

100 MeV 양성자가속기 차폐해석에서 FLUKA 코드의 적용

이희석¹ · 오주희² · 김민호¹ · 홍석모¹ · 고승국² · 조운갑³
¹포항공대 포항가속기연구소 · ²울산대 물리학과 · ³한국원자력안전기술원
 E-mail: lee@postech.ac.kr

중심어 (keyword) : 양성자가속기, 차폐해석, FLUKA, Monte Carlo

서 론

수십 MeV에서 수백MeV에 이르는 양성자가속기는 다양한 연구나 방사선치료등에 자주 사용되는 가속기이다. 국내에서도 50 MeV, 230 MeV 싸이클로트론이 동위원소 생산 및 양성자치료용으로 각각 운영되고 있으며 100 MeV의 양성자 선형가속기[1] 연구 및 산업용으로 건설중에 있다. 이러한 양성자가속기는 다량의 중성자 방출과 방사화를 유발할 수 있어서 방사선 방어의 중요성이 높다.

고에너지 입자가속기의 방사선 해석에는 MCNPX, FLUKA, PHITS, MARS, GEANT4 등 다양한 Monte Carlo 코드가 사용되고 있는데 본 연구에서는 다양한 입자에 대한 모사가 가능한 FLUKA를[2] 이용하여 현재 건설을 추진중인 PEFP 100 MeV 양성자 가속기 터널에 대한 차폐성능을 평가해 보았다. 이것은 FLUKA 코드의 적용 가능성과 성능을 확인해 보고자 함이다.

FLUKA 코드와 계산방법

본 계산에서 사용한 FLUKA 코드는 68 종류의 입자의 전송 및 반응을 계산할 수 있는 Monte Carlo 코드로서 Thermal Neutron에서부터 수백 TeV의 중성자까지 계산이 가능하다. 그룹 Library를 사용하는 저에너지 중성자와 감마선을 제외하고는 모든 반응은 물리적 모델을 이용해서 계산한다.

대용량 양성자가속기에서는 가속중이나 가속완료후에 빔손실의 정도가 방사선 차폐의 중요한 변수로서

이 계산에서는 1 W/m의 기준으로 100 MeV 양성자 빔 1 W가 일정한 위치에서 손실될 때 차폐체내에서의 중성자, 감마선, 유효선량을 구할 때 사용한 선량환산계수는 ICRP74의 데이터 중에서 AP형에 대한 것을 이용하였다. 그리고 유효선량의 분포를 계산하였다. 계산 조건을 정리하면 다음과 같다.

표 1. FLUKA 계산의 입력변수

| 변수 | 입력값 | |
|------|-----------------------|-----------------------|
| 빔에너지 | 100 MeV양성자 | 직경 0.5 cm |
| 빔손실 | 1 W (한 지점) | 1 지점 |
| 표적원소 | Al, Fe, Cu, Pb | |
| 표적크기 | 직경 10 cm, 두께 5 cm 원기둥 | |
| 차폐벽 | 내경 4 m, 두께 2.1 m 실린더 | 2.3 g/cm ³ |

표적은 앞의 표에서 보는 것과 같이 가속기 시설에 많이 사용되는 4가지 원소에 대해서 각각 계산하였으며 각 원소 종류에 따른 차이도 조사하였다. Scoring 방법은 USRBIN을 사용했다. 다음 그림 1은 FLUKA 입력 화일의 Geometry 구성을 보여 준다.

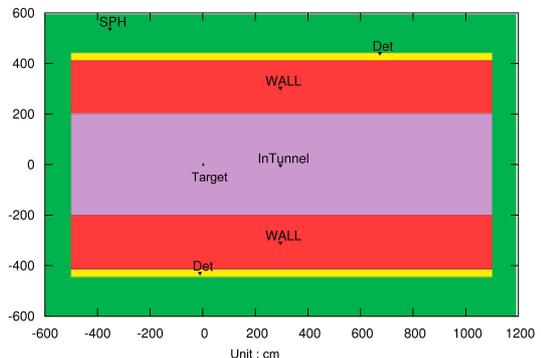


그림 1. FLUKA 입력화일의 표적 및 가속기 터널 구조 (빔방향의 단면).

