자, 감마의 거동을 해석할 수 있는 MCNP-X/DORT 전산체계를 개발하고 검증하였다. 그리고 MCNP-X/DORT 전산체계를 이용하여 가상의 가속장치에 대하여 차폐 계산을 수행하였다.

2. 차폐 해석 전산체계 개발

일반적으로 차폐 해석 계산을 위하여 몬테카를로 코드와 Deterministic 코드를 주로 사용하고 있으며, 전 세계적인 차폐 해석 추세를 보면 정밀한 핵반응 단면적 자료를 바탕으로 한 3차원 몬테카를로 수송 모사계산의 비중이 증가하고 있다. 몬테카를로 코드는 3차원 계산이 가능하며, 매우 신뢰도 있는 결과를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있지만, 계산시간이 길고, Bulk Shielding 계산 시에 통계적 한계를 갖게 된다. 그리고 Deterministic 코드는 3차원 해석에 문

제점을 갖지만, 계산시간이 짧다는 장점을 갖는다. 따라서 차폐 해석 모사 계산 시 기존의 방법론보다 정밀하고 계산시간을 줄일 수 있는 전산체계 및 근사 모델 방법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 차폐체 내의 중성자와 감마의 거동을 해석하기 위한 전산체계로서 MCNP-X와 DORT code를 사용하였다.

MCNP-X/DORT 전산체계는 2차 방사선 선원항을 계산하는 MCNP-X부분과 계산된 선원항을 이용하여 중성자 및 광자의 Flux 감쇄곡선을 계산하는 DORT부분으로 나눈다. DORT 코드는 중성자 및 감마 이외의 하전입자에 대한 핵자료 및 볼츠만 수송방정식을 해석할 수 없기 때문에 양성자 가속기의 경우 손실되는 양성자에 의해 발생하는 메카니즘을 해석할 수 없다. 그러므로 MCNP-X 코드를 통하여 입사 양성자와 전자석 및 collimator와 같은 가속기 장치 및 핵과쇄용 표적과 반응하여 발생한 2차 방사선원을 계산하고, 이를 통하여 계산된 중성자 선원항을 이용하여 DORT 코드로서 차폐 계산을 수행하였다. 이러한 MCNP-X/DORT 전산체계는 MCNP-X용 고에너지 핵반응 단면적 자료인 LA150 라이브러리와 DORT용 100MeV까지의 중성자와 광자에 대한 핵반응 단면적 자료인 BUGLE96 라이브러리를 이용하였다. 가속기 내에서 발생하는 2차 입자의 방사선량 계산의 정확성과 차폐 계산의 시간적 효율을 높이는 효과를 기대할 수 있다.

3. 차폐 해석 전산체계 검증 계산

검증 모델로서 페르미 가속기 연구소의 Proton Driver(synchrotron)의 Arcs (P20) tunnel shielding에 대하여 차폐 계산 모델과 결과를 인용하여 검증 계산을 수행하였다.^[5] 차폐 계산은 16GeV의 입사 양성자가 입사 할 때, 주요 가속기 구성 장치인 전자석과 collimator에서 빔 손실 사고가 발생한다고 예상하고 이를 MARS 14 코드를 이용하여 계산하였다. 실제 Proton Driver 터널은 폭은 3.5m이고, 높이는 2.6m 로서 1 feet의 콘크리트로 이루어져 있으며 지하 2층의 구조로 건설되어 콘크리트 벽 외각은 모두 토양으로 둘러싸여 있다. 이 터널 내부에서 가속장치들의 위치는 작업공간을 위하여 가속기 터널의 바깥쪽 방향으로 치우쳐 있다. 이 차폐 계산 모델에서는 보수적인 계산을 위하여 실제 가속기 장치들의 위치에서 가까운 차폐벽을 기준으로 계산하였다. 페르미 연구소의 MARS 코드 차폐 계산은 16GeV의 양성자빔이 입사할 때 손실되는 빔전류는 빔 손실 사고의 경우에 따라 각각 Full beam loss accident와 DOE에서 제안된 Credible accident에 대하여 3.0×10^{13} proton/sec과 Full beam loss accident의 빔 세기의 0.1%인 3.0×10^{10} proton/sec로 하여 각각 사고 발생시 설계 제한치인 5mrem/hr를 만족하는 토양의 두께를 계산하였다. 그 결과 Full beam accident시 26feet, Credible accident시 16feet 두께의 토양이 필요하다고 계산되었다.

그림 1과 같이 2극 자석을 중심으로 반경 2m의 콘크리트 터널이 있으며 콘크리트 벽의 두께는 1feet로 구성되어 있으며, MCNP-X 모델링을 통하여 모든 빔 손실이 전자석 내부에서 한점에서 발생된다는 가정 하에 계산을 MCNP-X, MCNP-X/DORT 코드를 통하여 수행하였다.

