

생태계 방사능 위해도 평가를 위한
국내 참조동식물 내외부 선량환산인자

Internal and external dose conversion coefficient for domestic
reference animals and plant

KAERI

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하,

본 보고서를 2009년도 "신개념 생태계 방사능 위해도 평가 기술 개발" 과제의 일환으로 수행된 기술보고서로 제출합니다.

2009. 7



과제명: 신개념 생태계 방사능 위해도
평가기술개발

주저자: 금동권

부저자: 임광목, 전인, 박두원, 최용호

요 약

비인간종에 대한 환경방사선의 방사선적 영향 평가를 위한 필수 구성요소인 참조동식물의 내외부선량환산인자를 본 보고서에서 제시한다. 내부선량환산인자는 isotropic 모델을, 외부선량환산인자는 불균일 환경 미디움에서 photon 이동 모사를 위하여 몬테칼로법을 각각 적용하여 구하였다. 모델링을 위하여 모든 참조동식물은 3차원 타원체로 가정되었다. 외부선량환산인자 계산을 위해 수중 동물에 대해서는 무한크기의 오염된 물이, 땅위에 사는 지상동물의 경우는 무한크기의 오염토양, 땅속에 사는 지중동물의 경우는 수평방향으로 무한크기의 토양 속 깊이 50cm까지 오염된 토양이 외부 방사선원으로 가정되었다. 8개 종류위 국내 참조동식물(쥐, 노루, 개구리, 뱀, 버들치, 벌, 지렁이, 소나무)에 대한 내외부선량환산인자가 경주 방사성폐기물 처분장 환경방사선 모니터링 대상 25개 핵종 (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{40}K , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{131}I , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{144}Ce , ^{238}U , ^{239}Pu , and ^{240}Pu)에 대해 계산되었다.

내부선량환산인자는 참조동식물과 핵종에 따라 10^{-6} - 10^{-2} (μGyd^{-1} per Bqkg^{-1})범위에 있었다. 내부선량환산인자는 ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu 와 같은 알파핵종 또는 노루나 소나무와 같이 크기가 큰 참조동식물에 대해 크게 나타났다. 핵종 중 ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{238}U , ^{14}C , ^3H , ^{99}Tc 의 내부선량환산인자는 참조동식물의 종류와 상관없이 동일한 값을 보여 주었다. 이는 이들 핵종이 낮은 크기의 에너지를 방출하여 참조동식물 내에 모두 흡수되었기 때문이다.

외부선량환산인자는 0 - 0.035 ($\mu\text{Gy/d}$ per Bq/kg)의 범위에 있었다. 고려된 모든 동물에 대해 ^{140}Ba , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{59}Fe , ^{140}La 와 같은 감마 핵종일수록 외부선량환산인자는 크고, ^{14}C , ^3H , ^{129}I , ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{99}Tc , ^{238}U 와 같이 저에너지를 방출하는 핵종에 대해서는 10^{-5} 이하의 매우 작은값을 보여 주었다. 동일한 핵종에 대해 수생 및 지중동물의 외부선량환산인자는 지상동물보다 2-3배 컸다. 이는 수생 및 지중동물의 외부 방사선원이 무한매질로 가정된 반면 지상동물은 반무한매질로 가정되었기 때문이다. 일반적으로 외부선량환산인자는 target의 크기가 클수록 자체차폐효과의 증가로 인해 감소한다. 고려된 동물 중 가장 큰 노루의 외부선량환산인자가 다른 동물에 비해 작게 나타나는 이유가 그 때문이다. 지중동물의 외부선량환산인자는 target 주위의 air pocket 고려하지 지렁이를 제외하고는 그 값의 차이는 없었다.

Summary

This report presents the internal and external dose conversion coefficients for domestic reference animals and plant, which are essential to assess the radiological impact of an environmental radiation on non-human species. To calculate the dose conversion coefficients, a uniform isotropic model and a Monte Carlo method for a photon transport simulation in environmental media with different densities have been applied for aquatic and terrestrial animals, respectively. In the modeling all the target animals are defined as a simple 3D elliptical shape. To specify the external radiation source it is assumed that aquatic animals are fully immersed in infinite and uniformly contaminated water, and the on-soil animals are living on the surface of a horizontally infinite soil source, and the in-soil organisms are living at the center of a horizontally infinite and uniformly contaminated soil to a depth of 50cm. A set of internal and external dose conversion coefficients for 8 Korean reference animals and plant (rat, roe-deer, frog, snake, Chinese minnow, bee, earthworm, and pine tree) are presented for 25 radionuclides (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{40}K , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{131}I , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{144}Ce , ^{238}U , ^{239}Pu , and ^{240}Pu).

Internal dose conversion coefficient (μGyd^{-1} per Bqkg^{-1}) ranges from 10^{-6} to 10^{-2} according to radionuclides and organisms. It turns out to be higher for alpha radionuclides such as ^{238}U , ^{239}Pu , and ^{240}Pu and for large organisms such as roe deer and pine tree. While, the internal dose conversion coefficients of ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{238}U , ^{14}C , ^3H and ^{99}Tc are independent of the size of organism.

External dose conversion coefficients are in the range from 0 to 0.035 ($\mu\text{Gy/d}$ per Bq/kg), according to radionuclide and animal. For all the animals considered, the external dose conversion coefficients appear higher for γ emitting radionuclides such as ^{140}Ba , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{59}Fe , and ^{140}La , while the values are extremely small (less than 10^{-5}) for radionuclides that emit a low energy radiation such as ^{14}C , ^3H , ^{129}I , ^{90}Sr ,

^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{99}Tc , and ^{238}U . Low energy radiation emitting from such radionuclides is not strong enough to penetrate effectively into the tissue of the target organism. For the same reason, the radionuclides become a very important contributor in the internal dose rate. For the same radionuclide, the external dose conversion coefficients for aquatic and in-soil animals are almost the same, but they are larger by about a factor of 3 than that for the on-soil animals. This is because the aquatic and in-soil animals are fully immersed in the infinite source, while the on-soil animals are exposed to a semi-infinite source according to the model assumptions. In general, the external exposure rate decreases with the increasing size of target organism due to the pronounced self-shielding effect of a large target organism. It can be seen that the external dose conversion coefficients of roe deer, which is the largest of on-soil animals considered, is lower than that for the smaller animals. For in-soil animals, there is no difference in the external dose conversion coefficient between animals, except for the earthworm that shows a little larger external dose conversion coefficient. This result was attributed to the fact that the earthworm was assumed to be directly contacted with the contaminated soil without considering the air pocket at outside of the target organism in the calculation of the external dose conversion coefficient.

목 차

1. 연구배경 및 국내외 연구동향	1
1-1 연구배경	
1-2 국외연구현황	
1-3 국내연구현황 및 선진국대비 기술수준	
2. 국내 생태 특성	7
2-1 전국 생태 특성	
2-2 경주 처분장 주변 생태 특성	
3. 국내 참조 동식물 도출	9
3-1 참조동식물 개념	
3-2 참조동식물 선정기준	
3-3 국내 참조동식물	
4. 방사능 위해도 평가를 위한 핵종	16
5. 국내 참조 동식물 내외부 선량환산인자	18
5-1 국외 연구 현황	
5-2 선량환산인자	
5-3 국내 참조동식물 선량환산인자	
6. 결 론	48
참고문헌	49

그림 목 차

- 그림 1. 전리방사선에 대한 환경영향 평가도
- 그림 2. 참조 동식물 기하학적 모형 예제
- 그림 3. 에너지별 물에서의 전자의 CSDA (continuous slow down approximation) 및 photon의 mean free path
- 그림 5. 구형에 대한 전자 및 photon의 에너지 흡수율
- 그림 6. 지중동물 (in-soil animals)의 외부 선량환산인자 계산을 위한 MCNP 기하 구조
- 그림 7. 단위 에너지별 지중동물의 외부선량환산인자
- 그림 8. Air kerma를 구하기 위한 MCNP 기하 구조
- 그림 9. MCNP 코드에 의해 구한 에너지별 air-kerma
- 그림 10. r 값을 구하기 위한 MCNP 기하구조
- 그림 11. Photon 방출에너지에 따른 지상동물의 r 값
- 그림 12. Plane 및 volume source 에 대한 지상동물의 에너지별 흡수선량
- 그림 13. 지상동물의 MCNP 기하구조
- 그림 14. 소나무에 대한 선량환산인자
- 그림 15. 국내 참조 동식물 선량환산인자 계산을 위한 컴퓨터코드 K-BIOTA-DCC 구조

