

'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Monte Carlo 모사를 이용한 미분핵자료 측정설비 차폐해석 연구

Shielding Analysis of Nuclear Data Measurement Facilities by Monte Carlo Simulation

김종경, 신창호, 서보균
한양대학교

김귀년
포항공과대학

장종화
한국원자력연구소

요 약

포항가속기연구소에서 구축중인 미분핵자료 측정설비와 같이 고에너지 입자를 이용하는 시설은 방사선 누출의 가능성을 가지고 있으므로 차폐해석은 필수적으로 수행되어야 한다. 미분 핵자료 측정설비의 차폐해석을 위해 전자가속관과 중성자 생성용 표적에서 발생하는 방사선원을 몬테칼로 방법의 EGS4 코드를 사용하여 계산하고, 계산된 방사선원을 이용하여 MCNP4B 코드로 주요 차폐해석 지점에서의 공간선량을 계산하였다. 미분핵자료 측정설비 차폐해석을 수행한 결과 전자가속관과 중성자 생성용 표적에서 발생하는 방사선원에 의한 차폐해석 지점에서의 공간선량이 포항가속기연구소의 설계기준치인 0.5 mrem/hr 보다 매우 높게 나타나, 측정설비 운영의 방사선 안전성 확보를 위해서는 전자가속기룸에는 14 cm, 표적차폐실에는 11 cm의 납으로된 추가 차폐체의 설치가 필요한 것으로 나타났다.

Abstract

The facility generating high energy particles such as electron accelerator for nuclear data measurements has probability of radiation emission at all times, and thus the shielding analysis for the facility should be performed. In this work, two Monte Carlo codes, EGS4 and MCNP4B, were employed in the accurate calculations of radiation source term and ambient

dose at the working areas. EGS4 code was used in the calculation of neutron and photon sources from the accelerator beam tube and the beam target. The ambient dose at the working areas was calculated by MCNP4B code using neutron and photon source terms calculated from the EGS4 runs. The results showed that the ambient dose at the working areas was much higher than the design limit of PAL, 0.5 mrem/hr, and thus, it is recommended that the additional effective shields, lead shield of 14 cm thickness at the LINAC room and 11 cm thickness at the target room, should be installed for ensuring radiation safety of the nuclear data measurement facility

1. 서론

미분핵자료 측정설비의 운영에 반드시 필요한 방사선 안전성 확보를 위하여, 측정설비 운영시 발생하는 방사선이 시설내 작업종사자나 일반인에게 피폭되지 않도록 충분한 방사선 차폐시설이 설치되어야 한다. 포항가속기연구소의 미분핵자료 측정설비와 같이 전자를 고에너지로 가속시키는 전자가속기를 포함한 설비의 차폐해석은 미국의 ANL(Argonne National Laboratory)⁽¹⁾, SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)⁽²⁾이나 유럽의 CERN(European Organization for Nuclear Research)⁽³⁾ 등과 같이 이미 입자가속기를 운영하고 있는 실험시설에서 이루어져 왔다. 그러나 이들 기관에서 수행한 차폐해석 방법은 그들만의 특정 환경에서 이루어져 그들과 동일한 조건을 가지고 있지 않은 시설의 차폐해석에 적용하면, 엄밀히 말해, 정확한 차폐해석을 수행할 수 없다. 본 연구에서는 고에너지 전자와 전자에서 발생될 수 있는 고에너지 광자의 수송이 가능한 EGS4(Electron Gamma Shower) 코드⁽⁴⁾를 사용하여 미분핵자료 측정설비중 중성자 생성에 필요한 전자를 100 MeV까지 가속시키는 전자가속기와 미분핵자료 측정용 표적이 있는 표적차폐실에서 발생하는 방사선원을 계산하고, 계산된 방사선원을 이용하여 전자가속기와 표적차폐실 주변의 주요 차폐해석 지점에서의 공간선량을 MCNP4B 코드⁽⁵⁾를 사용하여 계산을 수행하였다.

