

몬테카를로 코드를 이용한 고에너지 전자가속기의 중성자 skyshine 평가방법 개발

오주희^{*.†}, 정남석^{*}, 이희석^{*}, 고승국[†]

^{*}포항가속기연구소, [†]울산대학교 물리학과

2013년 2월 25일 접수 / 2013년 3월 16일 1차 수정 / 2013년 3월 18일 채택

Skyshine은 고에너지 가속기의 차폐 설계 시 반드시 고려되는 중요한 현상이다. 본 연구에서는 고에너지 전자 가속기에 대한 중성자 skyshine 평가 방법을 새롭게 제시하였으며 기존의 방법들과 비교하여 타당성을 검증하였다. 고에너지 전자가속기로부터 원거리 지역의 방사선량을 계산하기 위해 몬테카를로 코드, FLUKA와 PHITS를 이용하였다. 가속기 건물로부터 원거리 지역까지 도달하는 방사선장의 경로를 skyshine, direct, groundshine, multiple-shine으로 분류하였다. 분류된 각각의 성분이 총 유효선량에 기여하는 정도를 평가하였다. 방사선원 계산에는 10 GeV 전자가 두꺼운 표적에 입사하여 생성되는 중성자를 고려하였다. Groundshine 효과를 평가하기 위해 PAL-XFEL의 건설부지도양에 대한 성분을 고려하였다. 가속기 건물로부터 비교적 가까운 50 m 미만에서는 direct와 groundshine 성분들이 총 유효선량에 대부분 기여하였다. 가속기 터널로부터 거리가 멀어질수록 skyshine 성분의 기여도가 증가하였다. 평가된 skyshine 성분에 대한 유효선량은 기존에 skyshine 선량을 계산할 때 사용되었던 반실험식 중 전자가속기를 이용한 실험결과에 기반한 Rindi의 식과 가장 잘 일치하였다. 간이계산코드 SHINE3의 결과와 20% 이내로 일치하였다. 모든 성분이 포함된 총 유효선량은 기존의 평가방식에 비해 10배 정도 크게 평가되었다. 가속기 터널로부터 원거리 지역에 대한 선량평가계산에서 mutiple-shine 성분의 영향은 skyshine 성분보다 더 크다는 것을 확인하였다.

중심어: Skyshine, 중성자, 고에너지 전자가속기, PAL-XFEL, PHITS, FLUKA, SHINE3

1. 서론

Skyshine은 고에너지 가속기 터널의 누설 방사선이 대기 중의 공기분자와 충돌하여 후방산란에 의해 지상에 쏟아져 내리는 것을 말한다. 그 중 중성자 skyshine이 원거리 지역의 방사선량에 주로 기여하는 것으로 알려져 있다 [1,2]. 기존의 중성자 skyshine 평가방법들은 반실험식 [2-4]이나 간이계산코드[5]를 이용한 방식이다. 반실험식은 특정 가속기 시설에 대해 몇 가지 변수, 빌드업(build up factor)이나 공기 중 유효흡수길이 등을 이용했으며, 대부분이 양성자 가속기에 대한 실험결과를 기반으로 만들어졌다[2,4]. 간이계산코드의 경우 SHINE3가 있다. SHINE3코드는 PHITS [6]코드를 이용하여 가속된 양성자가 두꺼운 표적에 충돌하여 생성된 고에너지 중성자와 2차 광자의 skyshine 선량에 대해 4-parameter 근사식[7]을 적용하여 만들어졌다. 이러한 기존의 평가방법들은 특정 가속기 시설 결과로부터 만들어졌기 때문에 다른 고에너지 가속기, 특히 전자가속기에 적용하여 원거리 지역의 방사선량을 평가하기에는 한계가 존재한다. 포항가속기연구소에서는 10 GeV 전자빔을 이용한 4세대 방사광원

(Pohang Accelerator Laboratory X-ray Free Electron Laser, 이하 PAL-XFEL)의 건설을 추진 중이다. 본 연구에서는 이러한 고에너지 전자가속기에 적용 가능한 중성자 skyshine 평가방법을 개발하였으며, 몬테카를로 코드인 FLUKA[8]와 PHITS를 이용하였다. 본 평가방법은 거리 증가에 따른 총 유효선량에 기여하는 성분을 방사선장의 경로에 따라 분류하여 그 정도를 평가할 수 있다. 몬테카를로 계산에는 PAL-XFEL의 전자가속기 터널구조 및 실제 건설 부지의 토양 분석자료[9]를 바탕으로 만들어진 토양 성분을 반영하였다. 고에너지 중성자를 고려한 선량환산 인자를 적용하여 유효선량을 계산하였으며, 평가된 유효선량은 기존 연구들을 이용하여 평가한 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 반실험식의 계산에 적용한 중성자 선원량은 APS의 계산식[10]을 이용하였다. SHINE3의 입력 중성자 선원은 PHITS 코드를 이용해 계산한 터널 지붕에서의 스펙트럼 결과를 적용하였다.