표 목 차

- 표 1. 전리방사선에 대한 환경방호 요소기술
- 표 2. 방사선 환경방호 요소기술의 선진국 대비 국내 기술 수준
- 표 3. 우리나라 고유종 현황
- 표 4. ICRP에서 도출한 참조동식물
- 표 5. 각국의 육상생태계 참조동식물 비교
- 표 6. 각국의 수계 참조동식물 비교
- 표 7. 경주 방사성폐기물 주변에 서식하는 주요 육수생 동식물
- 표 8. 참조동식물 기하모형 및 크기
- 표 9. 생태계 방사능 위험도 평가에 적용되는 핵종
- 표 10. 구형에 대한 photon의 에너지 흡수율
- 표 11. 구형에 대한 전자의 에너지 흡수율
- 표 12. MCNP 계산에 적용된 물질의 조성 (%)
- 표 13. 국내 참조동식물 기하모형 및 크기
- 표 14. 국내 참조동식물 선량환산인자 계산에 적용된 핵종
- 표 15. 국내 참조동식물 내부선량환산인자
- 표 16. 국내 수계 동물의 외부선량환산인자
- 표 17. 국내 지중동물의 외부선량환산인자
- 표 18. 국내 지상동물의 외부선량환산인자 (plane source)
- 표 19. 국내 지상동물의 외부선량환산인자 (volume source)
- 표 20. 국내 소나무의 외부선량환산인자

I. 연구배경 및 국내외 연구동향

1-1. 연구 배경

전통적으로 방사선 방호는 인간에 초점이 맞추어 발전 해 왔다. 그러나 1992년 브라질 리오에서 개최된 UN의 “환경과 개발 (environment and development)” 회의 (UNCED)에서 발표된 리오선언 Principle 4: Sustainable development에서 “개발은 환경자원의 적절한 사용과 보존이 함께 이루어져야 하며, 따라서 환경보존은 개발의 한 부분으로 개발과 독립적으로 고려될 수 없다”는 개념이 설정된 이후 지구환경 보존에 대한 국제적인 합의가 형성되었다 [1]. 지구환경에 위해를 줄 수 있는 잠재적 요인들은 다양한 형태로 존재하며, 원자력의 이용으로부터 필수 불가결하게 환경으로 배출되는 전리방사선 또한 그 중 하나이다. 따라서 리오 선언 이후 국제 방사선방호분야에서는 전리방사선으로부터 인간 뿐 아니라 환경 (여기서 환경은 인간을 제외한 non-human biota와 일반적인 생태계를 포함)을 통합적으로 보호하는 문제를 주요 주제로 다루고 있다. 과거 국제방사선방호위원회 (ICRP, International Commission on Radiological Protection)의 방사선에 의한 환경방호 개념은 “인간이 방사선으로부터 충분히 보호된다면 인간 이외의 생물종도 당연히 안전하게 보호된다.”는 권고를 유지하고 있었다 [2]. 1990년 초반 ICRP 60 [3]을 통해 다음과 같이 약간의 수정이 있었지만 환경방호에 대한 근본적인 입장변화는 없었다. “환경방사선으로부터 개별적인 생물종이 위해를 받을 수 있지만 인간 방호가 적절히 수행된다면 그 생물종의 소멸이나 개체수의 불균형을 초래할 정도로 환경에 위해를 주지는 않을 것이다.” 이러한 권고는 방사능 환경오염 정도가 인간 방호 기준을 만족하기만 하면 먹이사슬 경로에 존재하는 생물들의 방사능 오염 정도가 실제로 매우 낮다는 가정을 전제로 한다. 그러나 ICRP도 인정한 것처럼 그러한 권고를 뒷받침할 만한 명확한 증거는 존재하지 않으며, 그것이 항상 옳다는 추정을 할 만한 근거도 없다. 이러한 불확실성은 많은 국가들의 규제 기관들이 환경방호에 대한 이슈가 제기될 때마다 이해당사자(stakeholder)들 합의를 얻기 위해 해결해야 할 문제점으로 등장하였다. 특히 방사능 오염 정도가 심한 환경 중 인간 먹이사슬 경로에서 비껴나 있는 환경의 방호에 대한 기존 ICRP 권고는 전혀 타당하지 않았다. 따라서 ICRP는 전리방사선으로부터 환경을 보호하는 국제적인 framework을 도출하기 위한 Task Group을 2000년 구성하여 그 결과를 Publication 91에 발표하였다 [4]. ICRP는 Publication 91을 통해 1) 환경방호를 위한 국제적으로 합의된 광범위한 framework이 개발될 필요성이 있으며, 2) 그 framework은 전체 환경 보존 관점에서 일반 환경 분야에서 적

용되고 있는 다양한 시스템과 충분한 호환성이 있도록 하며, 3) 또한 기존 인간위주의 방호시스템과 밀접한 연관성을 가지는 환경방호 시스템 구축을 권고하고 이의 목적을 효과적으로 달성하기 위하여 방사선 환경 방호의 기준이 되는 참조 동식물의 도출을 위한 향후 방향 등을 제시하였다. Publication 91은 ICRP의 Main Commission에서 방사선 환경방호의 일반적 권고 설정을 위한 배경 자료로 채택되었고, 이를 기반으로 참조 동식물 도출을 목적으로 하는 이차 Task Group이 2003년 구성되었다. 2003년말 ICRP는 방사선 환경방호의 포괄적 권고안 도출을 위한 committee 5를 설치하여 2005년부터 운영하기로 결정하였으며, 이에 따라 이차 Task Group의 임무는 committee 5의 활동을 지원하기 위하여 사용가능한 선량모델의 review, 생물에 대한 방사선 영향에 대한 기존 정보의 적합성, 또한 환경방호 시스템이 서로 다른 수준의 방사선 피폭에 노출된 비인간종에 대한 평가에 어떻게 사용될 수 있으며, 기존 인간에 대한 방사선방호와 어떻게 조화될 수 있는지를 조사하는 데까지 임무가 확장되었으며 그 결과는 2005년 Annals of ICRP (The Concept and Use of Reference Animals and Plants for the purpose of Environment Protection)에 발표되었다 [5].

1-2. 국외 연구동향

국제원자력기구(IAEA)는 ICRP의 국제적 권고를 이행하는 회원국을 지원하기 위하여 비인간종(non-human biota)에 대한 전리방사선 영향의 국제적 안전 기준을 개발하고 있으며, 2003년 "Protection of the Environment from Ionizing Radiation (스웨덴, 스톡홀름)"의 주제로 국제회의를 개최하여 이 분야의 국제적인 consensus를 더욱 확대하여 회원국의 관심을 대폭 촉진하였다. IAEA의 주관하에 EMRAS (Environmental Modeling for Radiation Safety) 국제공동연구가 1단계 (2004~2007) 이어, 현재 2단계 (2009~2011)가 진행 중에 있다 [6]. EMRAS 1,2단계 모두에서 환경방호는 큰 주제 중 하나이다. 현재 EMARS 2단계에서 우리나라를 포함한 영국, 독일, 프랑스, 벨기에, 노르웨이, 일본, 캐나다, 미국 등이 참여하여 dosimetric 모델 비교 및 입력데이터의 종합 DB구축, 시나리오 평가의 상호 비교를 수행하고 있다.

ICRP나 IAEA와 같은 국제기구가 방사선 환경방호에 대한 국제적인 합의를 이끌어 내기 전에도 개별 국가 차원에서 자국에서 요구하는 법적 요구조건을 만족하기 위한 각자의 독립적인 연구 활동은 이미 1990년 초반부터 유럽 국가들을 중심으로 수행되어 왔다. 영국은 방사선 방호 측면보다는 자연보존 차원에서 전리방사선을 포함한 모든 환경위해 인자들로부터 환경을 보존하는 정책을 1994년 개정된 환

경보준법에 규정하고 있으며 환경국을 중심으로 야생동물에 대한 선량평가 연구가 수행되었다 [7].

전리방사선에 대한 환경영향 평가를 위한 종합시스템 개발을 위해 가장 체계적으로 수행된 연구는 제 5차 EC 연구개발 프로그램 일환으로 수행된 FASSET (Framework for Assessment of Environmental Impact) 프로젝트[8-13] 와 EPIC (Environmental Protection from Ionizing Contaminants in the Arctic) 프로젝트[14-18]가 있다. FASSET 프로젝트는 EC의 스웨덴, 노르웨이, 영국, 스페인, 핀란드, 독일, 프랑스의 여러 관련 기관들이 참여하여 dosimetry, 참조동식물의 도출 및 핵종전이모델 개발, 방사선의 생물학적 영향평가를 주목적으로 수행되었다. FASSET 수행과정에서 제기된 개선점과 종합적인 환경보호 frame 설정을 위해 추가로 수행되어야 할 부분을 (평가도구개발, 위험특성분석, 정책 결정 지원을 위한 기준 도출, 사례연구 등) 보완하기 위해, FASSET의 후속으로 ERICA (Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management) 프로젝트가 제 6차 EC 연구개발 프로그램의 일환으로 수행되었다 [19].

미국은 유럽과는 독립적으로 미국 NRC와 EPA의 지원을 받아 DOE에서 biota에 대한 선량평가를 위해 RESRAD-BIOTA [20]를 개발하여 현재 시범적으로 사용하고 있다. 캐나다 또한 법적 규제에 따라 비인간종에 대한 방사선 영향을 평가하고 있다.