그 결과 표 2에서 보는 바와 같이 차폐해석 조건에 따라 정상 운전 조건에 따른 손실 빔전류 1.3×10^8 proton/sec와 사고 발생 시 조건 3.0×10^{13} proton/sec와 3.0×10^{10} proton/sec를 각각 적용시켰을 때, MCNP-X 계산결과 정상운전 시 설계제한치인 0.1mrem/hr를 만족하는 콘크

리트 벽을 포함한 토양의 두께는 약 13 feet, Full beam loss accident의 경우는 약 26 feet, Incredible accident의 경우는 약 17 feet가 필요한 것으로 나타났다. 이는 참고자료인 MARS 14의 계산 결과에 비하여 보다 보수적인 결과를 나타냈고, 이를 통하여 MCNP-X의 가속기 곡선부의 터널에 대한 근사 모델 계산 결과는 인용 가능한 것으로 나타났다.

그림 2는 MCNP-X와 MCNP-X/DORT의 입사 양성자당 등가선량의 감쇄 곡선의 계산 결과이다.^[2] MCNP-X와 비교해 보았을 때, MCNP-X/DORT 전산체계를 적용한 계산 결과가 약 13%의 상대오차를 나타내고 있으며 이는 표 2의 결과값을 보았을 때, 참고자료인 MARS 14의 계산결과에 비하여 20%이상의 상대오차를 갖는다. 이는 그림 3에서 보는 바와 같이 16GeV의 입사양성자에 의해 발생하는 2차 중성자의 스펙트럼 중 100MeV 이상의 비율이 비교적 높기 때문이다. MCNP-X/DORT 전산체계에서 DORT의 핵반응 단면적 자료로서 사용하고 있는 BUGLE96 라이브러리는 100MeV까지의 중성자와 광자 핵반응 단면적 자료이기 때문에 그 이상의 에너지를 갖는 중성자에 대하여 외삽법을 사용하여 얻은 자료는 수 GeV의 고에너지 차폐 계산에는 적합하지 않다. 그러므로 MCNP-X/DORT 계산 결과는 MCNP-X에 비하여 과대평가함을 알 수 있었다. 이를 통하여 BUGLE96 라이브러리는 발생한 2차 방사선의 스펙트럼이 100MeV 이상의 에너지 영역이 높은 비율을 차지할 경우 적용 시 문제점을 갖는다는 것을 알 수 있었으며, 이를 해결하기 위해서는 수 GeV이상의 고에너지 영역의 중성자 핵반응 단면적 자료의 보완이 필요하다.

4. 가상 가속장치 차폐 계산

MCNP-X/DORT 전산체계를 이용하여 가상의 가속장치에 대한 차폐 계산을 수행하였다. 그림 4의 가속장치 차폐 계산 모델은 가속기 내 어느 한 점에서 모든 빔 손실이 일어난다는 가정 하에서 빔 손실이 발생할 것으로 예상하는 지점의 빔 터널 내에서 가속장치의 기하학적 구조 특성을 반영하기 위하여 2차원적인 XY 평면 구조를 갖도록 모델링 하였다. 이 계산 모델에서 손실되는 양성자와 반응 하는 가속장치인 2극 자석의 위치는 빔 터널 내부에서 가로 150cm, 바닥으로부터 80cm에 위치하여 한 쪽으로 치우치도록 하였다. 2극 자석의 주요 구성 물질은 전체 전자석을 이루고 있는 철 합금과 전극을 이루고 있는 코어(Core) 물질인 무산소동, 그리고 코어의 표면의 박막 물질인 실리콘으로 이루어졌다. 빔 터널 내부 공간의 크기는 가로 350cm, 세로 260cm 이고, 빔 터널은 30cm의 콘크리트 벽으로 둘러싸여 있다. 그리고 콘크리트 외부는 토양으로 둘러싸여 있다고 가정하였다. 이는 페르미 가속기 연구소의 자료를 바탕으로 고안하였다.^{[1],[4],[5]}

여기서 각각 20MeV, 100MeV, 1GeV의 양성자빔이 입사하는 정상 운전 시 평균 빔손실율과 임의의 한 점에서 입사 양성자빔이 한꺼번에 누설되는 사고와 같은 빔 손실 사고를 가정하였으며, 양성자 빔전류는 20mA로 가정하였다.

5. 가상 가속장치 차폐 계산 결과

20MeV 양성자빔이 2극 자석 내부의 임의의 한 점에서 모든 빔 손실이 일어나는 가정 하에 중성자 선원항을 계산한 결과 그림 5에서 보는 것과 같이 대부분 1MeV 이하의 중성자 분포

를 갖는 것으로 나타났으며, 차폐 계산 결과 그림 6과같이 빔 손실이 발생하는 가속기 계통과 가까운 벽에서의 등가선량이 높은 것으로 나타났으며, MCNP-X와 MCNP-X/DORT 전산체계의 등가선량을 비교하였을 때 10%의 상대오차를 갖는 보수적인 결과를 얻을 수 있었다. 계산 수행 시간을 비교해 보았을 때, MCNP-X의 계산 수행 시간은 약 150분이 소요되고, MCNP-X/DORT 전산체계는 MCNP-X를 통하여 2차 방사선 선원항 계산에 소요되는 시간 30분과 DORT 차폐 계산에 소요되는 시간 10분으로 3배의 계산 시간 이득을 얻을 수 있었다.