2. 계산 방법

2.1 FLUKA 코드를 이용한 터널 내 중성자 계산

고에너지 전자가속기 터널 내에서의 중성자 생성분포

교신저자 : 이희석, lee@postech.ac.kr

경북 포항시 남구 지곡로 127번길 80 포항가속기연구소

를 계산하였다. 두꺼운 구리표적에 10 GeV 전자가 충돌할 때 발생하는 제동복사선의 광핵반응에 의해 중성자가 생성된다. 본 연구에 사용한 PHITS 2.15 코드에서는 광핵반응에 대한 계산이 구현되지 않는다. 따라서 구리표적으로부터 중성자 생성량을 계산하기 위해 FLUKA 코드의 USRYIELD tally를 이용하였다. 전자빔은 직경 0.5 cm의 평행 빔이다. 반지름 5.08 cm, 길이 25.4 cm인 두꺼운 구리표적(밀도 8.96 g cm⁻³)에 입사하는 경우를 가정하고, 이 때 전자빔의 진행방향으로부터 전방 0-5°, 30°, 60°, 90°, 후방 120°로 5개의 각도에 대한 중성자 생성량을 계산하였으며, 0° 방향을 제외한 나머지 각도는 ±0.5°의 범위를 가진다. 그림 1에 계산에 이용된 구조를 나타내었다.

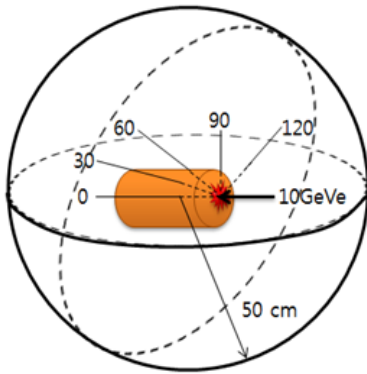


Fig. 1. Geometry of FLUKA input for the calculation of differential neutron yields from a thick Cu target.

2.2 PHITS 코드를 이용한 원거리지역에 도달하는 중성자 및 2차 광자 계산

FLUKA 코드로 계산된 터널 내 각도별 중성자 생성량 중에서 선원으로부터 수직면상의 skyshine 방사선량평가에 실제로 기여하고, 빔 진행방향에서 60°, 90°, 120°로 방출되는 경우를 PHITS 코드의 선원향으로 정의하였다. PHITS 코드를 이용하여 가속기 건물로부터 원거리까지 도달하는 중성자와 2차 광자의 플루언스를 T-track tally

를 이용하여 계산하였다. 20 MeV 이하 중성자에 대해서 Jendl-3.2[11] 라이브러리를, 20 MeV 이상에서는 JQMD (Jaeri Quantum Molecular Dynamics) 모델[12]을 적용하였다. 원거리까지 도달하는 방사선장의 경로를 skyshine, direct, groundshine, multiple-shine 등으로 그림 2와 같이 구분하였으며, 구분된 각 성분이 총 유효선량에 기여하는 정도와 특성을 분석하였다. 그림 3(a)에서 가속기 터널 내 선원은 터널의 중앙에 위치하며, 터널의 바닥으로부터 80 cm 높이에 위치한다. 가속기 터널의 구조는 몬테카를로 계산 속도를 높이기 위하여 선원으로부터 대칭인 구조를 설정하였고, 터널의 크기는 7×7×4 m³이다. 터널의 차폐체는 콘크리트이며, 바닥, 천정, 벽의 두께는 각각 2 m로 하였다. 콘크리트의 밀도는 일반적으로 사용되는 차폐용 콘크리트의 밀도보다 다소 낮은 값인 2.2 g cm⁻³를 계산에 사용하였다. PAL-XFEL 건설현장의 실제토양은 밀도가 1.83 g cm⁻³이고 두께는 터널바닥 두께와 같은 2 m로 설정하였다. 공기층의 높이는 가속기 터

Table 1. Compositions of Issued Materials in atoms cm⁻³.