2. 차폐해석 방법

미분핵자료 측정설비의 차폐해석을 위해 본 연구에서는 두 단계로 나누어 차폐해석을 수행하였다. 첫째로, 전자가속관이나 중성자 생성용 표적 같은 시설의 빔손실이 일어나는 지점에서 광자와 중성자 선원을 몬테칼로 방법의 EGS4 코드로 계산한 후, 두 번째로, 계산된 방사선원을 이용하여 방사선차폐 계산 및 도시메트리 분야에서 이미 계산의 신뢰성을 인증받고 있는 MCNP4B 코드로 차폐체 밖 주요지점에서의 공간선량 계산을 수행하였다.

미분핵자료 측정설비의 방사선원은 전자가 전자가속기의 가속관 등에서 손실되거나 중성자 생성용 표적에 입사할 때 발생된다. EGS4 코드를 사용하여 전자가속관의 빔 손실이나 높은 에너지로 가속된 전자가 중성자 생성용 표적에 입사할 때 발생하는 선원향을 계산하기 위하여, 가속관이

나 중성자 생성용 표적을 실제 모양과 동일하게 모델링하여 빔손실이 일어나는 지점에서부터 가속관이나 빔 덤프의 외부까지 EGS4 코드를 사용하여 광자와 전자를 수송하였다.

광자의 선원항을 계산하기 위하여 광자가 가속관이나 중성자 생성용 표적의 한 점에서 빠져 나온다고 가정하고 광자의 진행방향별로 선원항을 계산하였다. 몬테칼로방법을 사용하여 공간선량을 계산하기 위하여, 측정영역은 그림 1과 같이 전자빔이 Z축 방향으로 입사되었을 때 가속관이나 중성자 생성용 표적의 표면으로 선원이 빠져나오는 방향과 Z축이 이루는 방위각과 극각(Polar Angle)을 5° 단위로 나누어 선원항 측정영역을 설정하고 각 영역을 측정영역 ($\Omega_\theta, \Omega_\phi$)로 정하고, 각 측정영역에서 광자 선원항으로 방출되는 광자의 생성률, 에너지 분포, 그리고 방출각 분포를 계산하였다. 중성자 선원항은 몬테칼로방법을 사용, 공간선량을 계산하기 위하여 가속관과 중성자 생성용 표적에서 발생하는 중성자의 생성률과 에너지 분포를 계산하였다.

공간선량 계산은 EGS4에서 계산되어진 선원항을 이용하여 MCNP4B 코드로 계산을 수행하였다. 주요 차폐해석 지점에서의 공간선량을 계산하기 위하여 방사선원이 발생하는 곳에서부터 주요 차폐해석 지점까지 MCNP4B 코드 모델링을 수행하고, EGS4 코드를 사용하여 계산한 선원항을 이용하여 MCNP4B 코드내의 고정선원문제(SDEF) 해법으로 주요 차폐해석 지점에서의 공간선량을 계산하였다. 주요 차폐해석 지점에서의 공간선량은 차폐체 밖에 측정영역을 설정하고, 광자와 중성자가 이 측정영역에 들어올 때 각 입자의 에너지에 대한 선량환산인자를 곱한 후 각 측정영역의 면적으로 나누어 계산하도록 MCNP4B 입력문을 작성하였다. 공간선량 계산에 사용한 광자와 중성자에 대한 선량환산인자는 ICRP 74⁽⁶⁾에서 권고하는 값을 사용하였다.

3. 전자가속기 주요지점에서 차폐해석

3.1 선원항 계산

미분핵자료 측정설비 전자가속기의 가속관내 Slit 등과 같은 구조물이나 가속관내 잔류기체와 충돌하여 가속관을 빠져 나오는 전자는 광자나 중성자 같은 방사선원을 발생시킬 수 있다. 가속관에서의 빔손실은 전자가속기 정전과 같은 사고시 뿐만 아니라 정상운전시에도 항시 있으므로 가속관에서 빔손실이 일어날 경우를 가정하여 가속관에서 발생하는 선원항을 계산하여야 한다.