1-3. 국내연구동향 및 선진국 대비 기술 수준

전리방사선에 대한 생태계 방사능 위해도 평가의 절차도가 그림1에 있다. 비인간종 방사능 위해도 평가는 환경으로 배출되는 핵종의 선원항을 규명하는 것으로부터 평가는 시작된다. 고려될 수 있는 핵종은 원자력시설의 정상 가동 뿐 아니라 사고로 인한 누출 모두를 감안하여 결정한다. 각국은 고유한 생태계를 가지고 있으므로 각국의 환경에 적합한 생태계 선정과 특성 파악이 필요하며, 각 생태계에 서식하고 있는 대표적 동식물을 참조 동식물로 선정하는 것이 필요하다. 대표적 동식물 선정에는 거주지 특성, 먹이습관, 생체축적 및 먹이사슬에서 차지하는 중요도 등을 고려하여야 한다. 다양한 경로를 통해 환경의 각 매체 (물, 토양, 및 동식물)로 확산된 핵종의 농도비(전이계수)를 결정하기 위한 예측모델 또는 측정된 데이터가 필요하며, 참조 동식물에 대한 선량평가를 위한 선량환산계수 또한 필요하다. 선량환산계수는 평가를 위해 선정된 참조 동식물의 크기와 형태를 기반으로 설정한 가상의 기하학적 구조(예, 원통 또는 타원체)에 대한 방사선 흡수선량속도를

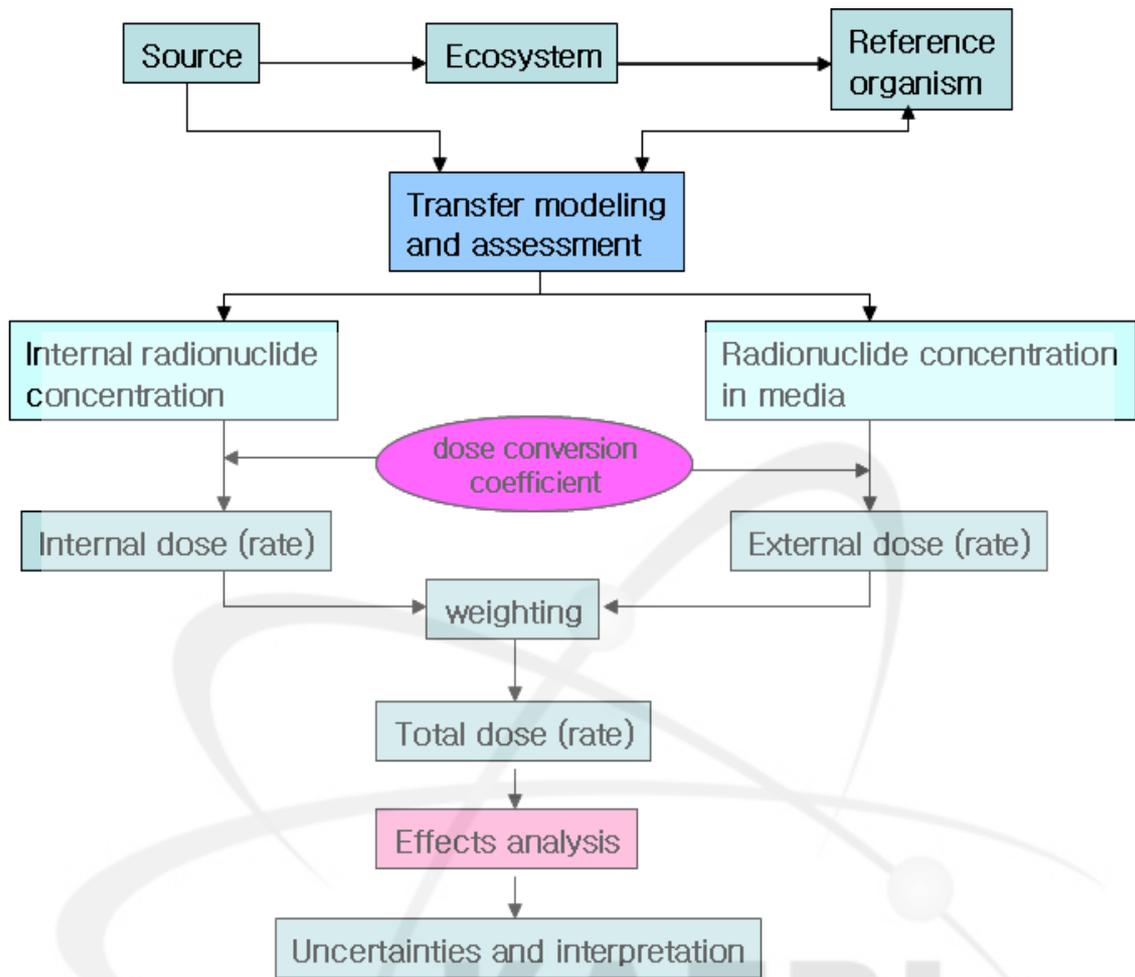


그림1 전리방사선에 대한 환경영향 평가 흐름도

Monte Carlo법으로 구하는 것이 보편화되어 있다. 인간 생태계와 달리 야생 환경에 존재하는 동식물은 다양하므로 각 생태계를 대표하여 선정된 참조 동식물의 종류에 따라 선량환산계수는 국가별로 다를 것이다. 일단 선량환산계수와 동식물의 농도가 결정되면 참조 동식물이 받은 총 방사선량은 내외부 피폭효과를 합산하여 결정하며, 이로부터 피폭된 양에 따른 생물종의 방사선 영향(morbidity, mortality, reduced reproductive success, mutation)을 평가한다. 그림1을 근거로 비인간종(non-human biota)에 대한 전리방사선 영향 평가를 위해 요구되는 핵심기술을 분야별로 표1에 요약 정리하였다. 유럽 국가들은 FASSET 및 ERICA 프로젝트를 통해 표1에 나열된 요소 기술의 상당 부분을 확보하고 있다. 그러나 여전히 많이 부족한 데이터, 본질적인 생태계의 복잡성으로 인해 국제적으로 합의되고 통일된 환경방호 기준과 방법은 아직 정립되지 않고 있다. 국제적 기준 도출을 위한 연구가 ICRP나 IAEA를

통해 활발하게 진행되고 있으므로 가까운 장래에 국제적으로 합의된 기준이 제시될 것으로 보인다.

우리나라는 아직 방사선에 대한 환경방호 개념이 본격적으로 도입되지는 않고 있다. 일각에서 인간 및 환경의 통합 방호개념의 도입이 조심스럽게 제시되고 있으나 아직 ICRP 60을 기반으로 하는 방호 개념이 공식적인 입장이며 관련 기반기술도 확보되지 않은 상태이다. 표1에 나열된 요소 기술 중 규제기준 등은 추후 ICRP,

표 1 전리방사선에 대한 환경방호 요소기술

기술 분야	요소기술
Dosimetry	<ul style="list-style-type: none"> -Dosimetric model for reference organism -Dose per unit concentration in environment -Weighting factor
Exposure	<ul style="list-style-type: none"> -Identification of reference organisms -Ecosystem characterization -Radionuclide selection -Source term characterization -Transfer modeling of radionuclide in aquatic and terrestrial systems -Ecological parameters -Prediction of concentration in environment and reference organism
Effects	<ul style="list-style-type: none"> -Selection of critical wildlife group -Effect data for organism -Relationship of environment effects to dose/concentration
Assessment	<ul style="list-style-type: none"> -Exposure pathway analysis -Effect analysis -Risk characterization -Assessment tool
Decision and management	<ul style="list-style-type: none"> -Intervention level -Licensing condition -Guideline/Standard

IAEA등의 국제기구에서 제시하는 권고치를 수용하면 될 것으로 보이나, 국내 고유한 환경 생태 특성과 연계된 기술은 우리 독자적으로 확보되어야 할 것이다. 표2에 방사선 환경방호를 위한 요소 기술 항목 중 선진국 대비 국내기술 수준을 중장기 연구가 수행되기 시작한 2007년을 기준으로 백분위로 표시하였다. 기술 수준은 기존 인간 방사선 방호를 통해 확보되었고, 이 기술이 환경방호에 직접 적용 가능하면 90%, 직접 활용될 수는 없지만 적절한 수정과 개선을 통해 적용할 수 있으면 50%, 국내에는 새로운 것이거나 관련 데이터가 확보되지 않은 경우는 10%로 평가하였다. 이 중 지난 3년간의 연구를 통해 dosimetry 기술 분야는 현재 IAEA EMRAS 공동연구에 참가할 수 있는 등 선진국 대비 80% 수준까지 기술 향상이 이루어진 것으로 평가한다.