Element	Air	Concrete	PAL-XFEL Soil
H		1.34×10 ²²	2.95×10 ²²
N	4.06×10 ¹⁹		
C		1.10×10 ²¹	2.53×10 ²⁰
O	1.08×10 ¹⁹	4.39×10 ²²	4.08×10 ²²
Mg			3.66×10 ¹⁹
Al		1.80×10 ²¹	2.99×10 ²¹
Si		1.61×10 ²²	9.85×10 ²¹
Ar	2.43×10 ¹⁷		
K			6.85×10 ²⁰
Ca		1.89×10 ²¹	7.87×10 ²⁰
Fe		3.34×10 ²⁰	
Mass density ρ (g cm ⁻³)	1.25×10 ⁻³	2.2	1.83

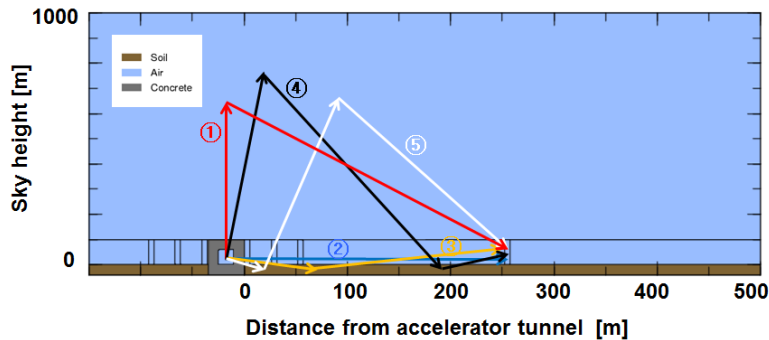


Fig. 2. Classification of transport paths of secondary neutrons and photons from accelerator tunnel: ①-Skyshine, ②-Direct, ③-Groundshine, ④&⑤-Multiple-shine.

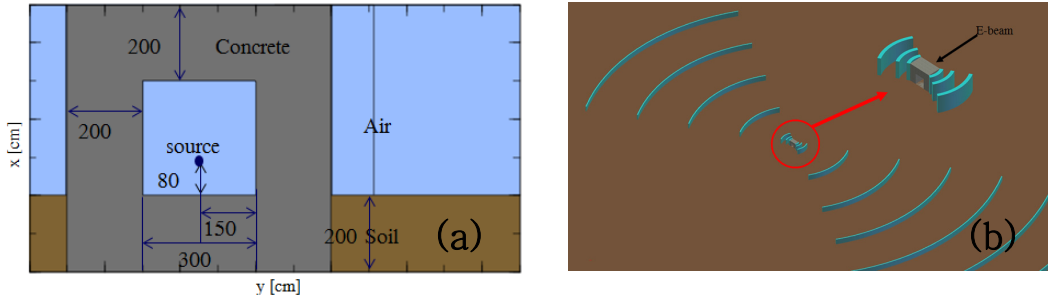


Fig. 3. Simulation geometry of PHITS 2.15 for the fluence calculation of secondary neutrons and photons from outer surface of accelerator tunnel to at a distance of 500 m: (a) cross-sectional view (b) 3 dimensional view.

널 바닥으로부터 1 km로 설정하였으며, 공기의 밀도는 $1.25 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ 이다. 계산에 적용된 각 물질의 성분은 표 1에 나타내었다. 검출기는 그림 3(b)와 같이 반지름 방향의 두께는 1 m, 지표면으로부터 높이가 5 m인 호 형태의 육면체로 가속기 터널로부터 방사형으로 배치하였다. 가속기 터널로부터 원거리에 도달하는 중성자와 2차 광자는 가속기 터널의 외부 벽면으로부터 양쪽으로 0, 5, 10, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500 m 까지 계산하였다.