가속관에서 발생하는 선원항을 계산하기 위하여 실제 가속관과 동일하게 모델링을 하면 좋겠지만 가속관 구조와 동일하게 모델링하는데 어려움이 있고 계산의 효율성이 떨어지므로 가속관을 그림 2와 같이 내경 2 cm, 외경 10 cm의 구리관으로 단순화하여 모델링하였다.

한 개의 전자가 입사하였을 때 생성되는 광자 선원항을 선원이 방출되는 방향과 Z축이 이루는 극각(Polar Angle)으로 55° 에서 135° 영역에 대해, 방위각 방향으로 5° 에서 175° 영역에 대해 계산을 하였다. 한 개의 전자가 가속관에 입사하였을 때 가속관 밖으로 방출되는 광자 선원항은 8.1266×10^{-1} photons/electron으로 계산되었다. 극각별 광자의 방출분포는 그림 3에 나타내었다. 중성자 선원은 가속관 내에서 생성된 중성자가 등방성을 가진다고 가정하였다. 가속관에서 생성되

는 중성자의 생성률은 1.30833×10^{-2} neutrons/electron이다. 생성된 중성자의 에너지 분포는 그림 4와 같이 1 MeV 부근에서 최대값을 보이는 전형적인 Maxwellian⁽⁷⁾ 분포를 가진다.

3.2 공간선량 계산

미분핵자료 측정을 위한 가속기에서 발생하는 선원에 의한 주요 차폐해석 지점에서의 공간선량을 계산하기 위하여 그림 5과 같이 방사선원이 발생하는 가속기룸에서부터 차폐체 밖 주요 차폐해석 지점까지를 MCNP4B 코드 모델링을 수행하였다. 가속기룸의 바닥으로부터 Klystron Gallery 표면까지는 600 cm로 그 사이에 180 cm의 콘크리트 차폐체가 놓여 있다. Klystron Gallery 바닥면에서 공간선량 측정영역은 선원향 발생지점에서 최단거리에 있는 지점을 측정영역의 원점으로 설정하고, 원점을 중심으로 50 cm × 50 cm 간격으로 격자를 구성하여 각 측정영역의 중심좌표를 측정영역의 대표값으로 설정하였다.

미분핵자료 측정설비의 전자가속기 제원은 Beam Current가 1 A이고 빔주기가 120 Hz, 빔 폭이 4 μ s로 빔 파워가 1.26 kW나 되고 초당 7.5×10^{14} 개의 전자가 방출된다. 그림 6은 100 MeV로 가속된 전자가 가속관의 한 지점에서 100% 빔 손실이 발생하였을 경우 Klystron Gallery에서의 공간선량을 나타낸 것이다. 포항가속기 연구소에서는 전자가속기 정상운전시 5 MeV까지 30%의 빔손실을, 그리고 100 MeV까지 가속되는 중에 1%의 빔손실을 예상하고 있다. 전자가 100 MeV로 가속되는 지점에서 빔손실을 고려할 경우 최대 공간선량은 Z-X 평면의 (0, 150) 측정영역에서 2.57 mrem/hr 이다. 사고시 100 MeV로 가속된 전자가 모두 방출된다고 가정한다면 257.26 mrem/hr로 이미 운영중인 포항가속기연구소의 2 GeV 방사광가속기 차폐설계 기준치⁽⁸⁾인 0.5 mrem/hr 보다 매우 높은 값이다.