표 2 방사선 환경방호 요소기술의 선진국 대비 국내 기술 수준

요소기술	비교국	선진국 대비 국내기술 수준(%)
-참조 동식물의 dosimetric 모델	EC	50
-선량환산인자		50
-참조 동식물 정의	EC	10
-생태계 특성		10
-핵종 선택		90
-선원항 특성		90
-수계, 육상에서의 핵종 이동 모델		50
-생태계 특성 인자		10
-피폭 경로 분석		50
-환경 및 참조 동식물의 농도 예측 모델 (전 이인자 예측 모델)		50
-평가 도구		10
-생물에 대한 방사선적 효과 분석		10
-리스크 특성 분석	EC	10
-간섭(Intervention) 준위	EC	10
-인허가 조건		10
-지침 및 표준		10

2. 국내 생태 특성

2-1. 전국 생태 특성

우리나라 자연 식생은 매우 다양하다. 북부 지방은 아고산(1500m~2500m 지역의 산림지대) 침엽수림이 발달해 있고, 북부와 중부의 일부 지역에는 침·활엽 혼합림이 많으며, 우리나라 자연 산림의 식생을 대표하는 낙엽 활엽수림은 중부지역에 분포되어 있다. 또한 남부 지방과 동·서 해안 지방은 상록 활엽수림으로 구성되어 있으며, 화강암과 화강 편마암이 노출된 산비탈 계곡부에는 서어나무 림이, 최남단 지역 및 남부 도서 지역에는 난·온대 상록수림이 발달해 있다. (“우리나라의 자연 생태계 현황”, 금강유역환경처)

지구상에는 약 170만 종의 생물종이 알려져 있으며, 조사되지 않은 생물종을 감안 할 경우 이보다는 더 많을 것으로 추정된다. 국내에는 10만종 이상의 생물종이 서식하고 있는 것으로 추정되며 현재까지 조사된 생물종 수는 29,916종이다. 이 중 동물이 18,117종, 식물이 8,271종, 기타 균류·원생생물 등이 3,528종이다. 우리나라는 국토 면적에 비해 생물 다양성이 풍부한데 이는 우리나라의 기후와 지형적 요인이 복잡하기 때문이다. 그러나 서식지는 산림 생태계가 대부분을 차지하여 다양하지 못하며, 유전적인 다양성이 보고된 자료는 거의 없는 실정이다. (“한국고유생물종도감” 2005년 환경부, “우리나라의 자연 생태계현황” 금강유역환경청, “한국 자연 생태계 현황”, 두희자연환경연구소).

비인간종 선량평가를 위해서는 우리나라의 고유종 현황을 분석할 필요가 있다. 환경부에서 2005년에 발간한 “한국고유생물종도감[21]”에 따르면 우리나라의 고유 생물종은 크게 척추동물, 무척추동물 I, 무척추동물 II, 관속식물, 조류, 균류로 분류할 수 있다. 척추동물은 다시 포유강, 조강, 파충강, 양서류 및 어강으로 분류하고 무척추동물과 관속식물, 조류, 균류에 대한 분류는 표3에 나타나 있다.

2-2. 경주 처분장 주변 생태 특성

경주 방사성폐기물 처분장 주변의 환경생태 특성은 우리나라 전체에 나타나는 환경생태 특성과 거의 유사하다. 다만, 북부지역에 비해 활엽수의 종이 다소 많이 분포하는 경향을 보인다. 교목 및 아교목으로는 소나무, 곰솔, 잣나무, 신갈나무, 참나무 종류 등이 서식하고 관목층으로는 소나무 종류와 진달래, 철쭉 등이 자생하고

있으며, 초본층으로는 소나무, 고사리 및 교목, 관목층의 어린 나무들이 자생하고 있다. 처분장 주변 내의 주요 식물군락별 분포 현황을 보면 곰솔 군락이 전체 면적의 13.8%를 차지하고 있고 소나무-신갈나무 군락이 12%, 소나무-곰솔 군락이 8%, 신갈나무-소나무 군락이 6%, 상수리나무-아카시아 나무 군락이 8% 정도를 차지하고 있다. 따라서 처분장 주변의 식물 중 가장 많이 서식하고 있는 대표 종으로는 소나무 군락으로 볼 수 있다.

처분장 주변의 포유류 분포 현황은 현지 조사된 자료에 의하면 고라니, 두더쥐, 너구리, 족제비, 멧돼지, 청설모, 다람쥐, 집쥐 및 등줄쥐 등이 관찰되었다고 보고되었다. 조류는 총 58종이 관찰 되었으며 이중 우점종은 참새, 붉은머리오목눈이, 갯이갈매기 등이었다. 양서, 파충류로는 총 9종이 관찰되었으며 주로 관찰된 종류는 무당개구리 등의 개구리 종과 살모사 등의 뱀 종이 주로 관찰되었다고 보고되었다. 곤충류는 총 80종이 관찰되었으며 잠자리, 메뚜기, 벌, 나비 등이 관찰되었으나 계절별로 서로 다른 종이 관찰되었다. 어류는 잉어과, 미꾸리과 및 망둑어과가 서식하고 있었으며 이중 우점종으로는 피라미, 버들치가 가장 많이 서식하고 있는 것으로 보고되었다. (“처분장 주변 환경생태조사보고서”)

표 3 우리나라 고유종 현황

대분류	척추동물	무척추동물 I	무척추동물 II	관속식물	조류	균류
소분류	포유강(4) 조강(4) 파충강(1) 양서강(5) 어강(59)	척삭동물문(10) 극피동물문(3) 태형동물문(7) 갑각강(162) 환형동물문(38) 연체동물문(92) 자포동물문(30) 해면동물문(92)	곤충강(1031) 톡토기강(149) 거미강(133)	단자엽식물강(77) 쌍자엽식물강(418) 나자식물강(4) 양치식물강(16)	녹조식물강(1) 갈조식물강(3) 홍조식물강(12) 규조강(10)	자낭균문(3) 담자균문(35)
총 수	73	434	1,313	515	26	38

3. 국내고유 참조동식물

3-1. 참조동식물의 개념

생태계 방사능 위해도 평가를 위한 참조동식물은 보편화되고, 일반적인 개념은 아니다. 현재 각 나라에서 사용되고 있는 참조동식물 용어는 다소 다르고 그 개념도 조금씩 차이가 난다. EC의 FASSET project와 영국의 R&D128 보고서에서 표현되는 참조생물(Reference Organisms)은 오염된 환경에서 서식하는 전형적이고, 대표적인 동식물의 방사능 위해도를 평가하기 위한 기본을 제공하는 가상의 동식물 집합체로 정의된다. 이는 결과적으로 특정한 생물종에 대한 결정론적인 방사능 위해도를 제공하는 것이 아니라 있음직한, 일어날 것 같은 방사능 영향의 정도를 평가하기 위한 기본을 제공하는 수단에 불과하다. 따라서 선택된 참조동식물이 어떤 특정한 동식물 집단을 대표할 수는 없다. 또 R&D128에서 나타나는 특징종 (feature species)은 어떤 생물종이 방사능에 영향을 받지 않는다는 것을 보여주기 위해 평가에서 요구되는 특정 관심종 (species of interest)을 의미한다. 유럽의 EPIC 프로젝트에서 제시하는 참조 동식물은 인간평가의 표준인과 동일한 개념으로 사용하고 있으며 ICRP에서는 참조동식물 (Reference Animals and Plants, RAP)으로 표현하고 있다. ICRP의 참조동식물은 생태계를 대표하는 결정적인 생물종을 의미하지는 않으며, 선량과 방사선영향, 선량과 피폭의 관계를 규명할 목적으로 사용하기 위하여 미리 정의된 해부학적, 생리학적, 생활패턴의 범주에 들어가는 생물종, 특별한 동식물의 기본적인 생물학적 특성을 가지고 있는 가상적인 동식물 후보군을 지칭한다. 미국의 비인간종 방사능 위해도 평가 코드인 RESRAD BIOTA에서는 방사선을 받는 생물종이라 하여 수신종(receptors)으로 표현된다. 수신종은 방사능 위해도 평가가 필요한 부지에서 서식하는 생물종 중 방사능에 노출되는 생물종을 말한다. RESRAD BIOTA에서 참조동식물은 크게 육생동물, 수생동물, 육수생동물 세 가지로 분류하고 각 범주에 속하는 동식물군의 기학적 요소 (크기 및 형태)는 고려하지 않는다. 그러나 부지 특성적인 요소를 감안하여 특정 생물종을 평가할 수는 있다. AECL은 참조동식물로 생태계서 중요한 위치를 차지하는 생물종으로 VEC(Valued ecosystem component)의 개념을 사용한다. VEC는 영국의 R&D128에서 나타나는 특징종과 같은 개념이다.

3-2 참조동식물 선정 기준

참조동식물이 생태계 방사능 위해도 여부를 결정짓는 절대적인 기준이 될 수 없다. 참조동식물은 인간 방사선방호의 표준인간과 마찬가지로 방사능 위해도 평가를 위한 목표동물의 기하학적 구조와 형태를 결정짓기 위한 참조 자료로 활용된다. 참조동식물을 선정하기 위한 대표적인 기준으로 생태학적 적절성, 방사선에 대한 생태학적 민감도, 방사선에 대한 생물학적 민감도, 대상 동식물에 대한 샘플링 및 모니터링의 용이성 등이 있다.

1) 생태학적 적절성 (Ecological relevance)

방사선평가를 위한 참조동식물 선택에 있어 먹이사슬의 각 단계를 대표하는 동식물을 고려하는 것이 좋다. 이러한 동식물은 한 생태계에서 유효한 에너지 및 물질 흐름을 나타내고, 결과적으로 그들에 대한 방사선 방호가 전체 생태계의 방사선 안전과 직결되기 때문이다. 이런 관점에서 각 영양단계별로 대표 참조동식물이 선정되는 것이 생태계 관점에서 가장 합리성을 가진다. 그러나 실제 적용시 평가용 입력데이터 부재로 인해 평가가 불가능할 수 있다.

