

고에너지 X-ray를 이용한 화물검색시설에서의 중성자 Skyshine 방사선량을 평가

조영호

대구가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

Assessment of Neutron Skyshine Dose in a Cargo Inspection Facility Using High Energy X-ray

Youngho Cho

Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

<요약>

고에너지 X-ray를 사용하는 방사선 이용 시설에서는 고에너지 광자에 의한 광중성자 등의 발생에 대한 방사선방호 조치가 방사선 안전의 관점에서 매우 중요한 이슈 중의 하나이다. 이러한 광중성자들은 시설 외부로 누설될 경우 skyshine effect에 의해 작업종사자 및 일반 대중에게 예기치 않은 방사선 피폭을 야기할 수 있다. 이 논문에서는 9MeV X-ray를 이용한 화물검색시설을 대상으로 몬테카를로법을 이용하여 광중성자 생성량을 계산하고 이를 통해 시설 외부에서의 중성자 skyshine 방사선량을 평가하였다.

<Abstract>

The radiation protection measures for the photoneutrons are one of the most important issue of radiation safety in high energy X-ray facilities. When the photoneutrons are released from the facility, the general public as well as occupational workers are exposed to unexpected radiations by neutron skyshine effect. In this study, the photoneutron inventory are calculated using monte carlo method, and the neutron skyshine dose rate is assessed using the inventory. A 9MeV X-ray cargo inspection facility is considered as a reference facility

I. 서론

Skyshine 방사선이란 방사선원을 포함한 시설로부터 외부로 방출된 방사선이 공기 중에서 산란하여 그 결과 지면에 도달하는 방사선을 의미한다^{[1],[2],[3]}. 일반적으로 전자가속기나 양자가속기 등 대

부분의 입자가속기 시설에서 중성자에 의한 skyshine 방사선이 광자 등 다른 방사선에 의한 skyshine 방사선보다 피폭선량 면에서 지배적인 것으로 알려져 있다. 그림 1은 Stanford Linear Accelerator Center(SLAC)에 설치된 20GeV LINAC 주변에서 측정된 광자 및 중성자 skyshine 방사선량률이며, 이 예를 통해 광자 및 중성자의 skyshine 방사선량률의 차이 정도를 알 수 있다^[4]. 중성자

skyshine은 지붕 두께가 매우 얇거나 또는 전혀 없는 초기의 입자가속기 시설에서 최초로 관측되었으며, 이 경우 시설 지붕에서 위 방향으로 방출된 중성자들이 대기 중에서 후방산란하여 지면 근처에서 방사선 피폭을 일으키게 되었다.

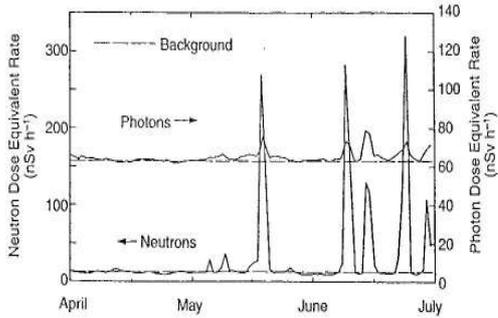


그림 1. 광자 및 중성자 skyshine 방사선량을 실측값 (SLAC, 20GeV LINAC 주변).

고에너지 X-ray를 이용하는 화물검색시설에는 X-ray와 시설 내 구조물 간의 광핵반응에 의해 생성된 광중성자들이 skyshine 방사선을 일으킬 가능성이 있으며, 이는 시설에 상주하는 작업종사자는 물론 시설 주변에 위치한 일반대중에게도 불필요한 방사선 피폭을 야기할 수 있다. 화물검색시설은 2001년 미국에서 9/11테러가 발발한 이래로 항만 및 공항을 통해 이동하는 밀수품, 불법무기, 위험물자, 마약류, 밀항자 등을 적발, 차단하기 위해 국제사회에서 그 이용이 급격히 증가하는 추세에 있다. 최근 X-ray나 중성자를 이용한 화물검색시스템이 개발되어 많은 국가에서 사용되고 있으며, 우리나라에도 부산항, 인천항, 평택항, 군산항, 울산항, 인천국제공항 등의 항만 및 공항에서 X-ray를 이용한 화물검색시설이 이미 설치되어 운영되고 있다.