콘크리트 만으로는 충분한 방사선 차폐효과를 보지 못하는 것으로 나타나 방사선원이 차폐체내에서 차폐물질 감쇄상수의 지수배로 감쇄한다는 전형적인 차폐계산식을 사용하여 설계기준치를 만족시키는 추가 차폐체의 두께를 계산하였다. 차폐 계산식에 사용한 납 차폐체의 밀도는 11.34 g/cm^3 이고 납에서의 광자와 중성자 선원에 대한 감쇄상수는 25 g/cm^2 , 40 g/cm^2 이다. 추가 차폐체로 14 cm의 납 벽들을 설치하였을 때 Klystron Gallery에서의 최대 공간선량은 정상운전시 4.50×10^{-3} mrem/hr, 사고시 0.45 mrem/hr로 설계기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

4. 표적차폐실 주요지점에서 차폐해석

4.1 선원향 계산

미분핵자료 측정설비의 중성자 생성용 표적은 100 MeV로 가속된 전자가 직접 표적에 입사하여 표적 매질 내에서 많은 양의 광자를 발생시키고, 다시 광자가 표적 매질과 Photoneuclear 반응에 의해 중성자를 생산하는 장치이다. 중성자 생성용 표적은 직접 100 MeV로 가속된 전자가 입사되므로 많은 양의 방사선원을 발생하게 된다. 중성자 생성용 표적은 그림 7과 같이 너비와 높이가

40 mm이고 두께가 2, 3, 4, 그리고 6 mm인 Ta 판이 반복되는 형태로 설계되어 있다. 중성자 생성용 표적에서 발생하는 선원량을 계산하기 위하여 그림과 동일하게 EGS4 코드 모델링을 수행하고, Klystron Gallery에서의 공간선량 계산을 위하여 표적의 측면으로 방출되는 선원량을 계산하였다.

중성자 생성용 표적의 측면으로 방출되는 광자 선원의 방출률은 1.47389 photons/electron으로 광자 선원의 극각(Polar Angle)별 분포는 그림 8와 같다. 중성자 생성용 표적 내에서 생성되는 중성자의 생성률은 2.47741×10^{-2} neutrons/electron으로 전자 가속관에서의 중성자 생성률 보다 높게 계산되었다. 생성된 중성자의 에너지 분포는 그림 9에 나타내었다.

4.2 공간선량 계산

중성자 생성용 표적에서 발생하는 선원에 의한 Klystron Gallery, 2 GeV 가속기룸, 그리고 계단실에서의 공간선량을 계산하기 위하여 그림 10과 같이 MCNP4B 코드 모델링을 수행하였다. 중성자 생성용 표적은 내경 49 cm, 두께 5 mm의 Stainless Steel 재질의 용기에 담겨져 있다. 표적이 담겨져 있는 용기는 표적에서 발생하는 열을 냉각하고, 생성된 중성자를 감속하기 위하여 물로 채워져 있다. 물은 냉각용기의 하단에서부터 133 cm까지 채워져 있어 표적의 상단부를 1 cm 높이로 덮고 있다. 냉각용기의 위에는 TOF(Time of Flight)에서 중성자 미분핵자료 측정시 노이즈를 줄이기 위해 표적에서 생성되는 광자 선원을 차폐하는 직경 50 cm의 납 차폐체가 있다. 본 연구에서는 납 차폐체의 위치와 두께를 변경하여 가면서 Klystron Gallery에서의 공간선량 분포 변화를 계산하였다. 중성자 생성용 표적을 담고 있는 냉각용기 위에는 광자 선원을 차폐하기 위한 납 차폐체가 위치하게 된다. 본 연구에서는 납 차폐체의 위치를 표적차폐실과 Klystron Gallery 사이의 콘크리트 차폐체에서부터 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm, 그리고 250 cm 떨어진 위치에 설치하고, 납 차폐체의 두께를 5 cm, 10 cm, 그리고 15 cm로 하여 납 차폐체의 위치와 두께 변화에 따른 Klystron Gallery에서의 공간선량을 계산하였다. 표적차폐실도 미분핵자료 측정용 가속기룸과 동일하게 바닥으로부터 Klystron Gallery 표면까지는 600 cm로 그 사이에 180 cm의 콘크리트 차폐체가 놓여 있다. Klystron Gallery 바닥면에서 공간선량 측정영역은 전자가속기 차폐해석과 동일하게 설정하였다.