2) 방사선에 대한 생태학적 민감도 (Radioecological sensitivity)

방사선에 대한 생태학적 민감도에는 다음과 같은 항목들이 고려된다.

- 피폭경로(Exposure pathways)
- 생태계 내에서의 종의 분포(Distribution of species within ecosystem)
- 피폭 가능성 (Likelihood of exposure)
- 피폭기간(Duration of exposure)
- 에너지 및 영양원 흐름에서의 그 종의 중요도(Important of species in energy or nutrient flow)
- 종 내로의 방사성 핵종 섭취(흡수) 및 축적(Uptake and accumulation of radionuclides within species)

3) 방사선에 대한 생물학적 민감도 (Radiobiological sensitivity)

생태계 내의 종에 따라 이온방사선에 대한 민감도는 큰 폭으로 변한다. 예를 들면, 대다수의 하위 종은 방사선에 강하다. 박테리아, 플랑크톤, 무척추동물은 어류나 포유류보다 방사선에 수백 배 강하다. 그 결과 방사선에 저항성이 큰 저급 동물들은 환경생태나 방사선에 대한 생물학적 민감도 측면에서 참조동식물로 자주 고려된다.

4) 시료 채취나 모니터링의 용이성

참조동식물의 생물학적 민감도 이외에도 조사 지역에서 발견되는 우점종, 쉽게 포집하거나 인식할 수 있는 종, 인간의 삶에 연관성이 큰 종의 선택이 필요하다. 다음과 같은 특성의 동식물은 선택에서 배제하는 것이 효과적인 것으로 알려진다.

- 제한된 분포를 가지거나 일반적이지 않은 것
- 방사능 분석이 불가능한 야생동물이나 희귀종
- 방사능 분석을 위해 포획할 수 없는 종
- 방사선의 생물학적 민감도를 직간접적으로 조사할 수 없는 종
- 생태계나 종에서 대표성이 없는 종

이와 같은 일반적인 선택 기준을 참조하여 국제방사선방호위원회(ICRP)는 참조동식물 선택을 위해 다음과 같은 기준을 제시하고 있다.

- 야생동물 보호 관련 법규
- 독성 검사의 사용
- 방사능 추적 데이터
- 방사능 영향에 관한 데이터
- 추가적인 연구 가능성
- 일반인의 관심도

표 4는 위와 같은 참조동식물 선정 기준을 반영하여 ICRP에서 제시한 참조동식물이며, 표 5와 6은 각국에서 고려하고 있는 육상생태계 및 수계 참조동식물이다.

표 4. ICRP에서 도출한 참조동식물

organism	육생(Terrestrial)	수생(freshwater)	해생(marine)
deer	X		
rat	X		
duck	X	X	
frog	X	X	
trout		X	X
flat fish			X
bee	X		
crab		X	X
earthworm	X		
pine tree	X		
grass	X	X	
brown seaweed			X

표 5 각국의 육상생태계 (terrestrial ecosystem) 참조동식물의 비교

	RESRAD-BI OTA (USA)	R&D128 (U.K.)	ERICA/ FASSET(EU)	AECL (CANADA)
Rat	X			
Bee		X		X
Earthworm (elongated)		X	Soil invert	X
Pine tree trunk				
Bacteria		X	X	
Lichen		X	X	
Tree		X	X	X
Shrub	X	X	X	X
Herb	X	X	X	X
Seed	X	X		
Fungus		X		
Caterpillar		X		
Ant		X		
Woodlouse		X	X	
Herbivorous Mammal	X	X	X	X
Carnivorous Mammal	X	X		X
Rodent	X	X		
Bird		X		
Bird Egg	X	X	X	
Reptile		X		Snake/Turtle
Frog				Also Toad
Grasses/ sedges	X		X	X
Fox	X			X
White tailed deer	X			Game Animal
Groundhog				X
Burrowing mammal			X	
Bear	X			
Insectivorous mammal				X

표 6 각국의 수계(aquatic system) 참조동식물 비교

	RESRAD/ BIOTA	R&D 128	ECOMOD	ERICA/ FASSET	AECL
Duck		X	X		X
Frog/amphibian	X	X	X		X
Tadpole	X				X
Salmonid/pelagic fish	X	X	X	X	X
Salmonid egg	X	X	X		X
Bacteria		X		X	
Macrophyte (vascular plant)	X	X		X	X
Phytoplankton		X	X	X	X
Zooplankton		X	X	X	X
Benthic mollusc	X	X	X	X	X
Small benthic crustacean	X	X	X	X	X
Large benthic crustacean	X	X	X	X	X
Benthic fish	X	X	X	X	X
Aquatic mammal	X	X	X	X	X
Seal		X	X		
Benthic soft inverts			X	X	X
Macroalgae			X		X
Fish larvae	X				
Crustacean				X	

3-3. 국내 참조동식물

국내 참조동식물 도출을 위한 참조 사이트로 경주 방사성폐기물 처분장 주변 생태계를 고려하였다. 국내 지역별로 생태계에 다소 차이가 있을 수 있지만 일반적인 참조 모형은 도출하기 어려우므로 경주 방사성폐기물 처분장을 기준으로 주변 생태계에 대한 방사선 영향평가를 통해 비인간중 방사선 영향평가를 위한 기본 평가프레임을 개발하고자한다. 이 평가프레임을 통해 방사능 위해도 평가가 필요한 추가적인 동식물에 대한 정보를 추가함으로써 쉽게 평가 영역을 확장할 수 있을 것이다.

표7은 경주 방사성폐기물 처분장 건설 인허가 과정에서 수행된 일반 환경영향 평가 보고서를 기준으로 방사성폐기물 주변에 서식하는 육수생 동식물을 요약한 것이다. 바다 동식물의 경우는 바다에 의한 희석효과를 감안하여 해양 생태계에 대한 방사능 위해도 평가는 고려하지 않았다. 따라서 해양 생태계 동식물은 본 연구에서 고려하지 않는다.

특정지역에 대한 비인간중 선량 평가에 있어서 모든 동,식물의 모형을 적용하여 평가하기는 사실상 불가능하다고 볼 수 있다. 따라서, 다양한 각각의 동,식물군을 대표할 수 있는 대표 동식물을 선정하여 그 동,식물의 기하학적 모형, 조직이나 기관의 전이율을 유추하여 볼 수 있다. 기하학적 모형은 크게 구모양, 원통형, 타원체형으로 구분한다. 타원체는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (3-1)$$

여기서 a 는 장축(main axis), b 와 c 는 각각 1st 및 2nd 단축(minor axis) 이다. 경주 처분장 주변 생태계에서 조사된 주요 동,식물을 대표하는 참조동식물의 기하모형 및 크기는 한국고유생물도감[21]을 참조로 표8에 요약하여 놓았다. 표8의 참조동식물의 기하학적 형태와 크기를 기반으로 MCNP를 활용한 참조동식물의 선량환산인자를 계산할 수 있다.



그림 2 참조 동식물의 기하모형 예제

표 7. 경주 방사성폐기물 주변에 서식하는 주요 육수생 동식물

분류	종류	대표 동물	
식물 (plant)	곰솔, 소나무, 아카시아, 참나무	소나무	
척추동물(Vertebrates)			
포유류 (mammal)	두더지, 너구리, 족제비, 삿, 고라니, 멧돼지, 멧토끼 청설모, 다람쥐, 등줄쥐	고라니 등줄쥐	
양서류 (amphibians)	도롱뇽, 무당개구리, 두꺼비, 청개구리, 참개구리, 황소개구리, 몸개구리	개구리	
파충류 (reptile)	붉은귀거북이, 줄장지뱀, 누룩뱀, 유혈목이, 능구렁이, 살모사	살모사	
어류 (fish)	피라미, 버들치, 은어, 미꾸라지	피라미	
조류 (birds)	원앙, 붉은새매, 황조롱이, 소쩍새, 말뚝가리, 희목물떼새, 붉은부리갈매기 참새, 청둥오리		
무척추동물(Invertebrates)			
절지 동물	곤충류 (insects)	잠자리, 사마귀, 베짖이, 나비, 매부리, 모메뚜기, 노린재, 무당벌레, 벌, 하루살이	벌
	갑각류 (crustacea)	민물새우	
연체 동물(복족류)	달팽이		
편형동물	플라나리아		
환형동물	지렁이	지렁이	

표 8 참조동식물의 기하학적 모형 및 크기

참조동식물	크기			무게
	major axis (a)	1st minor axis (b)	2nd minor axis (c)	
소나무(아교목)	1000(800-1200)	30	30	100kg
등줄쥐	10 (9-12)	3	2.5	20g
고라니	105(100-112)	50	50	10kg
청개구리	3.2(2.4-4)	3	2	30g
살모사	85(80-90)	1	1	100g
버들치	8(4-12)	3	1	30g
벌	1.8(1.6-2)	0.5	0.5	3g
(참)지렁이	9.5(9.3-10.5)	0.4	0.4	10g

4. 방사능 위해도 평가를 위한 핵종

환경에 존재하는 방사성 핵종 중 생태계 방사능 위해도 평가에 고려하여 주어야 하는 핵종은 다양하게 존재한다. 핵종의 선택에 있어 고려하여야 할 사항으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 방사성폐기물처분장, 원자력발전소와 같은 원자력시설의 정상적 운영을 위해 정기적으로 수행하는 방사선 환경영향평가나, 사고 누출을 대비한 비상계획에서 고려하는 핵종
- 환경에서의 이동성이나 동식물로의 농축이 큰 핵종
- 데이터가 충분히 존재하여 이용이 용이한 대표적인 알파, 베타, 감마 핵종.