입사 양성자빔의 에너지가 100MeV인 경우 그림 7에서 보는 바와 같이 MCNP-X와 MCNP-X/DORT 전산체계 간의 등가선량 감쇄 곡선은 유사한 경향을 갖았다. 100MeV 양성자와 반응하여 차폐체에 입사하는 2차 중성자의 스펙트럼이 그림 8에서 보는 바와 같이 콘크리트에 입사할 때의 대부분 20MeV 이하의 영역을 차지하고, 차폐체의 두께가 두꺼워질수록 중성자 스펙트럼의 에너지 영역이 낮아지기 때문에 초기의 등가선량에 비하여 최종적으로는 10%정도의 상대오차를 갖는 만족할 수 있는 보수적 결과를 얻을 수 있었다. 계산 수행 시간을 비교해 보았을 때, MCNP-X의 계산 수행 시간은 약 150분이 소요되었고, MCNP-X/DORT 전산체계는 MCNP-X를 통하여 2차 방사선 선원항 계산에 소요되는 시간 30분과 DORT 차폐 계산에 소요되는 시간 10분으로 3배의 계산 시간 이득을 얻을 수 있었다.

입사 양성자빔의 에너지가 1GeV인 경우 중성자 선원은 그림 9에서 보는 바와 같이 100MeV 이상의 중성자 스펙트럼이 상당 부분을 차지하고 있으며, 이는 MCNP-X와 MCNP-X/DORT 차폐 계산 결과의 오차에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상하였다. 특히 콘크리트는 차폐 특성상 100MeV 이상의 고에너지 영역의 중성자 스펙트럼을 감쇠시키지는 능력이 약하기 때문에 두 전산체계 상의 결과값의 오차가 커질 것으로 예상하였다. 그 결과 그림 10, 11, 12, 13에서 보는 바와 같이 등가선량의 감쇄경향은 서로 비슷하였지만, 약 15%의 상대오차를 갖는 것을 확인하였다. 사전 예상과는 다르게 비교적 상대오차가 작은 것은 중성자의 반응이 대부분 100MeV 이하의 저에너지 영역에서 이루어지기 때문에 현재 사용하고 있는 BUGLE96 핵 반응 단면적 자료로도 100MeV 이상 1GeV 이하의 고에너지 영역에 대하여 비교적 보수적인 결과를 얻을 수 있다는 결과를 얻었다. MCNP-X/DORT 전산체계의 계산 수행 시간은 앞서의 계산 결과와 마찬가지로 약 40분이 소요되었으며, 약 150분이 소요된 MCNP-X에 비하여 약 3배 이상의 계산효율을 얻었다.

6. 결론

본 연구에서 수립한 고에너지 양성자 차폐 해석 전산체계인 MCNP-X와 MCNP-X/DORT를 검증 자료인 MARS 14 계산 결과와 비교하여 검증한 결과와 가상의 가속장치에 대하여 각각 20MeV, 100MeV, 1GeV 양성자의 차폐 계산결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수 GeV의 고에너지 양성자에 대하여 MCNP-X 계산결과는 검증자료인 MARS 14의 계산 결과에 비교하여 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 향후 연구에서 MCNP-X 계산결과를 기준 자료로서 활용할 수 있다.

- (2) 1GeV 이상의 고에너지 양성자에 대해서는 MCNP-X/DORT 전산체계에서 사용하는 BUGLE96 라이브러리에 의한 차폐 계산은 정확하지 못하다.
- (3) 1GeV 이상의 고에너지 중성자, 광자에 대한 보다 정밀한 핵자료가 보완되어야 한다.
- (4) 100MeV 이하의 가속기 시설에 대한 차폐 계산은 BUGLE96 라이브러리를 이용한 MCNP-X/DORT 전산체계를 통하여 보수적인 결과를 얻을 수 있다.
- (5) MCNP-X/DORT 전산체계를 이용하여 계산시간의 효율을 얻을 수 있다.
- (6) 고에너지 영역의 정밀한 핵자료의 보완하면 MCNP-X/DORT 전산체계를 이용한 고에너지 양성자 가속기 차폐 계산이 가능하다.

특히 KOMAC의 경우 양성자빔 Intensity가 높기 때문에 0.01%의 빔손실율을 갖는 20mA의 양성자 가속기의 경우 누설되는 양성자의 빔 세기는 약 1.28×10^{12} proton/sec로 심각한 방사선 누출을 초래할 수 있다. 그러므로 향후 대용량 양성자 가속기 차폐 연구를 위한 문제점으로는 다음과 같은 모델 개발 및 보완점들이 있다.