3. 결과

3.1 터널 내 두꺼운 표적으로부터 생성된 중성자

10 GeV 에너지의 전자빔이 터널 중심에 있는 25.4 cm 두께의 구리표적에 입사할 때 생성된 중성자의 각도별 에너지 스펙트럼을 그림 4에 나타내었다. 계산된 중성자의 경우, 대부분의 에너지는 0.5 ~ 2 MeV 범위에 해당하며, 2 MeV 이상의 중성자는 전체의 18%이다. 그 중 10 MeV 이상의 고에너지 중성자는 2% 미만이다. 최대 500 MeV 에너지까지 중성자 생성률을 계산하였다. 고에너지 중성

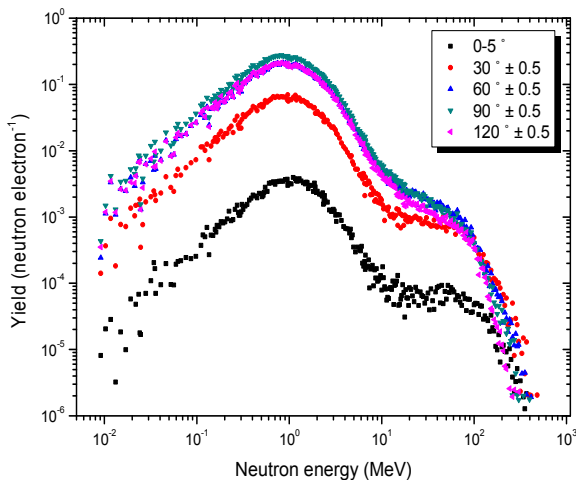


Fig. 4. Neutron yields produced with different emission angles from thick Cu target irradiated by 10 GeV electron beam in an accelerator tunnel (calculated using the FLUKA code).

자의 비율이 낮기는 하지만, 실제 skyshine에 기여하는 것은 10 MeV 이상의 고에너지 중성자이다[5]. 두꺼운 콘크리트를 통과하여 지붕으로 방출되는 최대 중성자 에너지는 200 MeV 정도로 계산되었다.

3.2 가속기 터널로부터 외부로 방출된 중성자

그림 5는 가속기 터널로부터 원거리지역까지 도달하는 방사선의 경로를 skyshine, direct, groundshine, multiple-shine 성분으로 분류하여 500 m까지 도달하는 중성자 플루언스를 계산한 결과를 나타낸 것이다. Skyshine 성분은 다른 성분들에 비해 거리가 멀어져도 중성자 에너지에 따른 감쇠정도 차이가 가장 적다. Direct 성분의 경우 거리가 멀어질수록 고에너지 중성자는 열중성자에 비해 감쇠정도가 적으며, 두 에너지 영역의 감쇠정도의 차이는 가장 큰 것을 확인 할 수 있다. Groundshine 성분은 근거리에서는 다른 성분에 비해 플루언스가 가장 크게 나타났고, 거리에 따라 가장 크게 감쇠하는 것으로 나타났다. Multiple-shine 성분은 거리에 따른 스펙트럼의 개형 변화가 가장 적으며 50 m 이상의 중성자 스펙트럼이 전체 스펙트럼의 개형과 가장 비슷했다. 각 성분 별 그리고 전체 중성자 스펙트럼에서 열중성자 영역은 터널의 두꺼운 차폐체 그리고 공기 및 토양에 의해 감속된 중성자이며, 거리가 멀어질수록 플루언스는 점차 감소한다.

3.3 성분별 방사선량 평가 및 검증

원거리지역에서 2차 광자에 의한 방사선량은 상대적으로 중성자에 의한 것보다 작았다. 따라서 원거리 지역에서의 연간유효선량은 중성자에 의한 것만 고려하였는데 각 위치에서의 중성자 플루언스는 앞에서 언급한 것과 같이 PHITS코드를 이용하여 계산하였으며 Sakamoto[13]의 선량환산인자를 적용하여 식(1)의 방법으로 계산하였다.

$$E = a b T \sum_{i=1}^n (\phi_i \cdot DCF_i) \quad (1)$$

여기서,

E : 연간유효선량 [mSv y^{-1}]

a : 가동되는 전자빔의 단위 초당 전자 수 [$e s^{-1}$]

T : 연간 운전시간 [$s y^{-1}$]