차폐체의 위치가 콘크리트 차폐체로부터 250 cm 떨어진 위치에 있고 차폐체의 두께가 5 cm 일 때 Klystron Gallery에서의 공간선량 분포는 그림 11에 나타내었다. 그림에서 측정영역 Z-X 평면에서 (0, 0)에서 최대 공간선량을 보이고 있으나, 이곳은 표적에서 생성된 중성자를 샘플설치실로 보내는 빔라인이 있는 곳으로 Klystron Gallery와 표적차폐실 사이의 콘크리트 차폐체가 존재하지 않는 곳이다. 납 차폐체의 위치와 두께의 변화에 따라 Klystron Gallery에서 최대 공간선량을 보이는 측정영역의 선량은 표 1에 정리하였다.

납 차폐체의 위치와 두께에 따른 Klystron Gallery에서의 공간선량 분포를 계산할 결과 납 차폐체의 위치가 콘크리트 차폐체에서 250 cm에서 150 cm 떨어진 위치에 있을 때에는 납 차폐체가 콘크리트 차폐체에 가까워질수록 Klystron Gallery에서의 공간선량이 증가하는 것을 확인할 수 있

었다. 그러나 납 차폐체와 콘크리트 차폐체 사이의 거리가 150 cm 이하일 때에는 납 차폐체의 위치 변화에 따른 차폐효과는 없음을 확인하였다. 납 차폐체의 두께 변화에 따른 공간선량은 납 차폐체의 위치가 콘크리트 차폐체에서 200 cm 이상 떨어진 곳에서는 납 차폐체의 두께가 두꺼워 지면 Klystron Gallery에서의 공간선량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으나, 납 차폐체가 콘크리트 차폐체에서 150 cm 이하로 떨어질 경우 납 차폐체의 두께변화에 따른 Klystron Gallery에서의 공간선량 변화가 미미함을 확인하였다. 납 차폐체의 위치가 냉각용기에서 멀어지고, 콘크리트 차폐체에 가까워지면 납 차폐체의 위치와 두께 변화에 따른 Klystron Gallery에서의 공간선량 변화가 미미한 것은 Klystron Gallery의 공간선량에 주된 영향을 미치는 광자선원의 납 차폐체에서의 산란영역이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

표 1에서 납 차폐체의 위치와 두께별 Klystron Gallery에서의 최대 공간선량도 전자가속기와 마찬가지로 포항가속기연구소의 설계기준치를 초과하는 것으로 계산되었다. 전자가속기의 경우와 동일한 방법으로 추가 차폐체의 두께를 계산한 결과 11 cm의 납 차폐체를 설치할 경우 Klystron Gallery에서의 공간선량은 포항가속기 연구소의 설계 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 표 2는 추가 차폐체를 설치하였을 경우 Klystron Gallery에서의 최대 공간선량을 보이는 측정영역의 선량이다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

미분핵자료 측정설비의 전자가속기와 표적차폐실 차폐해석을 몬테칼로 방법으로 수행하였다. 고에너지 광자와 전자를 수송할 수 있는 EGS4 코드를 사용하여 전자가속기와 중성자 생성용 표적에서 발생하는 방사선원을 계산하고, 계산된 선원항을 이용하여 MCNP4B 코드로 Klystron Gallery에서의 공간선량을 계산하였다. 차폐해석 결과 Klystron Gallery에서 공간선량이 포항가속기 연구소의 설계 기준치인 0.5 mrem/hr 보다 높게 계산되었다. 미분 핵자료 측정설비 운영의 방사선 안전성 확보를 위해서 전형적인 차폐해석식을 사용하여 추가 차폐체의 두께를 계산한 결과 전자가속기 부분에서 14 cm 두께의 납 차폐체를, 표적차폐실 부분에서는 11 cm의 납 차폐체를 설치하여야 할 것으로 판단된다