- (1) 보다 계산 시간을 줄일 수 있는 몬테카를로 코드의 근사모델링 방법론 개발과 정밀한 핵반응 단면적 자료의 구축.
- (2) 대용량 양성자 가속기 내의 덕트 스트리밍 및 작업공간의 미로 구조를 해석할 수 있는 계산 모델 개발.
- (3) 환경 평가를 위해 고에너지 2차 중성자에 의한 스카이스인 평가 방법론 및 모델 개발.
- (4) 장시간 양성자 빔 조사에 의해 발생할 수 있는 방사성핵종의 생성량을 평가할 수 있는 전산체계 구축.
- (5) 입사 양성자의 에너지 증가에 따라 발생할 수 있는 뮌온과 같은 차폐가 어려운 2차방사선의 차폐 문제 고려.

참고문헌

- [1] H. Hirayama et al, "Intercomparison of medium energy neutron attenuation in Iron and Concrete(3)," Proceeding of the 5th Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities Conference, Paris, France, pp. 189-201, July (2001).
- [2] Michele R. Sutton et al, "Fluence-To-Effective Conversion Coefficients for high-energy Radiations calculated with MCNPX," Proceeding of the 5th Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities Conference, Paris, France, pp. 297-311, July (2001).
- [3] Laurie S. Waters, "MCNP-X User's manual," Los Alamos National Laboratory, USA, LA-UR-02-2607, April, (2002).
- [4] S. Rokni, C. Liu, S. Roesler , "Initial Estimates of the Activation Concentration of the Soil and Groundwater around the NLC Beam Delivery System Tunnel," SLAC Radiation Physics Note, RP-00-04, May 11 (2000).
- [5] A. I. Drozhdin, O. E. Krivosheev and N. V. Mokhov, "Beam Loss, Collimation and Shielding at the Fermilab Proton Driver," Fermilab National Accelerator Laboratory FN-693, Batavia Illinois USA, July (2000).

표 1. 현재 개발 중인 10mA 이상의 양성자 가속기

국가	기관	시설명	규격	주요용도	완공년도
미국	ORNL	SNS	1.0GeV/1.4mA	중성자 과학	2006
일본	JAERI KEK	HIP A	0.4GeV/10mA 3.0GeV/0.3mA 50.0GeV/20 μ A	핵종 변환 중성자 과학 입자 물리	2006
EU	Join CERN	ESS EU	1.33GeV/10mA 1.0GeV/10mA	핵종 변환	2008
프랑스 이태리	각국별 별도추진		1.0~1.6GeV /~10mA	핵종 변환	
중국	CIAE IHEP	AD-RCNPS	1.0GeV/20mA	핵종 변환 중성자 과학	2010 (계획)

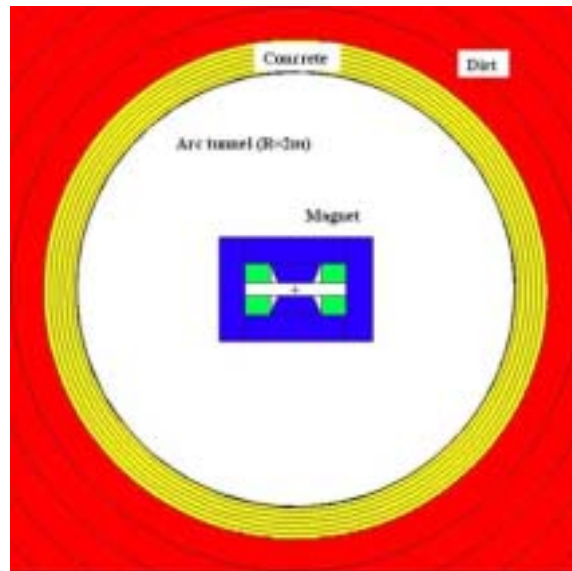


그림 1. MCNP-X와 MCNP-X/DORT 검증 모델

표 2. MARS, MCNP-X, MCNP-X/DORT 전산체계 검증계산 결과

	Equivalentdose behind concrete shield	Dirt shield thickness	
		Full beam loss accident	Credible accident
MARS14	-	26 feet	16 feet
MCNP-X	2,550 mrem/hr	26 feet	17 feet
MCNP-X/DORT	3,380 mrem/hr	29 feet	19 feet

