

X-ray 컨테이너 화물검색시스템의 전자선형가속기 주변 콘크리트 차폐벽 내 방사화생성물에 대한 몬테카를로법 평가

조영호^{1*}

¹대구가톨릭대학교 방사선학과

Monte carlo estimation of activation products induced in concrete shielding around electron linac used in an X-ray container inspection system

Young Ho Cho^{1*}

¹Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

요 약 고에너지 X-ray를 투시 방사선원으로 사용한 컨테이너 화물검색시스템에서 생성되는 광중성자에 의해 주변 콘크리트 차폐벽에서 발생하는 방사화생성물을 평가하였다. 몬테카를로 전산해석 코드인 MCNPX2.5.0을 사용하였으며, 참조시스템은 국내 주요 항만에 설치된 9MeV X-ray 고정식 양방향 컨테이너 화물검색시스템이다. 9MeV X-ray 조사에 따라 생성되는 광중성자의 (n,γ) 반응에 의한 방사화생성물 재고량을 계산하고 이에 따라 야기되는 방사선 피폭선량을 계산하였다.

Abstract Activation products generated by photoneutrons in concrete shielding wall around electron linac were estimated for a high energy X-ray container cargo inspection system. Monte carlo code, MCNPX2.5.0 was used for reference system of 9MeV fixed type dual-direction container cargo inspection system installed at major harbors in Korea. Activation products inventory generated by photoneutron (n,γ) reaction are estimated, and then radiation dose rate is calculated from the results.

Key Words : Container Inspection System, Monte Carlo Method, Activation Product, Photoneutron, Electron linac

1. 서론

X-ray를 이용한 화물검색시스템은 미국에서 “9.11 테러”가 발생한 이후 국가안보 유지를 위해 국제적으로 그 이용이 더욱 가속화되고 증가되는 추세에 있다. 미국은 “9.11 테러”이후, “컨테이너안보구상(CSI, Container Security Initiative)”을 통해 미국으로 수출되는 컨테이너 화물에 대해서는 수출지에서 획득한 화물검색영상을 제출할 것을 의무화하고 있다. 우리나라는 부산항이 미국과 이미 “메가항구(Mega-Ports)” 협력협정을 체결하였으며, 2003년 8월 부산항에 “컨테이너안보구상(CSI)”이행을 위

한 한-미 세관합동사무소가 개설되었다. 이러한 배경에서 X-ray를 이용한 화물검색시스템은 우리나라에서도 앞으로 그 이용이 필연적으로 계속 증가할 수밖에 없으며 이에 대한 연구와 분석 역시 향후 더욱 중요하다고 할 수 있다.

이러한 현실에 반하여 화물검색시스템과 관련한 산업은 비교적 최근에 성장한 분야로서, 고에너지 X-ray 조사로 발생하는 작업자 방사선 영향에 대한 분석은 다소 미흡한 실정이다. 특히 광중성자에 의해 발생할 수 있는 방사화생성물과 그로 인한 지발방사선의 영향에 대한 정량적 분석은 현재 국제적으로도 이루어져 있지 않다. 이에

이 논문은 2010년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

*교신저자 : 조영호(cyhpp@hanmail.net)

접수일 10년 01월 12일

수정일 10년 03월 02일

게재확정일 10년 03월 18일

따라 본 논문에서는 현재 우리나라에 설치되어 있는 9MeV X-ray 화물검색시스템에서 야기되는 광중성자에 의한 방사화영향에 대한 정량적 평가를 수행하였다.

2. 방사화생성물 평가 이론

수 MeV 이하의 광자(X-ray)와 물질과의 주요 상호작용에는 광전효과, Compton효과, 쌍생성, 광핵반응이 있다. 광핵반응(photoneuclear reaction)이 발생할 확률은 광전효과, Compton효과, 쌍생성이 발생할 확률을 모두 합친 값보다는 10의 수 제곱 배 작다. 광핵반응의 유형에는 (γ, p) , (γ, n) , (γ, α) , $(\gamma, 2n)$, (γ, np) 등이 있다 [1].