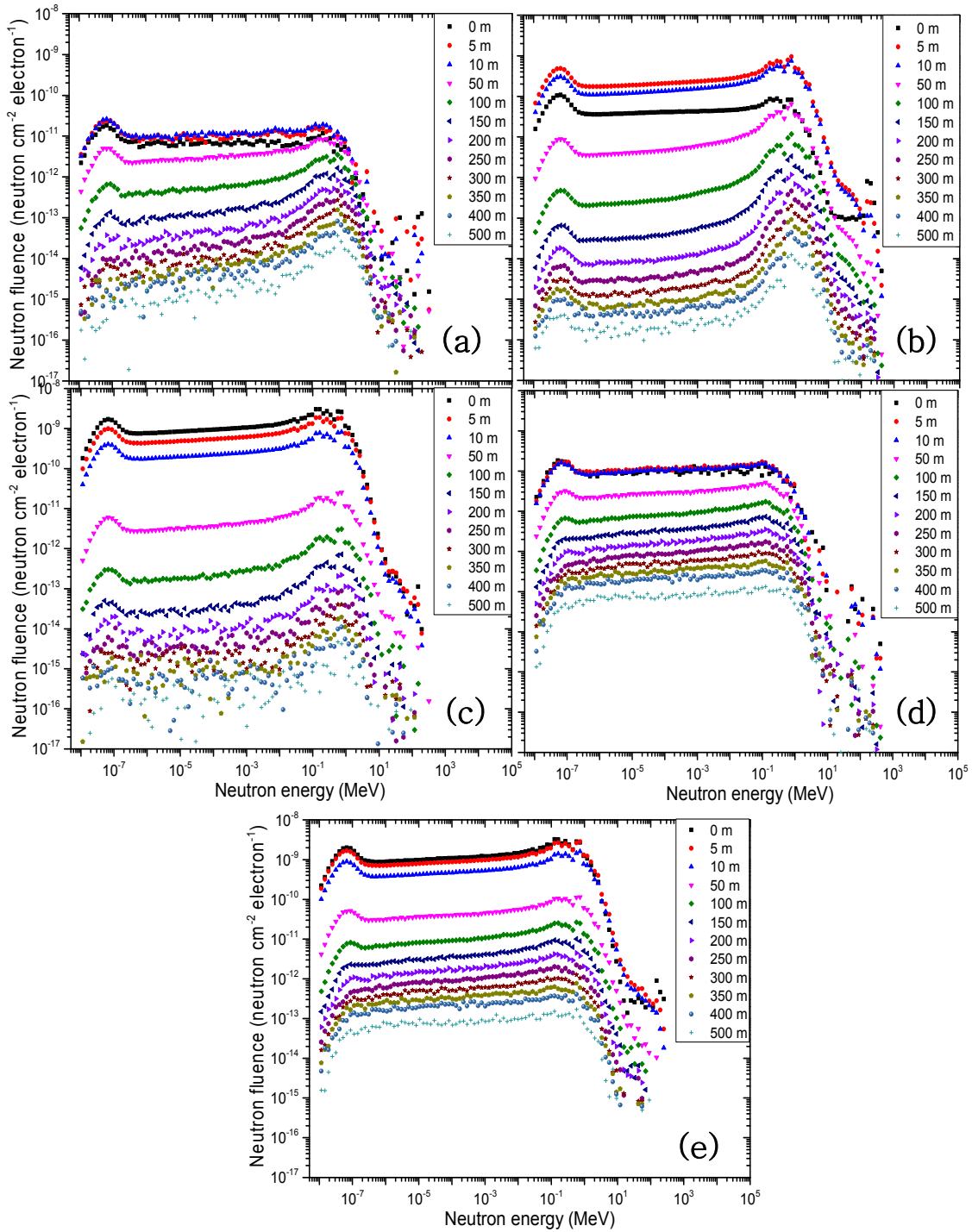


Fig. 5. Distribution of differential neutron fluence at different distances from an accelerator tunnel through each transport path: (a) skyshine (b) direct (c) groundshine (d) multiple-shine, and (e) all paths (calculated using the PHITS code).

n : 에너지 bin의 수
 b : 전자빔의 손실률 [%]
 ϕ_i : i 번째 에너지 bin에서 전자당 중성자 플루언스
 [n cm⁻² e⁻¹]
 DCF_i : i 번째 에너지 bin에서 선량환산인자
 [μ Sv cm²]
 이다.