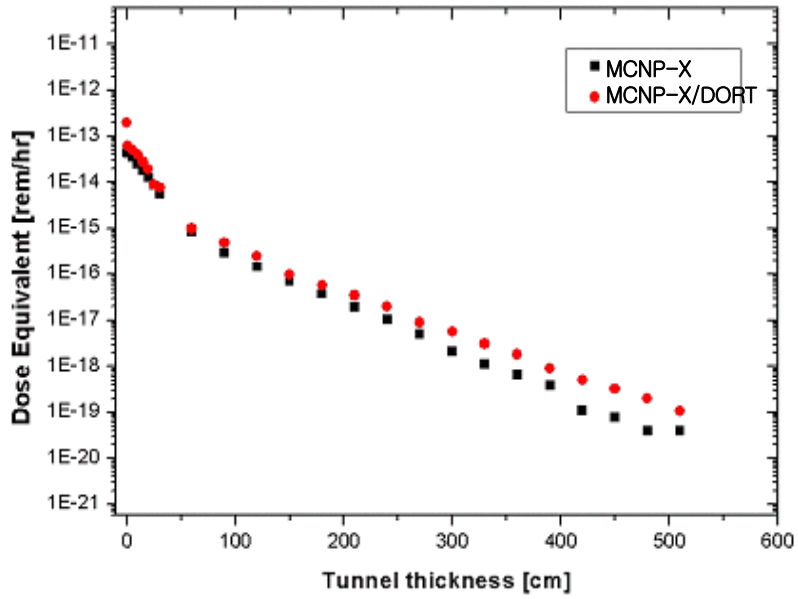


그림 2. 양성자 한 개가 입사하였을 때의 등가선량의 차폐 두께별 변화량

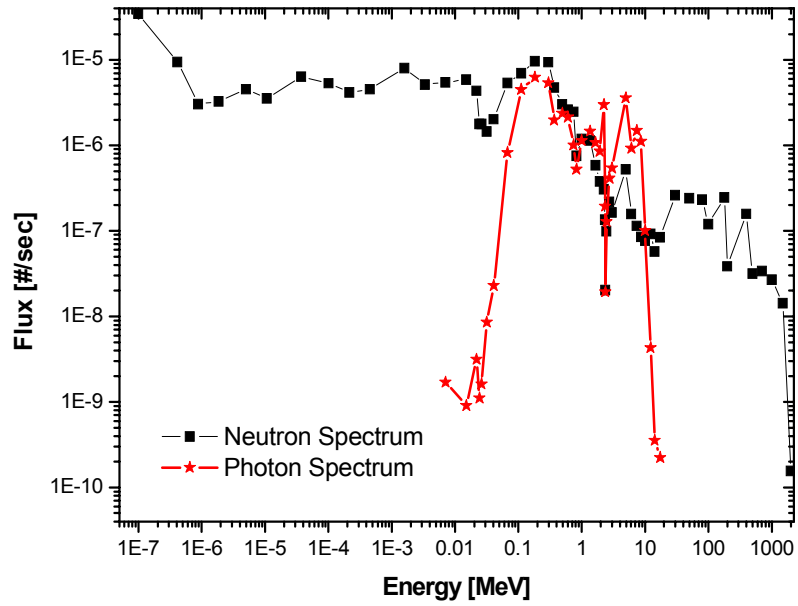


그림 3 2극 자석과 반응하여 발생된 중성자와 광자의 스펙트럼 비교

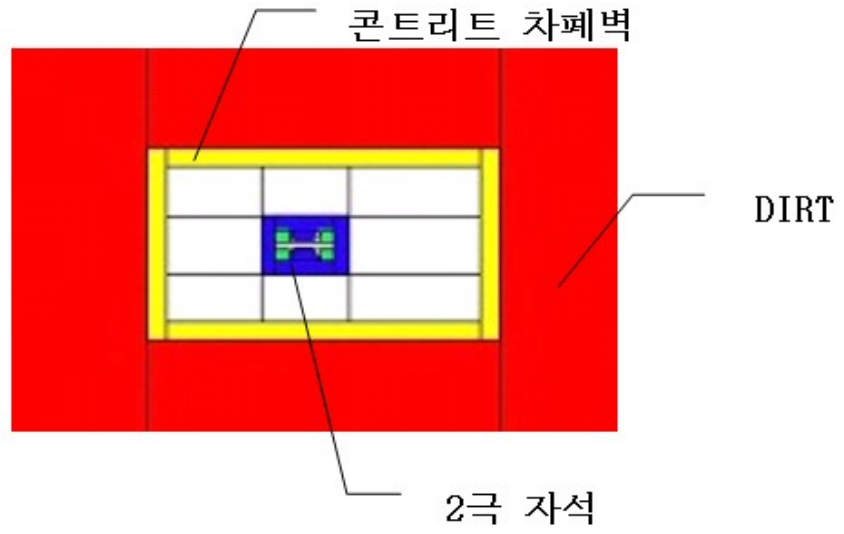


그림 4. Beam spill model geometry

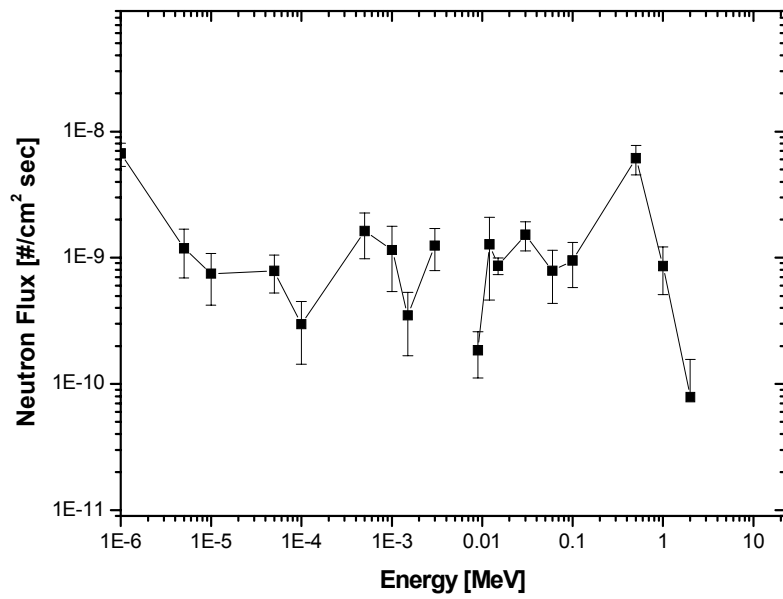