이 논문에서는 9MeV X-ray를 이용한 화물검색 시설에서 광핵반응에 의해 생성되는 광중성자 재고량을 몬테카를로 시뮬레이션 코드인 MCNPX Ver.2.5.0.을 이용하여 계산하였다. 그리고 이 결과를 바탕으로 화물검색시설 외부에서의 중성자 skyshine 방사선에 의한 방사선량을 NCRP No.144에 제시된 방법론을 적용하여 계산하였다.

II. 9MeV X-ray 화물검색시설

화물검색시설은 LINAC, CdWO₄ 검출기, 이송대차, 방사선방호장비, 영상처리시스템 등 컨테이너 검색을 위한 모든 기자재와 차폐 건물을 포함한다¹⁾. 그림 2.는 9MeV X-ray 컨테이너 화물검색시설의 사진이다.



그림 2. 9MeV X-ray 컨테이너 화물검색시설.

LINAC은 컨테이너 화물을 조사하기 위한 9MeV X-ray 빔을 방출하며, 컨테이너를 수평과 수직 양 방향에서 조사하기 위해 수평 및 수직 조사면 양 방향으로 각각 1대씩 모두 2대가 배치된다. 방출된 X-ray 빔은 검색대상인 컨테이너를 상단부터 하단까지 완전히 커버하여 조사할 수 있도록 방출 각도가 설계되어 있으며, 컨테이너를 스캔한 투과 X-ray는 검출기에서 수집된다. 검출기는 데이터 획득 및 제어장치 등과 연결되어 있으며, 수집된 투과 X-ray는 영상처리 소프트웨어를 통해 처리되어 컨테이너 검색영상으로 재구성된다. X-ray 빔 중심축에서의 조사선량률은 선원으로부터 최대 30Gy/min로 비교적 높기 때문에 컨테이너 트레일러 운전자는 X-ray 빔 조사가 이루어지는 동안은 트레일러에 탑승할 수 없다. 따라서 X-ray 빔 조사가 진행되는 동안 운전자는 하차하고 이송대차가 컨테이너 트레일러를 이송하는 역할을 하게 된다. 방사선안전 및 방호장비는 방사선차폐, 인터록, 비상정지, 방사선 감시 등의 기능을 하며, 시설 운전 중 방사선안전을 확보할 수 있도록 설계되어 있다¹⁾. 그림 3.과 그림 4.를 통해 양방향 컨테이너 화물

검색시설의 구조 및 가속기-검출기 배치 형태를 알 수 있다.

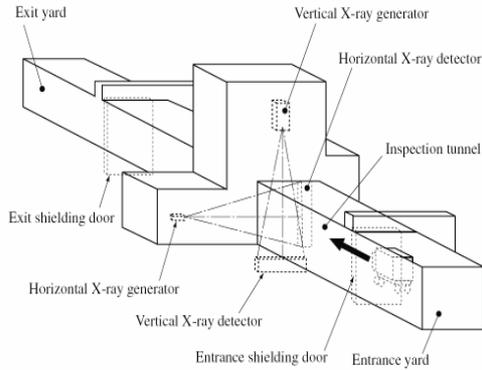


그림 3. 양방향 화물검색시설의 구조.

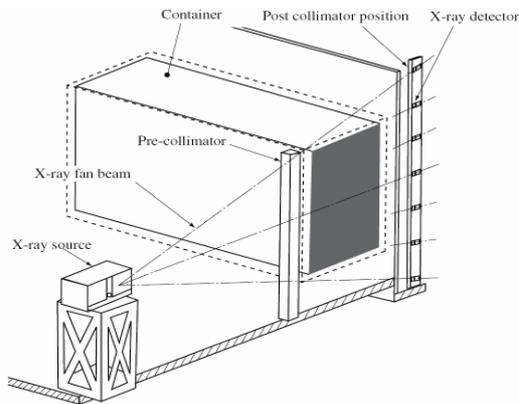


그림 4. 가속기-검출기 배치 형태.