이 중, 광중성자 반응, 즉 (γ, n) 반응이 발생하기 위해서는 X-ray의 에너지가 일정한 문턱에너지 값을 초과하여야 하며, 이 문턱에너지 값은 핵종별로 구별되는 고유의 물리적 특성이다. 화물검색시스템을 구성하는 가속기, 콘크리트 차폐벽, 콜리메이터 등의 주요 구성 원소들은 대부분 이러한 문턱에너지 값이 9MeV 이하이며, 그 결과 광중성자가 시설 내부에서 생성되게 된다. 특히 대부분의 광중성자는 광자의 에너지가 높은 지점인 가속기와 콜리메이터에서 생성되므로, 가속기 주변의 콘크리트 차폐벽은 X-ray에서 발생된 광중성자가 일차적으로 반응하는 구조물로서 매우 중요하다.

일반적으로 중성자는 원자핵과 충돌할 때 탄성 또는 비탄성 산란을 한다. 산란을 통해 에너지를 잃은 중성자는 핵에 포획 또는 흡수될 수 있으며, 이는 주로 (n, γ) 반응을 통해 이루어진다. 이러한 반응의 결과로 생성된 방사성핵종들은 고유의 방사성붕괴를 통해 β , γ 등을 포함한 2차(delayed) 방사선을 방출하며 안정 원소로 바뀌게 된다 [2,3].

중성자 포획 반응에 의해 발생하는 방사성핵종의 생성은 다음 식으로 기술된다 [4,5].

$$\frac{dN(x, E, t)}{dt} = \Phi(x, E, t)\sigma(E)N_T(x, E, t) - \lambda N(x, E, t)$$

여기서, $N(x, E, t)$ = 중성자 조사로 발생하는 방사성핵종의 수 [nuclide/cm³]

$\Phi(x, E, t)$ = 중성자속 [neutrons/cm²sec]

$\sigma(E)$ = (n, γ) 반응단면적 [cm²]

$N_T(x, E, t)$ = 중성자 조사를 받는 타겟 핵종의 수 [nuclide/cm³]

λ = 붕괴상수 [sec⁻¹]

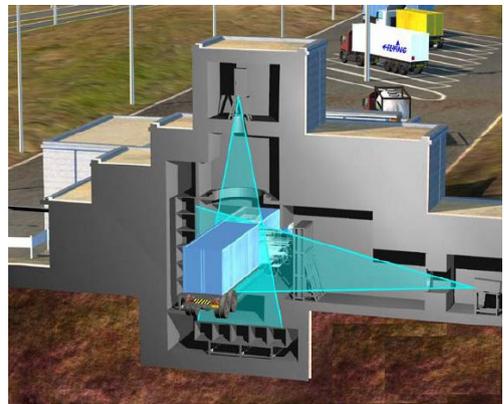
위 식을 풀어서 초기조건 등을 대입하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$N_{act}(t) = \frac{\int_E \int_V \Phi \sigma N_T dV dE}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

여기서, $N_{act}(t)$ = 중성자 조사로 발생하는 방사성핵종의 수 [nuclide]

3. 화물검색시스템

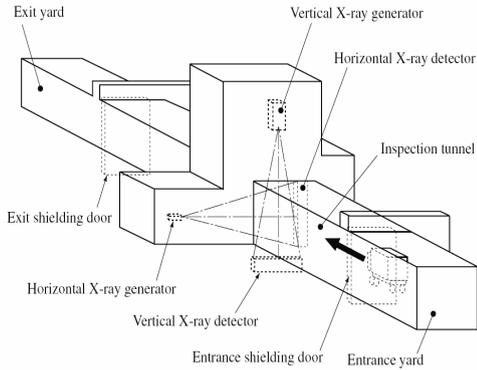
화물검색시스템은 가속기, 검출기, 이송대차, 방사선 안전 및 방호장비, 기타 하드웨어, 소프트웨어 등 컨테이너를 검색하는데 필요한 모든 장비 및 관련 장치와 구조물, 건물 등이 포함된다 [6]. 가속기는 최고 400mm 두께 철판을 투과할 수 있는 9MeV X-ray 빔을 발생, 방출하는 9MeV 전자선형가속기로서 수평 및 수직 양방향으로 모두 2 대가 배치된다. 가속기로부터 방출되는 X-ray 빔의 조사각도는 수평방향 22.75°, 수직방향 16.5°로 설계되어 길이 20m, 폭 2.5m, 최대 높이 4.6m 크기의 컨테이너와 트레일러 차량 전체를 투과하며, 투시대상 컨테이너의 내부위차별 투과력과 분해능의 차이를 최소화할 수 있도록 설계되어 있다. 그림 1은 수직 및 수평 양방향 화물검색시스템의 단면도이다.