미분핵자료 측정설비는 현재 구축중인 시설로 본 연구의 결과는 측정설비의 방사선 차폐시설 설계에 반영될 수 있을 것이다. 미분핵자료 측정설비 주요 차폐해석 지점에서의 정확한 방사선량을 계산하기 위해서는 측정설비의 차폐시설의 설계가 완료된 후 본 연구에서 제시한 차폐해석 방법으로 차폐해석을 다시 수행하여야 할 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 포항공과대학 포항가속기연구소의 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. H. J. Moe, "Advanced Photon Source : Radiological Design Considerations," APS-LS-141 Revised, Argonne National Lab., 1991.
2. T. M. Jenkins, " Neutron and Photon Measurements through Concrete from a 15 GeV Electron Beam on a Target Comparison with Models and Calculations," *Nucl. Instr. and Meth.*, **159**, 265(1979).
3. A. Fasso, W. P. Swanson et al, "Radiation Problems in the Design of the Larger Electron-Positron Collider," CERN 84-02, European Organization for Nuclear Research, 1984.
4. W. R. Nelson, H. Hirayama, and D. W. O. Rogers, "The EGS4 Code System," SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center, 1985.
5. J. F. Briesmeister, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
6. International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation," ICRP Publication 74, Pergamon press, Oxford, 1996.
7. International Atomic Energy Agency, "Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators," IAEA Technical Report Series 188, Vienna, 1979.
8. 포항가속기연구소, "방사선 안전성 분석보고서," 포항가속기연구소, 1993.