표9에 국가별로 생태계 방사능 위해도 평가에 현재 적용되고 있는 핵종을 나타내었다. 고려하고 있는 핵종의 수는 국가별로 다소 상이하지만 많은 부분에서 공통적인 핵종이 있다. 공통적인 핵종은 Am-241, H-3, C-14, Cs-135, Pu-239, Sr-90, Tc-99, I-129 등으로 장반감기 핵종이 주종을 이룬다. 장반감기 핵종은 환경에 일단 누출되면 오랜 기간 동안 환경에 존재하므로 생태계에 만성적 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 우리나라에 적용할 평가 대상 핵종으로 경주 방사성폐기물 처분장의 방사선환경조사계획서를 참조하여 일차적으로 선택하였다. 대상 핵종의 최종 선택은 비인간종 선량평가가 국내 규제 체계 내에 편입될 때 관련 전문가의 심도 있는 검토를 거쳐 결정될 것이다.

표 9 생태계 방사능 위해도 평가에 적용되는 핵종

R&D 128 (영국)	RESRAD-biota (미국)	FASSET (EU)	ICRP	경주처분장기 준 (한국)
Am-241	Am-241	Am-241	Am-241	Ba-140
Ar-41	Ba-140	C-14	Ba-140	Be-7
C-14	Ce-141, Ce-144	Cl-36	C-14	C-14
Co-60	Cm-242, Cm-244	Cm-242, Cm-241,	Ca-45, Cd-109	Ce-144
Cs-137	Co-58, Co-60	Cm-244	Cs-141, Ce-144	Co-58
H-3	Cr-51	Cs-134, Cs-135,	Cf-252, Cl-36	Co-60
I-125, I-129m I-131	Cs-134, Cs-135,	Cs-137	Cm-243,	Cr-51
Kr-85	Cs-137	H-3	Cm-244, Co-57	Cs-134
P-32	Eu-152, Eu-154,	I-129, I-131	Co-58, Co-60 Cr-51, Cs-134	Cs-137
Po-260	Eu-155	K-40	Cs-135, Cs-136	Fe-59
Pu-239	H-3	Ni-63, Ni-59	Cs-137, Eu-152	H-3
Ra-226	I-129, I-131	Nb-94	Eu-154, Eu-155	I-129
Ru-106	Pu-239	Np-237	H-3, I-125	I-131
S-35	Ra-226, Ra-228	Pb-210	I-129, I-131	K-40
Sr-90	Sb-125	Po-210	I-132, I-133	La-140
Tc-99	Se-75	Pu-238, Pu-239,	Ir-192, K-40	Mn-54
Th-234	Sr-90	Pu-240, Pu-241	La-140, Mn-54	Nb-95
U-238	Tc-99	Ra-226	Nb-94, Nb-95	Pu-239
	Th-232	Ru-106	Ni-59, Ni-63	Pu-240
	U-233, U-234, U-235,	Sr-89, Sr-90	Np-237, P-32	Ru-106
	U-238	Tc-99	P-3,	Sr-90
	Zn-65	Th-227, Th-228,	Pa-231, Pb-210	Tc-99
	Zr-95	Th-230, Th-231,	Po-210, Pu-238	U-238
		Th-232, Th-234	Pu-239, Pu-240	Zn-65
		U-234, U-235, U-238	Pu-242, Ra-226	Zr-95
			Ra-228, Ru-103	
			Ru-106, S-35	
			Sb-124, Sb-125	
			Se-75, Se-79	
			Sr-89, Sr-90	
			Tc-99, Te-129m	
			Te-130, Th-227	
			Th-228, Th-231	
			Th-232, Th-234	
			U-234, U-235	
			U-238, Zn-65	
			Zr-95	

5. 국내 참조 동식물 내외부 선량환산인자

5-1. 국외 연구 현황

생태계에 존재하는 동식물 역시 사람과 마찬가지로 주변 환경에 존재하는 방사능 핵종에 의해 내외부 피폭된다. 비인간종 선량평가를 위해서는 평가 대상 동식물의 핵종별 내외부 선량환산인자가 필요하다. 비인간종 선량환산인자는 몇 가지 방법에 의해 결정되어 왔다. 가장 보수적인 방법은 대상 동식물이 형태와 크기에 상관없이 전리방사선에서 방출되는 에너지를 100% 흡수한다고 가정하여 구하는 것이다 [22]. 그러나 에너지의 흡수율은 에너지의 세기, 평가 대상 동식물의 기하학적 형태와 크기, 밀도 등 다양한 조건에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 동식물이 거주하는 생태 환경을 고려하여 실제적인 선량환산인자를 구하는 것이 최근 추세이다. 현재 선량환산인자 계산을 위해 가장 일반화 되어 있는 방법은 대상 동식물을 타원체나 실린더와 간단한 형태의 기하학적 구조로 단순화하고, 방사선 비정에 대해서는 Monte Carlo 법을 적용하는 방식이다. Monte Carlo 모사법은 다음의 몇 가지 장점을 제공한다.

- 1) 조성과 밀도가 다른 물질을 고려할 수 있다.
- 2) 방사선원과 target의 복잡한 기하학적 특성을 고려할 수 있다.
- 3) 방사선 전이를 결정하는 모든 물리적 현상을 고려할 수 있다.
- 4) source와 target의 self-shielding이 자동적으로 고려된다.
- 5) 특정조건의 모사에 대한 신뢰도가 높다.

Monte Carlo 모사법을 적용할 때 에너지 cutoff, target의 크기 및 형태, 방사선원(토양)의 밀도, target tissue (organism)의 밀도, target 주위의 air-pocket의 존재 여부, 고려하는 딸핵종의 종류 등 계산 조건에 따라 다양한 결과가 유도된다. 최근 IAEA의 국제공동연구 EMRAS를 통해 여러 나라에서 적용하고 있는 비인간종 선량환산인자 계산법을 비교하는 작업이 수행되었다 [23]. 여기에 참여한 선량환산인자 계산법은 EDEN2(프랑스), R&D128(영국), ECOMOD(러시아), LIETOS-BIO(리투아니아), SCK-CEN(벨기에), RESRAD-BIOTA(미국), SUJB(체코), AECL approach(캐나다), EC공동연구 프로그램인 EPIC, FASSET, ERICA이 포함된다. 이 중에는 EDEN2, FASSET/ERICA, RESRAD-BIOTA(level 3) 등과 같이 Monte Carlo 법을 적용한 것, EPIC, R&D128과 같이 kerma 근사법을 적용한 것, AECL, RESRAD-BIOTA(level

1&2)처럼 Amiro [22]의 보수적인 법을 적용한 것 등이 포함된다. 내부선량환산인자는 방법에 따라 큰 차이를 보이지는 않았지만, 외부선량환산인자는 비교적 큰 폭의 변화를 보여주었다. 외부선량환산인자 계산시 짧은 비정거리를 갖는 α - or low β -선에 의한 효과의 무시는 일반적으로 수용할 수 있는 가정이며, 매질의 밀도와 각 방사선의 에너지별 비정거리가 외부선량환산인자에 크게 영향을 주는 요소 중의 하나이었다.

5-2 선량환산인자 모델

비인간종(biota)에 대한 방사능 피폭 선량 계산시 생태계 자체의 복잡성과 동식물의 다양성으로 인해 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 동식물이 생존하는 주변 환경 매질(media)은 무한히 크며 방사능 농도는 매질 전체에 걸쳐 균일하다.
- 주변 환경 매질의 밀도는 매질 전체에 걸쳐 균일하다.
- biota의 몸체 밀도는 균일하고 장기(organ)별 밀도차이는 고려하지 않는다. 즉 피폭 선량은 단위 방사능 농도에 대한 biota의 몸 전체에 대한 평균값이다.
- biota내의 방사능 농도는 몸 전체에 걸쳐 균일하다.
- 육상생태계의 경우 참조동식물은 지중이나 지표에 거주한다.

비인간종 선량환산인자는 동식물이 존재하는 환경 매질에 따라 다르게 유도한다. 어류와 같이 물에서 서식하는 동물은 체내의 밀도와 주변 환경매질인 물과의 밀도차가 크지 않기 때문에 isotropic모델을 적용한다. 그러나 육상생태계에 사는 동식물은 방사선이 비정하는 주변 매질(공기, 토양)과 밀도차가 크기 때문에 외부 피폭 계산시 방사선이 이동하는 공간의 불균일성을 고려하여야 한다. 따라서 비인간종 선량환산인자 모델은 1) 물과 동식물의 밀도차가 크지 않아 균일계로 가정한 수계에 서식하는 동물, 2) 공기 또는 토양과 동식물의 밀도차가 커 불균일계로 볼 수 있는 육상생태계에 서식하는 동식물을 구분하였다.