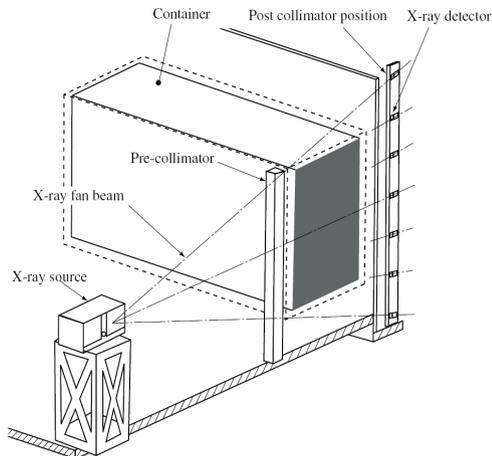
[그림 1] 양방향 화물검색시스템 단면도

컨테이너를 투과한 X-ray는 검출기에서 수집된다. 검출기는 데이터 획득 및 제어장치 등과 연결되어 있으며, 검출기에서 수집된 투과 X-ray는 영상처리 소프트웨어를 통해 처리되어 컨테이너 검색영상으로 재구성된다. 그림 2는 양방향 컨테이너 화물검색시스템의 전체적인 구조에

대한 그림이며, 그림 3은 가속기와 검출기의 배치 형태에 대한 그림이다.



[그림 2] 양방향 화물검색시스템의 구조



[그림 3] 가속기 및 검출기 배치형태

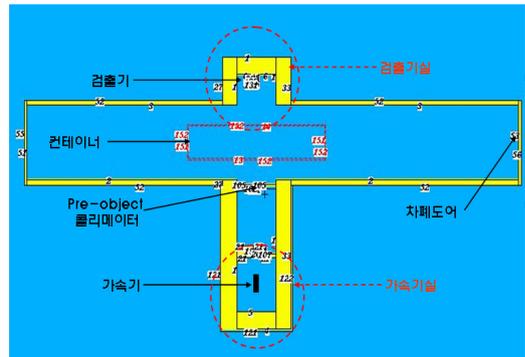
4. 몬테카를로 시뮬레이션

MCNPX(Monte Carlo N-Particle eXtended) 전산해석 코드는 미국 Los Alamos 연구소에서 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용하여 개발한 3차원 방사선 수송 해석 전산코드로서, 3개(전자, 광자, 중성자)의 입자만을 모사할 수 있는 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 전산해석 코드를 최대 34개의 입자들(양성자, 양전자, 알파입자 등 추가)을 고에너지 영역까지 모사할 수 있도록 적용범위를 확대하여 개발된 전산해석 코드이다 [7,8].

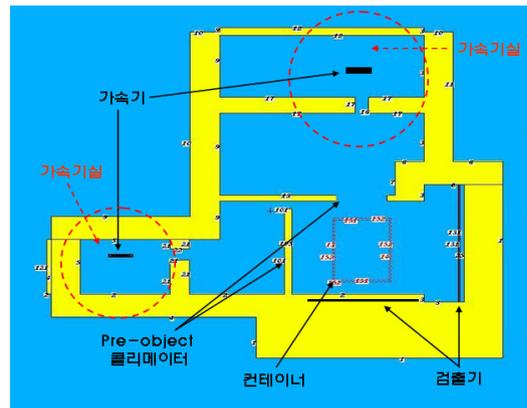
MCNPX2.5.0 전산해석 코드 계산은 서울대학교 중앙전산원에 구축되어 있는 Power PC970 2.2 GHz 2-way Supercomputer 하드웨어, SuSe Linux Enterprise Server 9

for ppc64/kernel 2.6.5-7.139 소프트웨어, GNU 컴파일러 (gcc, g77, g++) IBM XLC 7.0, XLF 9.1 컴파일러 환경에서 수행하였다.