앞의 그림 3.에서 확인할 수 있듯이 LINAC은 수평(Horizontal)과 수직(Vertical) 양방향 조사를 위해 2대가 설치되며, 이 논문에서 평가의 대상이 되는 중성자 skyshine 방사선은 수직(Vertical) 방향 LINAC에서 방출된 9MeV X-ray가 지붕 등 상부 구조물과 반응하여 발생된 광중성자에 의한 것임을 밝혀 둔다.

III. 배경 이론 및 평가 방법

광중성자 반응이 발생하기 위해서는 X-ray의 에너지가 일정한 문턱에너지 값을 초과하여야 하며, 이 문턱에너지 값은 핵종별로 상이하다. 화물검색 시설에 포함된 장비 및 구조물을 구성하는 핵종들 중 많은 핵종들의 광중성자 반응 문턱에너지가 9MeV 미만이므로 이 경우 광중성자가 생성될 수 있다. 수·수십 MeV 에너지의 LINAC에 대해 X-ray 타겟에서 광중성자 반응에 의해 생성되는 중성자의 중성자속은 보통 1010-1012 정도의 크기이다 [5],[6].

MCNPX 2.5.0. 전산코드를 이용하여 광중성자 생성량을 계산하기 위해서는 기하학적 구조를 설계하여 입력 파일을 작성하여야 한다. 이 논문에서는 X-ray target, LINAC, 주변 구조물 및 검색건물의 순서로 기하학적 구조를 설계하고 이에 대한 타당성을 각각 검증하였다. 화물검색시설을 묘사한 그림은 그림 5, 및 그림 6.과 같다. 이는 각각 상세 평면도와 상세 단면도로서, 이 그림들에서 건물 내외벽을 비롯하여 LINAC, 검출기, Pre-object 콜리메이터, 컨테이너 등의 주요 장비와 구조물을 확인할 수 있다.

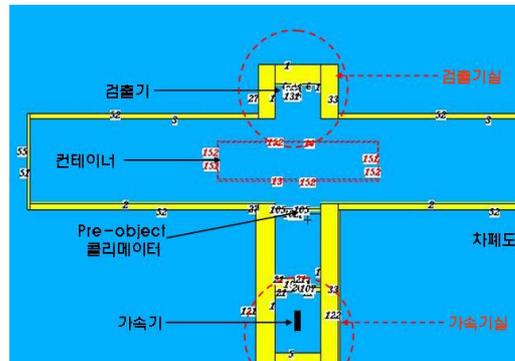


그림 5. 화물검색시설 modeling (평면도).

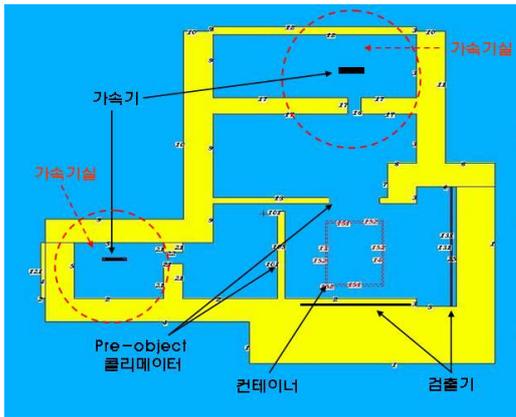


그림 6. 화물검색시설 modeling (단면도).