그림 5. 20MeV 양성자 입사 시 빔 누설에 의해 발생하는 2차 중성자 스펙트럼

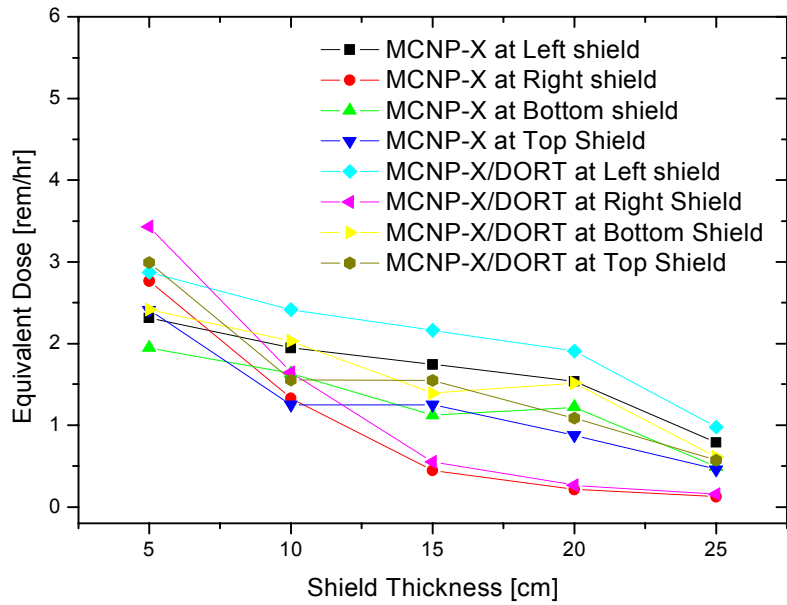


그림 6. 20MeV 양성자 입사 시 Beam spill model의 등가선량 감쇄곡선

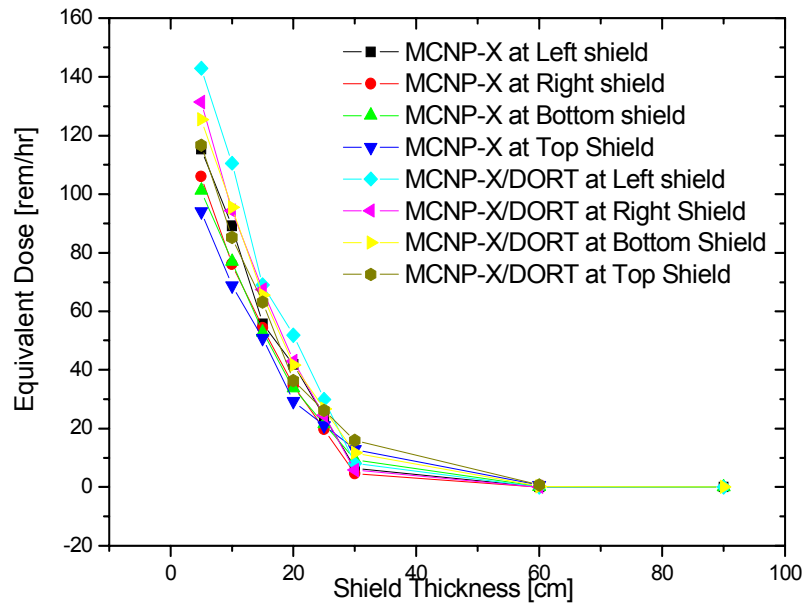


그림 7. 100MeV 양성자 입사 시 Beam spill model의 등가선량 감쇄곡선