MCNPX2.5.0 코드를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하기 위한 화물검색시스템에 대한 모델링은 그림 4 및 그림 5와 같다.



[그림 4] 평면도



[그림 5] 단면도

5. 결과 및 분석

5.1 방사화생성물

본 논문에서는 X-ray 빔이 통과하는 경로인 가속기와 콜리메이터 및 차폐벽에서 주로 생성되는 광중성자가 가속기 주변 차폐벽과 반응할 때 발생하는 방사화생성물을 계산하였다. 콘크리트 표면 및 내부에서 발생하는 방사화생성물 종류와 방사능 양은 표 1과 같다 [9, 10]. 이들은 고유의 붕괴 과정을 통해 여러 종류의 붕괴 방사선들을 방출하며, 이러한 붕괴 방사선들은 작업종사자에게 불필요한 방사선 피폭을 야기할 수 있다.

[표 1] 화물검색시설 내 방사화생성물

방사화 생성물	반감기	방사능 (Ci)		
		1년 운전 후	3년 운전 후	상대오차
³ H	12.346 Y	2.85E-12	7.52E-12	0.05
¹⁹ O	27.1 S	2.03E-08	2.03E-08	0.04
²⁴ Na	15.02 H	6.18E-04	6.18E-04	0.04
^{24m} Na	0.02 S	1.44E-03	1.44E-03	0.05
²⁷ Mg	9.46 M	7.54E-04	7.54E-04	0.05
²⁸ Al	2.24 M	4.29E-03	4.29E-03	0.05
³¹ Si	157.3 M	9.16E-04	9.16E-04	0.05
⁴¹ Ca	1.03E5 Y	1.58E-03	4.50E-03	0.05
⁴⁵ Ca	163.8 D	6.78E-05	9.28E-05	0.04
⁴⁷ Ca	4.535 D	1.86E-06	1.86E-06	0.05
⁴⁹ Ca	8.72 M	9.28E-06	9.28E-06	0.04
⁵⁵ Fe	2.73 Y	4.98E-04	9.64E-04	0.05
⁵⁹ Fe	44.5 D	4.25E-05	4.82E-05	0.05

표 1에 제시된 수치는 가속기 주변 차폐벽 내에 존재하는 핵종별 방사능 수치이다. 표 1의 가장 마지막 열에는 이 방사능 수치에 대한 통계적 오차가 제시되어 있는데, 이는 MCNPX 시뮬레이션의 결과물에서 기본적으로 제공되는 “상대오차” 값으로서 일반적으로 이 값이 0.1 이하가 되어야 계산 결과를 신뢰할 수 있다. 이러한 방사화생성물 재고량 평가 결과는 그 자체로도 의미를 가지나, 본 논문의 주요 목적 중 하나로서 이후 수행되는 방사화생성물에 의한 방사선량률 계산에 이용된다.

표 1에 제시된 방사화생성물의 반감기에 따라서 포화상태에 도달하는 시간은 서로 다르나, 보수적인 방사선량률 계산을 위해서는 충분히 포화상태에 이른 결과가 요구된다. ³H, ⁴¹Ca, ⁴⁵Ca, ⁵⁵Fe, ⁵⁹Fe 등 5개 핵종을 제외한 대부분의 방사성핵종들은 검색시설 운전 후 1년이 경과하면 그 방사능이 포화상태에 이른다. 이 들 5개 핵종들 중 ⁴⁵Ca, ⁵⁹Fe 등 2개 핵종은 운전 후 3년이 경과하면 방사능이 포화상태에 이르며, 나머지 3개 핵종은 반감기가 매우 긴 핵종들로서 포화상태에 도달하기에 시간이 많이 요구되나 방사선 피폭에 기여하는 바가 없거나 또는 매우 적기 때문에 포화 도달 여부가 중요하지는 않다.

따라서 본 논문에서는 이후 진행될 방사선량률 계산을 위해서는 3년 운전 후 누적된 방사능을 기초로 평가 및 분석을 수행하였다.