1) 수계 (aquatic system) 동물의 선량환산인자 (DCC)

물속에 사는 동물의 선량환산인자 계산을 위해 uniform isotropic 모델을 사용하였다. 즉 organism 내부에 핵종이 균일하게 분포되어 있고, 무한 크기의 물속에

target organism이 존재하고, 물과 organism의 밀도가 동일하다고 하면 target organism의 내외부선량환산인자, D_{int} ($\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$) 및 D_{ext} ($\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$)는 각각 다음과 같이 표현된다 [24].

$$D_{int} = \sum_{\nu} \left(\sum_i E_i Y_i \Phi_{\nu}(E_i) \right) + \int N_{\nu} E \Phi_{\nu}(E) dE \quad (5-1)$$

$$D_{ext} = \sum_{\nu} \left(\sum_i E_i Y_i (1 - \Phi_{\nu}(E_i)) \right) + \int N_{\nu} E (1 - \Phi_{\nu}(E)) dE \quad (5-2)$$

여기서 ν 는 방사선의 형태(α , β , γ , spontaneous fission fragments)이다. E_i (MeV)와 Y_i (decay⁻¹, 혹은 (Bq.s)⁻¹)는 각각 핵종 붕괴시 불연속(discrete) 에너지 (α , conversion electron, Auger electron, γ , spontaneous fission fragments) 및 그 에너지에서의 붕괴 수율을 나타낸다. $N_{\nu}(E)$ (decay⁻¹MeV⁻¹)는 연속에너지 방사선 (β)의 frequency이다. $\Phi_{\nu}(E)$ 는 방사선 ν 의 흡수율(absorbed fraction; fraction of energy emitted by a radiation source that is absorbed within the target tissue, organ or organism)이며 주어진 target organism의 모양과 크기에 대해 Monte Carlo 모사법을 통해 구한다.

방사선 ν 의 종류가 α , 저준위 β (0.01MeV 이하), spontaneous fission fragments 이면 방사선의 비정거리 (50~100 μm)가 매우 짧기 때문에 target organism의 내부에서 에너지는 거의 100% 흡수되므로 $\Phi_{\nu}(E)=1$ 로 가정할 수 있다. 외부선량환산인자 결정을 위한 식(5-2)는 target organism과 방사선원이 존재하는 주변 환경매질이 동일한 밀도와 조성(composition)을 가질 때만 성립하므로 물속에 서식하는 동물의 외부선량환산인자 결정에만 적용할 수 있다. 외부선량환산인자 계산시 α , 저준위 β (0.01MeV 이하), spontaneous fission fragments 등은 물속에서 짧은 비정거리를 갖기 때문에 고에너지 beta (0.01MeV 이상)와 photon만을 고려한다.

방사선원이 균일하게 분포되어 있는 무한매질에서 흡수선량은 최대흡수선량을 초과할 수 없다. 최대흡수선량(D_{∞})은 에너지 흡수율이 1인 경우이므로, D_{∞} 는 주어진 핵종에 대해 식(5-1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$D_{\infty} = 5.76 \times 10^{-4} \bar{E} \quad (\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}) \quad (5-3)$$

여기서 \bar{E} (MeV/decay, 또는 MeV/Bq.s)는 주어진 핵종이 방출하는 방사선의 평균 에너지로 다음의 관계식을 가진다.

$$\bar{E} = \sum_{\nu} (\sum_i E_i Y_i + \int N_{\nu} E dE) \quad (5-4)$$

만약 target organism의 크기가 몸속에서 방출되는 방사선의 비정거리에 비해 매우 작으면 organism의 내부에서 방출되는 방사선의 대부분이 organism 밖으로 통과하므로 내부피폭은 0이 된다. 반대로 target organism의 크기가 방사선 비정거리보다 매우 크다면 방사선은 target organism 내부에 모두 흡수되므로 내부피폭이 최대인 D_{∞} 로 된다.

그림4에서 매질이 물인 경우, 에너지에 따른 α 입자, electron 및 photon의 비정거리를 보여준다. 여기서 α 입자 및 electron의 CSDA $\Lambda(E_{\beta})$ 는 입자가 매질 내에서 정지할 때까지 이동한 거리를 의미하고, $\lambda(E_{\gamma})$ 는 매질 내에서 photon의 mean free path의 값이다 [25, 26]. 저에너지의 전자나 α 입자의 물에서 비정거리는 $50\mu\text{m}$ 이하임을 볼 수 있다. 대개의 동식물의 크기가 이 보다 큼을 감안하면 이들 저에너지 방사선의 내부흡수율은 1로 보아도 무방하므로 $D_{int} = D_{\infty}$, $D_{ext} = 0$ 의 관계가 성립된다. 반대로 target organism의 크기가 고에너지 전자나 photon의 비정거리보다 매우 작은 경우 target organism 내에 에너지가 침적될 가능성은 매우 적다. 즉 $\phi \ll 1$ 이다. 따라서 이 경우 $D_{ext} = D_{\infty}$, $D_{int} = 0$ 의 관계가 성립된다.

많은 경우 target organisms의 형태는 타원형으로 가정된다. Ulanovsky and Pröhl [24]는 다양한 크기의 타원체 ($x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 = 1$)의 선량환산인자 유도를 위해 해당 타원체와 동일한 질량(M)을 가지는 구형 ($x^2 + y^2 + z^2 = R_o^2$)의 선량환산인자와 타원체의 기하학적 요소를 반영한 경험식을 제시하였다. 이 경험식은 자연에 존재하는 대개의 organisms에 적용할 수 있는 적응성으로 인해 2007 ICRP 보고서 [27]에서 organisms의 내부선량환산인자 계산을 위해 권고되는 방법으로 타원체의 질량: $10^{-6}\text{kg} \sim 10^3\text{kg}$, 에너지: $0.01\text{MeV} \sim 5\text{MeV}$ 범위에서 적용 가능하다. 질량 범위를 벗어나는 경우의 organism에 대해서는 외삽을 통해 근사적으로 내부선량환산인자 추정 가능하다. 0.01MeV 이하의 에너지에 대한 흡수율은 외삽으로 큰 오차 없이 적용 가능하나, 5MeV 이상의 에너지에는 적용이 불가능한 것으로 알려졌다. 그러나 핵종의 붕괴 에너지는 거의 대부분이 5MeV 이하이므로 실제적으로 문제가 되지는 않는다[28]. Ulanovsky and Pröhl [24]는 일반적 타원체에 대한 β 선 및 photon의 에너지 E에서의 방사선의 흡수선량을 $\phi(E)$ 라 하면 동일한 질량을 가지는 구형의 흡수선량과 다음의 근사식으로 표현할 수 있다고 하였다.

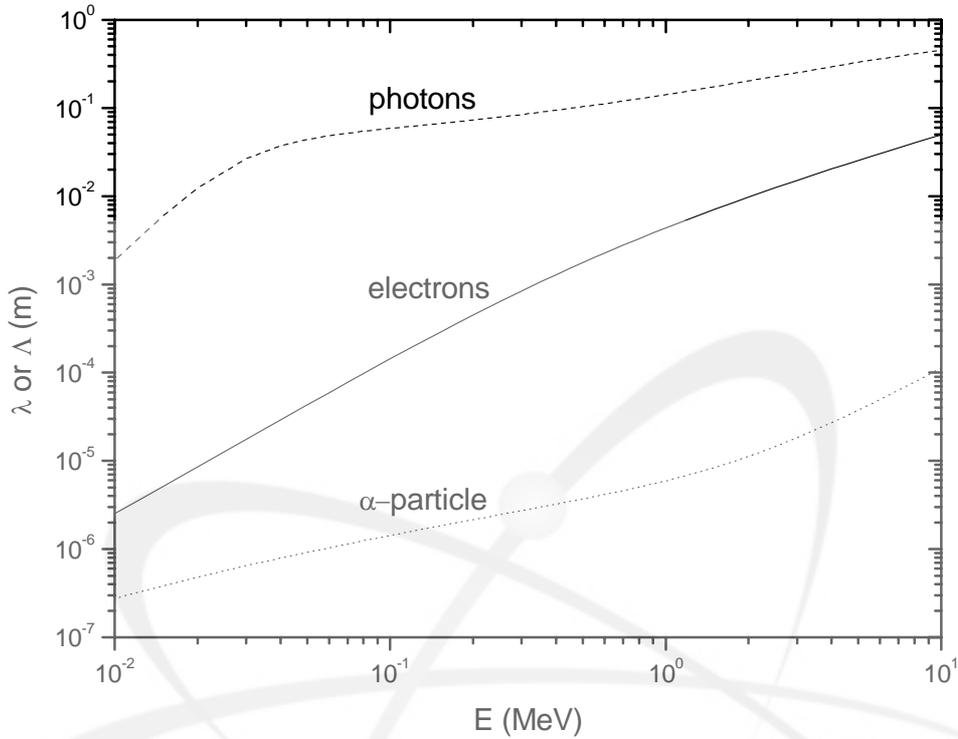


그림 4 Electron의 CSDA [25] 및 photon의 mean free path [26]

$$\Phi(E) = RF(\eta) \times \Phi_s(E) \quad (5-5)$$

여기서 $\Phi_s(E)$ 는 주어진 에너지(E)에서 타원체와 동일한 질량(M)을 갖는 구형의 방사선 흡수율이고, $RF(\eta)$ 는 구형에 대한 타원체의 형태 보정인자로 다음의 경험식을 가진다.

$$RF(\eta) = (1 - |1 - \eta|^{1/s})^s \quad (5-6)$$

여기서 η 는 "non-sphericity"를 나타내는 매개변수로 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{1}{(\zeta\chi)^{1/3}} \left(\frac{3}{1 + \zeta^{-1.6075} + \chi^{-1.6075}} \right)^{1/1.6075} \quad (5-7)$$

단 $\zeta = b/a$, $\chi = c/a$ (a : length of main axis, b, c : length of minor axes)

η 가 1이면 완전한 구형이며, 0으로 접근하면 선이나 면을 나타낸다. 한편 매개변수 s 는 0과 1사이의 값을 가지며 다음의 경험식을 가진다.