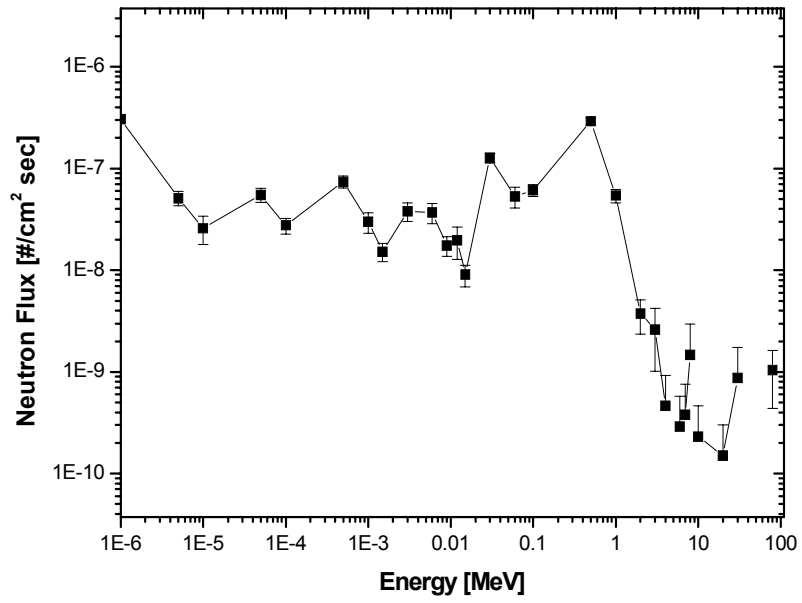


그림 8. 100MeV 양성자 입사 시 빔 누설에 의해 발생하는 2차 중성자 스펙트럼

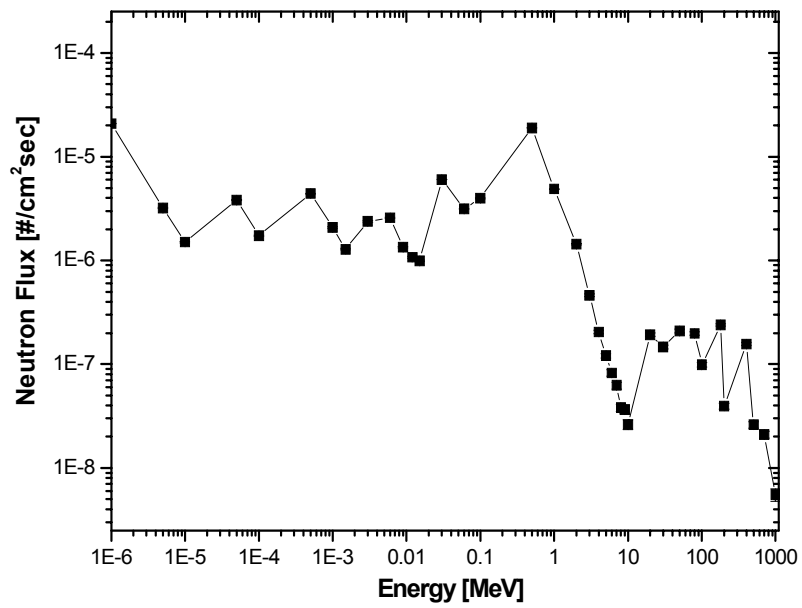


그림 9. 1GeV 양성자 입사 시 빔 누설에 의해 발생하는 2차 중성자 스펙트럼

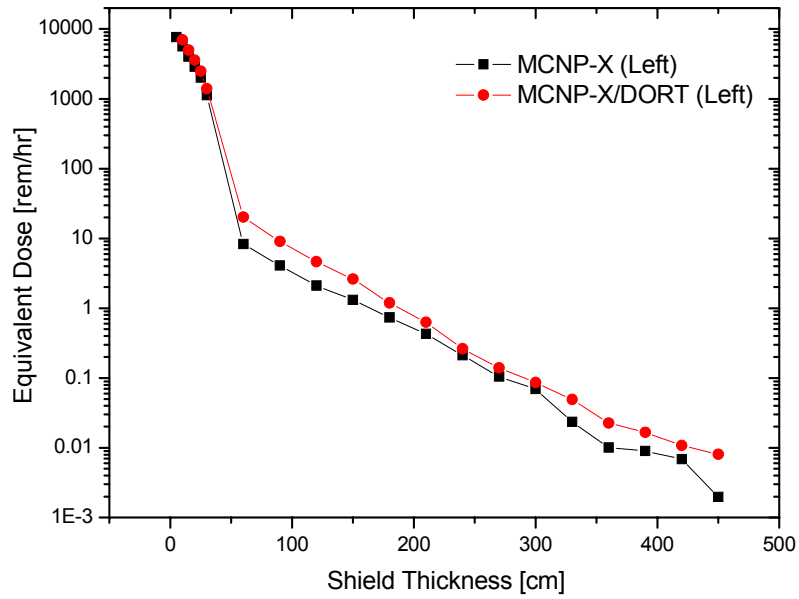


그림 10. 1GeV 양성자 입사 시 Beam spill model의
등가선량 감쇄곡선 (Left Shield)