계산된 연간 유효선량은 그림 6과 같으며 이 계산에서는 PAL-XFEL의 예상 운전 조건을 참고하여 연간 운전시간을 6000시간으로 가정할 때, 가동되는 전자빔의 단위 초당 전자 수는 7.49×10^{10} 개이고 정상 운전 조건에서 0.1%의 빔 손실이 발생한다고 가정하였다. 고에너지 중성자를 고려한 선량환산인자는 Sakamoto와 Pelliccioni [14]의 값을 검토하였는데 Sakamoto의 자료가 Pelliccioni의 자료에 비해 상대적으로 조밀한 에너지 간격의 값을

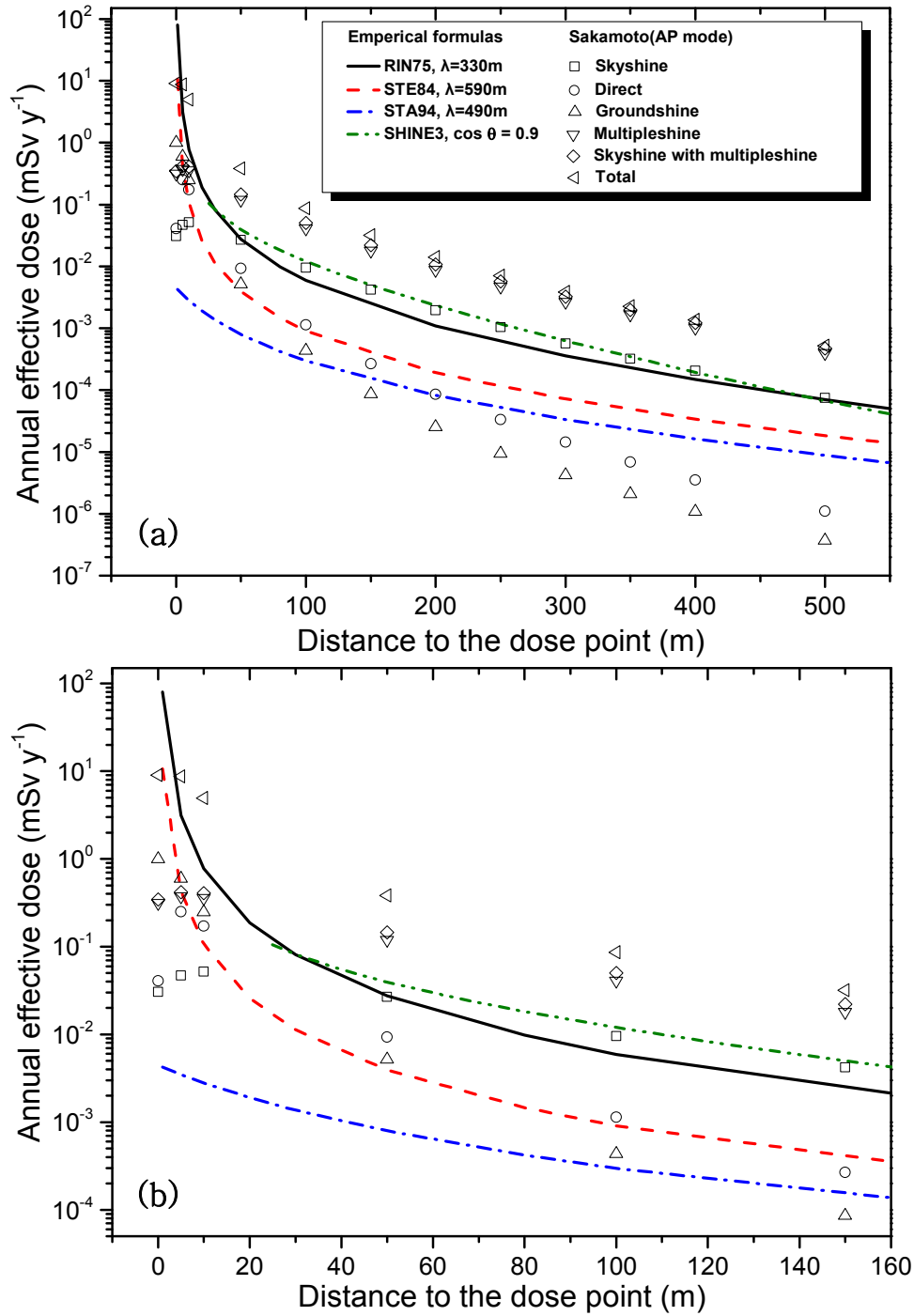


Fig. 6. Comparison of neutron effective doses as a function of distance from tunnel using Sakamoto's dose conversion factor [13] with the doses calculated using various empirical formulas. The effective neutron absorption length, λ , in air was 330 m for RIN75 [2], 590 m for STE84 [3], and 490 m for STA94 [4].