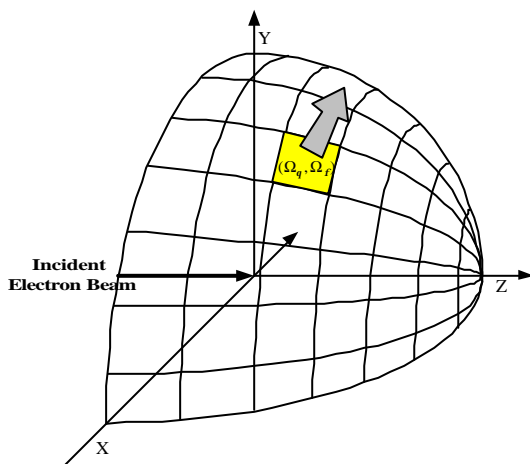


그림 1 광자 선원항 계산에 사용한 측정영역

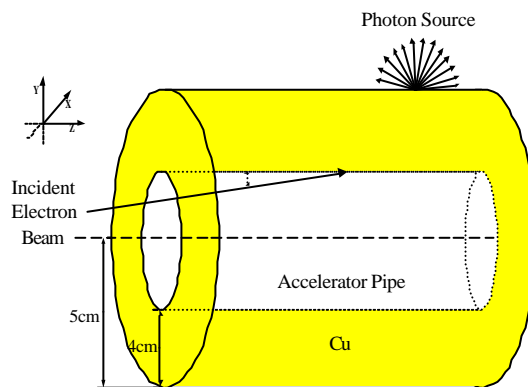


그림 2 전자가속관에서 발생하는 방사선원 계산을 위한 EGS4 코드 계산 모델링

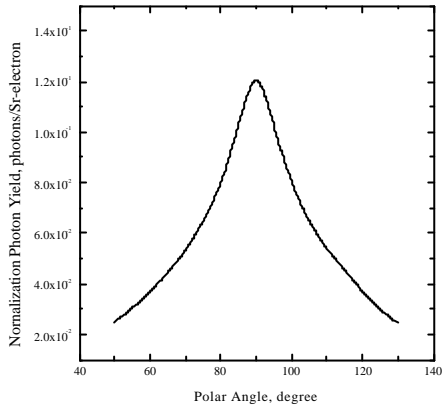


그림 3 전자가속관에서 방출되는 광자의 극각별 방출분포

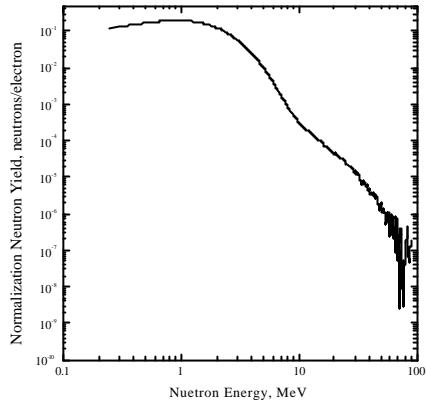


그림 4 전자가속관에서 발생된 중성자의 에너지 분포

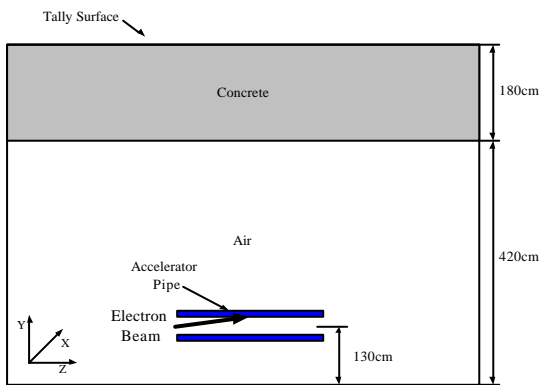


그림 5 전자가속기름 위 Klystron Gallery에서의 공간선량 계산을 위한 MCNP4B 코드 모델링

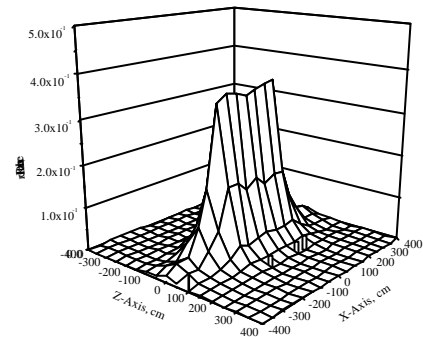


그림 6 전자가속기름 위 Klystron Gallery에서의 공간선량 분포(100% 빔손실 시)