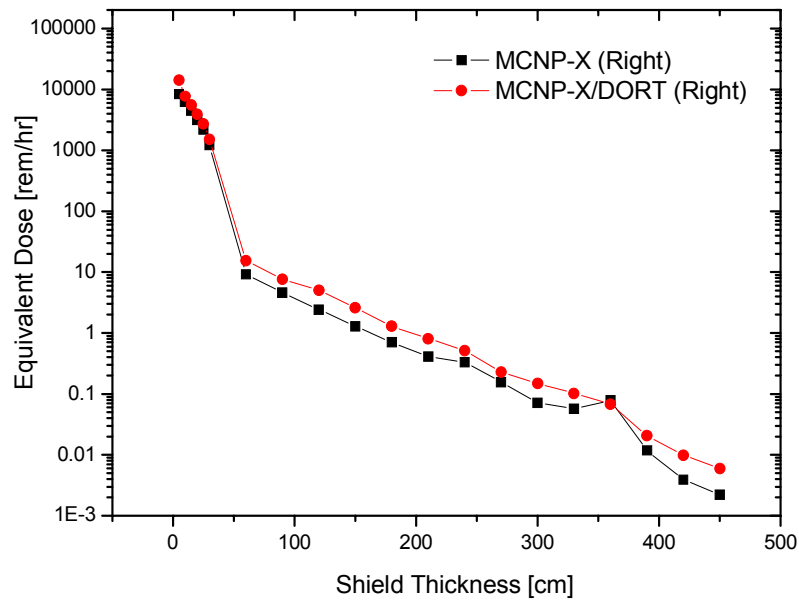


그림 11. 1GeV 양성자 입사 시 Beam spill model의
등가선량 감쇄곡선 (Right Shield)

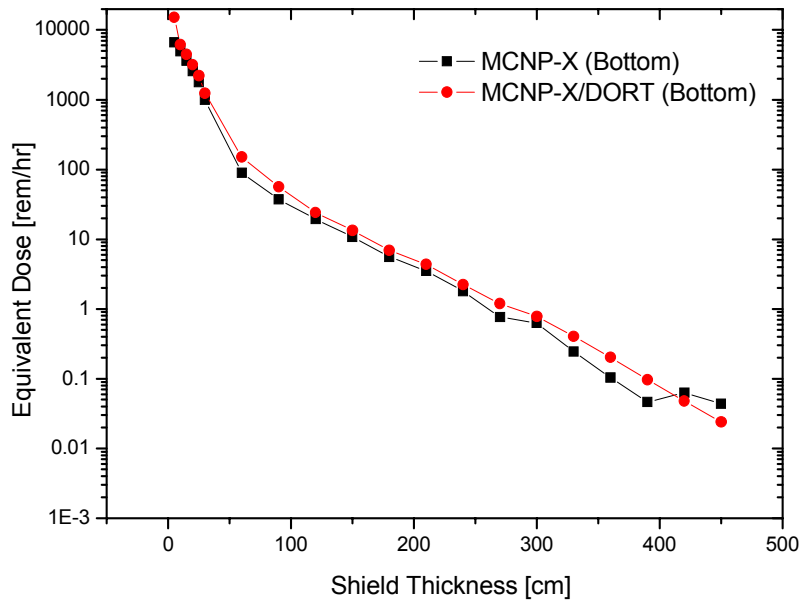


그림 12. 1GeV 양성자 입사 시 Beam spill model의 등가선량 감쇄곡선 (Bottom Shield)

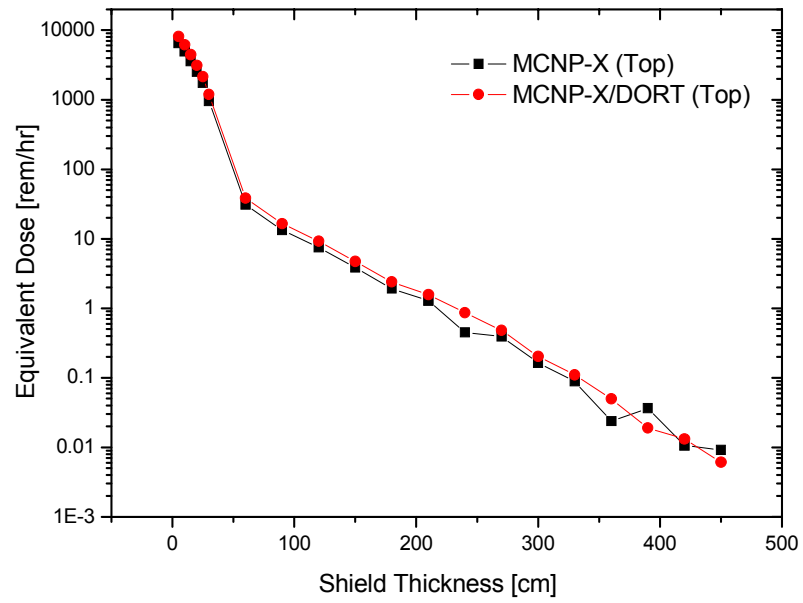


그림 13. 1GeV 양성자 입사 시 Beam spill model의 등가선량 감쇄곡선 (Top Shield)