제시하기 때문에 본 연구에서는 Sakamoto의 AP모드 (Anterior-Posterior)에 해당하는 선량환산인자를 사용하였다. 선량환산인자의 영향이 큰 에너지 영역은 0.1 MeV 이상이고, 두 선량환산인자 적용에 따른 연간 유효선량의 차이는 10% 이내이다. 총 유효선량은 기존의 평가방식에 비해 10배 정도 높게 평가되었다. 이것은 계산에서 콘크리트 터널의 밀도를 일반적인 차폐 콘크리트 밀도보다 다소 적은 값을 적용한 것과 및 공기와 토양과의 다중산란

을 나타낸 성분인 multiple-shine의 총 유효선량에 대한 기여도가 가장 높은 것 때문이라고 판단된다. 총 유효선량에 대한 2차 광자의 비율은 1% 이하이기 때문에 2차 광자의 효과는 무시하였다. Skyshine 유효선량은 반실험식 중에서 독일 DESY의 4 GeV 전자빔 실험 결과[15]를 이용한 Rindi [3]의 식 결과와 가장 잘 일치하였으며, 양성자 가속기 실험 결과를 이용한 Stapleton [2]과 Stevenson [4]의 식들에 비해 다소 크게 평가되었다. 기존

의 반실험식과의 비교 시 공기 중 유효흡수길이, λ 값을 적용할 때 입사빔과 중성자 선원의 에너지 등을 고려한 타당한 값을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 공기 중 유효흡수길이, λ 는 Rindi식의 경우 문헌상에 제시한 값을 적용하였으며, Stevenson과 Stapleton 식의 경우 PHITS로 계산된 외부방출 중성자 에너지를 고려하여 결정하였다. PAL-XFEL 가속기 터널의 지붕으로 방출되는 중성자를 적용한 SHINE3의 결과와는 20% 미만으로 일치하였다. 그림 6(b)에서 근거리의 유효선량에 주로 기여하는 것은 direct 성분과 groundshine 성분이다. Groundshine 성분이 큰 이유는 토양이 공기보다 밀도가 더 커서 중성자 산란이 더 많이 일어나기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 몬테카를로 코드를 이용하여 고에너지 전자가속기 터널로부터 원거리 지역의 방사선량 평가에서 skyshine 효과를 포함한 각각의 전파 경로에 따른 영향을 평가하였다. 방사선량 평가를 위해 가속기 터널로부터 원거리지역에 도달하는 방사선장의 경로를 skyshine, direct, groundshine, multiple-shine 성분으로 분류하였으며, 각 성분이 총 유효선량에 미치는 영향을 평가하였다. 가속기 터널로부터 50 m 정도의 가까운 지역에서는 direct와 groundshine 성분이 총 유효선량에 절반 정도를 차지하며 그 효과는 거리가 멀어질수록 급격히 줄어든다. 상대적으로 가속기 터널로부터 거리가 멀어질수록 skyshine 성분과 multiple-shine 성분은 총 유효선량에 기여하는 정도가 크다는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 multiple-shine 성분이 근거리를 제외한 모든 영역에서 총 유효선량에 대부분을 차지하는 것을 확인하였다. 따라서 가속기 건물로부터 원거리 지역에 대한 선량 평가계산 시 multiple-shine 성분은 공기와의 산란만을 나타낸 skyshine 성분과 함께 중요하게 고려되어야한다. Skyshine 성분은 기존의 중성자 skyshine 반실험식과의 비교에서 Rindi의 식 결과와 가장 잘 일치한다. Rindi의 식은 전자가속기의 실험결과를 기반으로 하고 있기 때문에 본 연구의 결과가 의미가 있다고 판단된다. 반면에 공기 및 토양과의 다중 산란이 고려된 총 유효선량은 기존의 평가방법들에 비해 10배 정도 높게 평가되었다. 이것은 가속기 터널에 사용되는 밀도 2.3 g cm^{-3} 이상의 콘크리트를 적용한다면 줄어 들 것으로 판단된다. 이러한 총 유효선량의 경향에 대해 참고하여 콘크리트와 토양의 밀도 효과에 대한 중성자 skyshine 선량 평가에 대한 추가 연구가 필요하며, 전자 가속기에 대한 중성자 선량 측정실험결과와 비교를 통해 skyshine에 의한 방사선량 평가방법이 검증되어야한다.