몬테카를로법을 통해 계산된 광중성자 재고량은 skyshine 방사선량률 평가에 사용된다. NCRP No.144에 제시된 Stapleton 등의 연구 결과에 따르면, 중성자 skyshine 방사선에 의한 방사선량은 방사선원의 강도와 방사선원으로부터의 거리의 함수이며 다음 식으로 계산된다. 이 식에서 요구되는 유효흡수거리에 대한 자세한 값은 그림 7.에서 찾을 수 있다^[3].

$$H(r) = \frac{k}{(h+r)^2} e^{-\frac{r}{\lambda}} \quad (1)$$

여기서, $H(r)$ = 단위중성자선원당 방사선량[Sv]

$$k = 2 \times 10^{-15} \text{ Sv} \cdot \text{m}^2$$

$$h = 40 \text{ m}$$

$$r = \text{지붕에서 관심지점까지 수평거리[m]}$$

$$\lambda = \text{유효흡수거리}$$

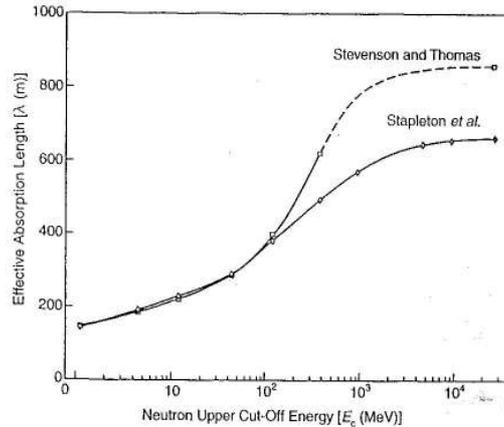


그림 7. 중성자 최대에너지 값에 따른 유효흡수거리.

IV. 결과 및 고찰

화물검색시설 운전 중 발생하는 중성자 skyshine 방사선에 의한 방사선량률 계산 결과는 표 1.과 같다. 이 표에는 화물검색시설 경계로부터 5m, 30m, 100m, 1000m 떨어진 지점에서의 방사선량률 수치가 1σ level의 오차와 함께 제시되어 있다. 이러한 방사선량률 수치를 관세청, ICRP60 등에서 제시한 작업종사자 및 일반 대중에 대한 방사선량률 제한치와 비교하면, 중성자 skyshine 방사선에 의한 작업종사자 및 일반 대중의 방사선 피폭선량은 무시할 만한 정도인 것을 알 수 있다. 참조 화물검색시설에서 수직 방향 LINAC이 설치된 가속기실의 콘크리트 지붕 두께는 50cm, 벽면 두께는 70cm로 설계되어 있어, 중성자 누설에 대한 차폐를 만족스럽게 하고 있는 것으로 분석된다. 그러나 이러한 차폐벽의 두께가 얇아질 경우 중성자 skyshine 방사선량률은 증가하게 될 것이다.

표 1. 중성자 skyshine 방사선량률

시설에서의 거리 (m)	방사선량률 (mSv/hr)
5	1.20±0.20E-08
30	4.21±2.53E-09
100	6.60±1.06E-10
1000	2.97±0.45E-14

참 고 문 헌

표 2. 방사선량을 제한치

구분	선량제한치	방사선량을 제한치 (mSv/hr)
관세청 (KCS)	5mSv/yr (작업종사자)	2.5E-03 (5mSv/yr X 1yr /2000hr)
ICRP60	20mSv/yr (작업종사자)	1.0E-02 (20mSv/yr X 1yr /2000hr)
	1mSv/yr (일반 대중)	0.5E-04 (1mSv/yr X 1yr /2000hr)

- [1] NCRP, “Radiation Protection Design Guidelines for .1-100MeV Particle Accelerator Facilities,” NCRP Report No. 51, 1977.
- [2] Patton H. McGinley, “Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities,” Medical Physics Publishing, 1998.
- [3] NCRP, “Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities,” NCRP Report No. 144, 2003.
- [4] Posdata Co. Ltd., “Technical Specifications of Fixed Type X-ray Container Cargo Inspection System,” 2005.
- [5] IAEA, “Handbook on Nuclear Activation Data,” Technical Report Series No. 273, STI/DOC/10/273, 1987.
- [6] W. L. Huang, Q. F. Li and Y. Z. Lin, “Calculation of Photoneutrons Produced in the Targets of Electron Linear Accelerators for Radiography and Radiotherapy Applications,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 229, pp.339-347, 2005.