결과 및 결론

1E+8개의 history에 대해서 5회이상의 batch run을 수행한 결과는 다음 2,3,4와 같다. 차폐체(콘크리트벽) 밖에는 30cm 두께의 물층을 배치하였으며 두꺼운 차폐벽로 인하여 이 정도의 history 숫자에서는 차폐벽이후의 위치에서 계산의 불확실도가 크게 증가하는 것으로 확인되었으면 1E+9정도의 history number를 사용해야 신뢰성 있는 계산 결과를 얻을 수 있었다. 전체 공간을 (z 방향 : -400~1000 cm, r방향: 0~550 cm) z 방향에서 140개, r방향에서 55개의 구간으로 나누어 계산을 하였다.

그림 2와 3은 전체 구조에서 각각 중성자와 감마선 fluence의 분포를 보여주는 것이다. 그림에서 확인되는 것과 같이 표적의 90도 방향이 아닌 60도에서 80도사이에 해당하는 차폐벽 밖에서 각 fluence가 가장 큰 것으로 확인되었다. 이러한 각도 분포 특성은 빔 에너지와 차폐벽의 두께 거리와 관련된 변수로서 그림 4의 유효선량 분포에서도 동일하게 나타난다. 1 W의 빔손실에서 최대 유효선량은 약 1.2E-9 pSv/proton 이며, 이 값은 0.36 uSv/h에 해당하는 선량이며 현재 PEFP의 목표 빔변수인 160 kW를 적용하여 일순간에 160 kW의 양성자 빔이 한 지점에서 손실된다면 약 50 mSv/h의 방사선량이 예상된다.

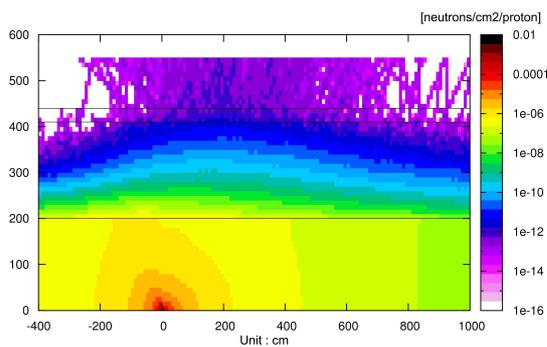


그림 2. 100 MeV 양성자 빔이 두꺼운 Al표적에 충돌할 때 발생하는 중성자 Fluence 분포.

표적원소의 종류에 따른 차폐벽 밖에서의 선량 차이는 크지 않은 것으로 확인되었고 Al 표적의 경우에 가장 큰 선량은 보였는데 이것은 다른 Fe, Cu, Pb에

서의 양성자 range가 짧기 때문에 표적의 자체 차폐 효과때문인 것으로 판단된다.

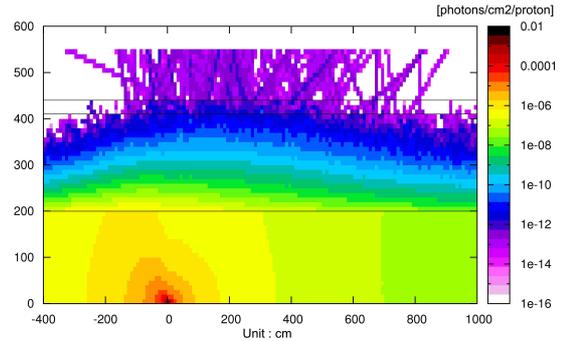


그림 3. 100 MeV 양성자 빔이 두꺼운 Al표적에 충돌할 때 발생하는 감마선 Fluence 분포

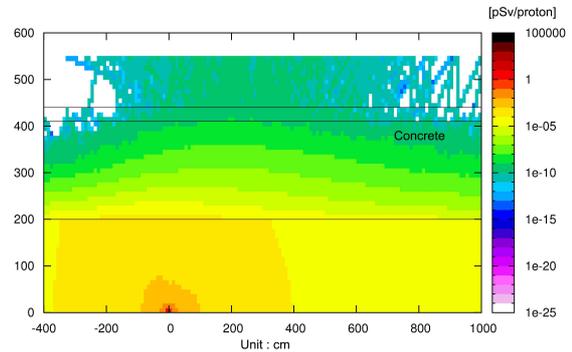


그림 4. 100 MeV 양성자 빔이 두꺼운 Al표적에 충돌할 때 유효선량의 공간 분포.

이상의 결과는 MCNPX를 이용한 이전의 결과[3]와 일부 일치하는 것으로 FLUKA를 이용한 차폐 평가가 적절한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. B.H.Choi, "Status of the PEFP", Proc. of PAC05, Knoxville, 2005.
2. A. Ferrari, et al., "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN 2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
3. Y.O. Lee, et al., Rad. Prot. Dosim, Vol. 115, (2005) 569-572.