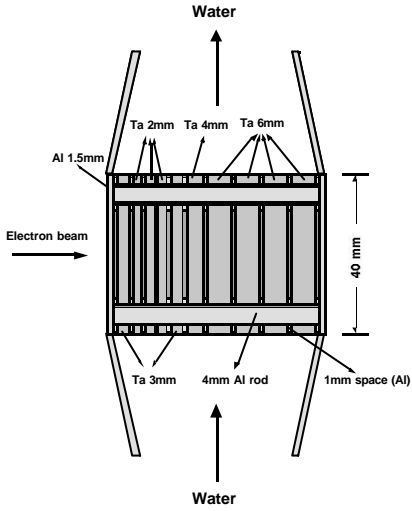


그림 7 중성자 생성용 표적에서 발생하는 방사선원 계산을 위한 EGS4 코드 계산 모델링

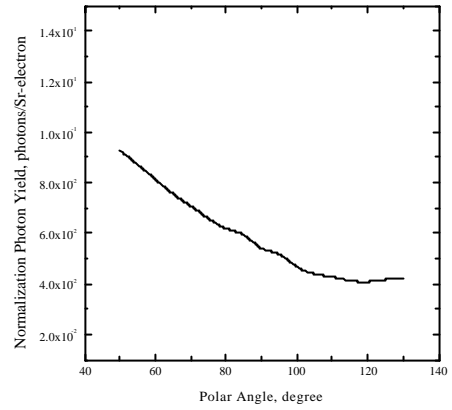


그림 8 중성자 생성용 표적에서 방출되는 광자의 극각별 방출분포

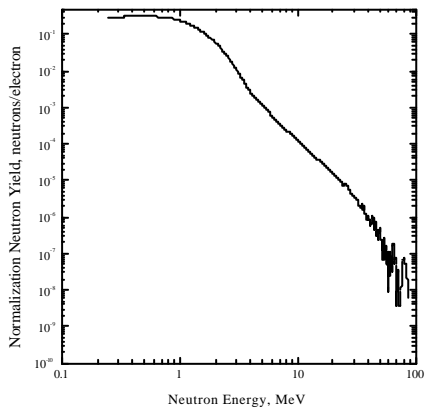


그림 9 중성자 생성용 표적에서 발생된 중성자의 에너지 분포

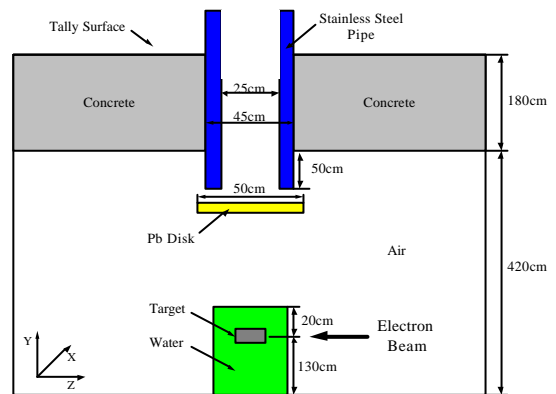


그림 10 표적차폐실 위 Klystron Gallery에서의 공간선량 계산을 위한 MCNP4B 코드 모델링

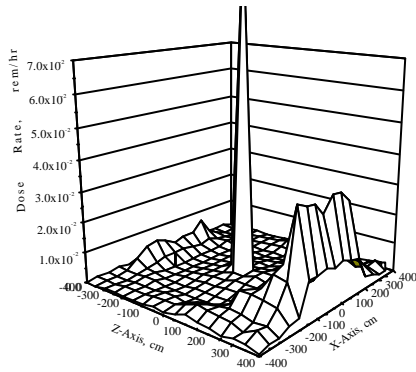


그림 11 표적차폐실 위 Klystron Gallery에서의
의 공간선량 분포(100% 빔손실,
 $d^*=250$ cm, $t^{**}=5$ cm)

- * 납차폐체와 콘크리트 차폐체와의 거리
- ** 납 차폐체의 두께

표 1 납 차폐체의 위치와 두께의 변화에 따른 표적차폐실 위 Klystron Gallery에서의
최대 공간선량

단위 : rem/hr

거리 \ 두께	250 cm	200 cm	150 cm	100 cm	50 cm
5 cm	2.40320×10^{-2} (350, -150)	4.37795×10^{-2} (150, 100)	4.98684×10^{-2} (150, 0)	4.98243×10^{-2} (150, 0)	5.00431×10^{-2} (150, 0)
10 cm	1.75895×10^{-2} (350, -150)	4.36661×10^{-2} (150, 100)	4.98616×10^{-2} (150, 0)	4.98255×10^{-2} (150, 0)	5.00317×10^{-2} (150, 0)
15 cm	3.34850×10^{-3} (350, -150)	3.46468×10^{-2} (200, 0)	4.97195×10^{-2} (150, 0)	4.98324×10^{-2} (150, 0)	5.00567×10^{-2} (150, 0)

표 2 11 cm의 추가 납 차폐체 설치시 표적차폐실 위 Klystron Gallery에서의 최대 공간선량

단위 : mrem/hr

거리 \ 두께	250 cm	200 cm	150 cm	100 cm	50 cm
5 cm	0.16362	0.29808	0.33960	0.339295	0.34078
10 cm	0.11976	0.29736	0.33955	0.33930	0.34071
15 cm	0.02280	0.23592	0.33858	0.33935	0.34086