5.2 방사선량률

국제 방사선 방호 위원회(ICRP, International Commission on Radiological Protection)는 작업종사자에 대한 선량제

한치를 20mSv/yr로 정하고 있으며, 이를 연간 작업시간 2,000을 가정하여 환산하면 10 μ Sv/hr의 방사선량률 제한치를 구할 수 있다 [11]. 본 연구에서 계산된 방사화생성물 재고량을 기초로 가속기실 중앙에서 평가된 작업종사자 방사선량률은 0.97 μ Sv/hr로서, ICRP의 제한치는 넘지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이는 결코 낮은 수치의 방사선량률은 아니며 작업종사자 피폭선량을 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)로 유지하기 위해서는 피폭 저감 방안이 강구될 필요가 있다.

6. 결론

1. 운전 정지 직후 가속기실 내에서의 방사선량률은 주로 ²⁴Na, ²⁷Mg, ²⁸Al 등의 방사성핵종에 기인하며, 불필요한 작업종사자 피폭을 방지하기 위해 운전 정지 직후에는 가속기실 출입 및 작업을 금지하는 것이 바람직하다. ²⁴Na, ²⁷Mg, ²⁸Al 핵종에 의한 방사선량률은 각각 0.18 μ Sv/hr, 0.09Sv/hr, 0.54 μ Sv/hr이다.
2. 중대사고 등이 발생하여 불가피하게 가속기실에 출입해야 할 경우에는 적절한 차폐가 필요하며 최대한 짧은 시간 동안에 작업을 종료할 필요가 있다.
3. 운전 정지 1 시간 정도가 경과하면 가속기실 내에서의 방사선량률은 크게 감소하는데 이는 주로 ²⁷Mg, ²⁸Al과 같이 반감기가 짧은 방사성핵종들이 붕괴하여 그 양이 크게 감소한 것에 기인한다. 그러나 ²⁴Na 방사성핵종들에 의한 방사선량률은 여전히 높은 수준을 유지하고 있으므로 이에 대한 대비책이 요구된다.

참고문헌

- [1] F. Jallu, A. Lyoussi, E. Payan, H. Recroix, A. Mariani, G. Nurdin, A. Buisson and J. Allano, "Photoneutron Production in Tungsten, Praseodim, Copper and Beryllium by Using High Energy Electron Linear Accelerator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 155, pp. 373-381, 1999.
- [2] D. J. Hughes, "Pile Neutron Research", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1953.
- [3] Richard E. Faw and J. Kenneth Shultis, "Radiological Assessment: Sources and Doses", American Nuclear

- Society, Inc., 1999.
- [4] Harold Elford Johns and John Robert Cunningham, "The Physics of Radiology", Charles C Thomas Publisher, 1983.
 - [5] James E. Turner, "Atoms, Radiation, and Radiation Protection", John Wiley & Sons, Inc., 1995.
 - [6] Posdata Co. Ltd., "Technical Specifications of Container Inspection System", 2005.
 - [7] Pelowitz, D. B., "MCNPXTM user's manual version 2.5.0", LA-CP-05-0369, 2005.
 - [8] Hendricks, J. S., "MCNPX extensions version 2.5.0", LAUR-05-2672, 2005.
 - [9] IAEA, "Handbook on Nuclear Activation Data", Technical Report Series No.273, STI/DOC/10/273, 1987.
 - [10] ICRP, "Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions", ICRP Publication 38, Pergamon Press, 1983.
 - [11] ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60, Pergamon Press, 1990.

조 영 호(Young Ho Cho)

[정회원]



- 1997년 2월 : 서울대학교 공과대 학원 원자핵공학과 (원자력석사)
- 2006년 8월 : 서울대학교 공과대 학원 원자핵공학과 (원자력박사)
- 2004년 7월 ~ 2006년 4월 : 포스데이터(주) 선임연구원
- 2006년 4월 ~ 2008년 8월 : 전략물자관리원 조사연구팀장
- 2008년 9월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 방사선학과 교수

<관심분야>

방사선안전 및 방호, 원자력정책