참고문헌

1. Jenkins TM, Accelerator boundary doses and skyshine. Health phys. 1974;27(3):241.
2. Stapleton GB, O'brien K, Thomas RH, Accelerator skyshine: tyger, tyger, burning bright. Particle

- Accelerators. 1994;44(1): 1-15.
3. Rindi A, Thomas RH, Skyshine-a paper tiger. part Accel. 1975;7:23-39.
4. Stevenson GR, Thomas RH, A simple procedure for the estimation of neutron skyshine from proton accelerators. Health Phys. 1984;42:115-122.
5. Masukawa F, Abe T, Hayashi K, Handa H, Nakashima H, Development of SHINE3, simple code for high-energy neutron skyshine dose evaluation. JAEA. Data. Code. 2006:103P.
6. Iwase H, Nitta K, Nakamura T, Development of general-purpose particle and heavy ion transport monte carlo code. J. Nucl. Sci. Technol. 2002; 39:1442.
7. Harima Y, Hirayama H, Sakamoto Y, Shimizu A, A simplified method of gamma-ray skyshine calculations. Proc. of ICRS8. 1994:939.
8. Ferrari A, Sala PR, Fasso A, Ranft J, FLUKA: a multi-particle transport code. CERN- 2005-10. CERN. 2005.
9. Soil Survey of Site Report for 4th Generation Light Source Construction Design. PAL- XFEL. Pohang Accelerator Laboratory. 2011.
10. Moe HJ, Advanced photon source: radiological design considerations. APS-LS-141. Argonne national laboratory. 1991.
11. Nakagawa T, Shibata K, Chiba S, Fukahori T, Nakajima Y, Kikuchi Y, Kawano T, Kanda Y, Ohsawa T, Matsunobu H, Kawai M, Zukeran A, Watanabe T, Igarasi S, Kosako K, Asami T, Japanese evaluated nuclear data library, version 3 revision-2; JENDL-3.2. J. Nucl. Sci. Technol. 1995;32:1259.
12. Niita K, Chiba S, Maruyama T, Maruyama T, Takada H, Fukahori T, Nakahara Y, Iwamoto A, Analysis of the (N,xN') reactions by quantum molecular dynamics plus statistical decay model. Phys Rev. C. 1995;52:2620.
13. Sakamoto Y, Dose conversion coefficients in the shielding design calculation for high energy proton accelerator facilities. JAERI- Tech. 2001;42.
14. Pelliccioni M, Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the Fluka code. Radiat. Prot. Dosim. 2000;88:279-297.
15. Bathow G, Clausen V, Freytag E, Tesch K, Skyshine-Messungen und ihr Vergleich mit Abschätzungen, aus der diffionstherorie. Nucleoni. 1967;9:14.

Development of Neutron Skyshine Evaluation Method for High Energy Electron Accelerator Using Monte Carlo Code

Joo-Hee Oh^{*,†}, Nam-Suk Jung^{*}, Hee-Seock Lee^{*}, and Seung-Kook Ko[†]

^{*}Pohang Accelerator Laboratory, [†]Department of Physics, University of Ulsan

Abstract - The skyshine effect is an essential and important phenomenon in the shielding design of the high energy accelerator. In this study, a new estimation method of neutron skyshine was proposed and was verified by comparison with existing methods. The effective dose of secondary neutrons and photons at the locations that was far away from high-energy electron accelerator was calculated using FLUKA and PHITS Monte Carlo code. The transport paths of secondary radiations to reach a long distance were classified as skyshine, direct, groundshine and multiple-shine. The contribution of each classified component to the total effective dose was evaluated. The neutrons produced from the thick copper target irradiated by 10 GeV electron beam was applied as a source term of this transport. In order to evaluate a groundshine effect, the composition of soil on the PAL-XFEL site was considered. At a relatively short distance less than 50 m from the accelerator tunnel, the direct and groundshine components mostly contributed to the total effective dose. The skyshine component was important at a long distance. The evaluated dose of neutron skyshine agreed better with the results using Rindi's formula, which was based on the experimental results at high energy electron accelerator. That also agreed with the estimated dose using the simple evaluation code, SHINE3, within about 20%. The total effective dose, including all components, was 10 times larger than the estimated doses using other methods for this comparison. The influence of multiple-shine path in this evaluation of the estimation method was investigated to be bigger than one of pure skyshine path.

Keywords: Skyshine, Neutron, High-energy electron accelerator, PAL-XFEL, PHITS, FLUKA, SHINE3