<electron>

$$s(r_o) = 0.047 + \frac{0.783}{1 + (r_o/0.506)^{0.549}} + \frac{0.235}{0.495 + \log_{10}^2(r_o/0.94)} \quad (5-8)$$

$$\text{단 } r_o = R_o/\Lambda(E_\beta)$$

<photon>

$$s(r_o) = 0.071 + \frac{0.677}{1 + (r_o/4.97)^{1.830}} + \frac{0.071}{0.247 + \log_{10}^2(r_o/9.9)} \quad (5-9)$$

$$\text{단 } r_o = R_o/\lambda(E_\gamma)$$

여기서 R_o 는 타원체와 동일한 질량을 가지는 구형의 반지름으로 $R_o = \sqrt[3]{abc}$ 의 관계식을 가진다. $\Lambda(E_\beta)$ 는 수중에서의 beta입자(전자)의 continuous slow down approximation(CSDA), $\lambda(E_\gamma)$ 는 photon의 mean free path 이다 (그림4 참조).

식(5-5)를 이용하여 타원체의 선량환산인자를 구하기 위해서는 우선 타원체와 동일한 질량을 갖는 구형체의 선량흡수율 ϕ_s 를 구하여야 한다. 구형체의 흡수율 ϕ_s 는 MCNP 모사를 통해 구하며 본 연구에서의 모사 조건은 다음과 같았다.

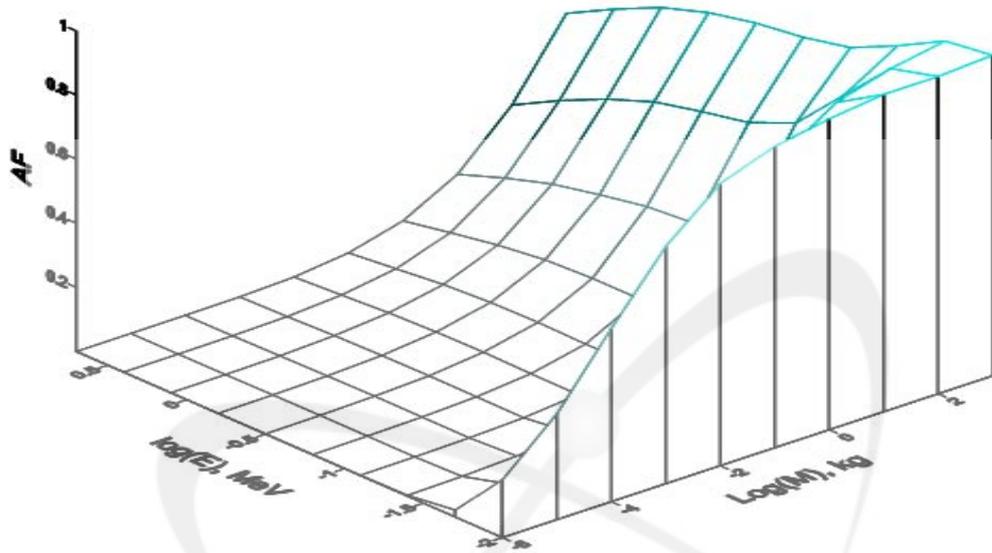
- 방사선원 (radiation source): photon, electron (α 의 흡수율은 1로 가정)
- target의 형태: 구형
- target의 질량범위: $10^{-6}\text{kg} \sim 10^3\text{kg}$ (밀도는 1g/cm^3)
- 방사선원 (source)의 에너지 범위: $0.01\text{MeV} \sim 5\text{MeV}$
- target의 조성(composition)은 ICRU(15)에서 제시한 tissue와 동일한 것으로 가정한다.
- target organism은 무한 크기의 물속에 존재 한다 (MCNP 계산에서 물의 크기는 초기에너지 크기에 따라 물에서의 photon의 mean free path (mfp)의 약 20배로 설정하였다)

위 조건과 함께 MCNP 코드로부터 구한 구형(spherical type)의 target에 대한 electron과 photon에 대한 에너지 흡수율 ϕ_s 가 그림5와 표10 및 표11에 요약되어 있

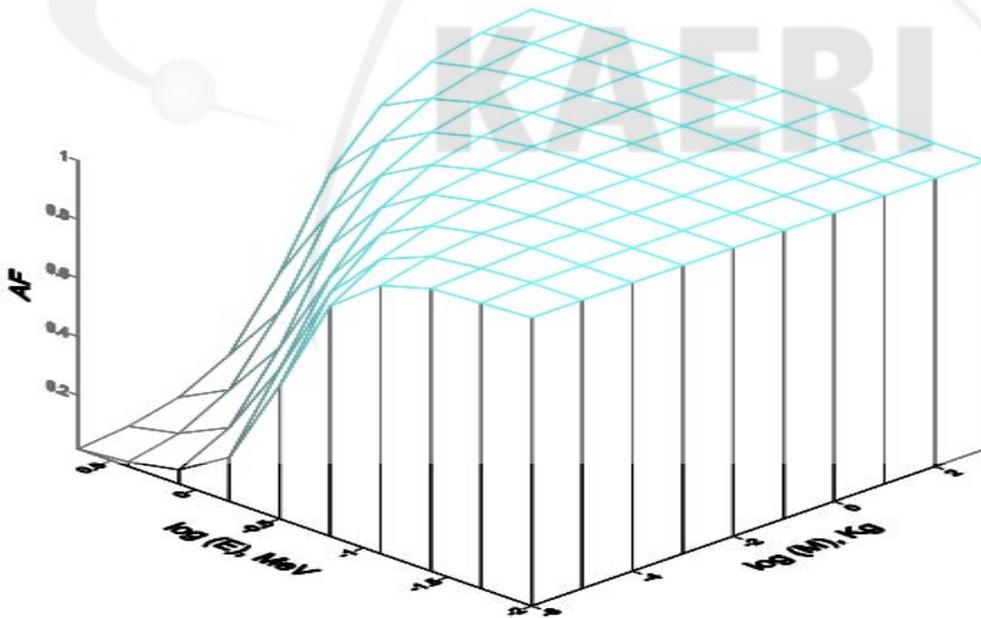
다. 그림4에서 photon의 mean free path는 전자보다 확실히 길다. 따라서 photon의 흡수율은 저에너지일수록, target organism의 크기가 클수록 증가한다. Organism 내에서 전자의 비정거리는 에너지가 100keV일 때 160 μ m, 1MeV일 때 5mm 정도로 알려져 있다. 만약 target organism의 반지름이 전자의 비정거리보다 크면 전자에너지 흡수율은 1에 가까울 것이다. 매우 작은 target organism, 매우 큰 전자에너지인 경우 에너지 흡수율은 매우 작아진다.

식(5-1)과 식(5-2)를 이용하여 핵종에 대한 선량환산인자를 구하기 위해서는 해당 핵종의 방사능 붕괴 에너지 특성 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 ICRP38 [28]에서 제시하는 데이터를 활용하였으며, 베타선(전자)의 연속에너지 스펙트럼은 ORNL의 DexRax로부터 구하였다 [29]. 보다 상세한 내용은 5-3절에서 기술한다.





Photon



Electron

그림 5 Sphere 형태의 target에 대한 photon 및 전자의 에너지 흡수율

표 10 구형에 대한 photon의 흡수율 (Φ)

질량(kg) 에너지(MeV)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
0.01	0.180E+00	0.330E+00	0.540E+00	0.740E+00	0.880E+00
0.02	0.210E-01	0.450E-01	0.960E-01	0.200E+00	0.370E+00
0.03	0.600E-02	0.130E-01	0.280E-01	0.630E-01	0.140E+00
0.04	0.280E-02	0.590E-02	0.130E-01	0.300E-01	0.690E-01
0.05	0.160E-02	0.360E-02	0.810E-02	0.190E-01	0.450E-01
0.06	0.130E-02	0.290E-02	0.640E-02	0.150E-01	0.350E-01
0.07	0.120E-02	0.260E-02	0.570E-02	0.130E-01	0.300E-01
0.08	0.110E-02	0.240E-02	0.540E-02	0.120E-01	0.280E-01
0.09	0.110E-02	0.240E-02	0.530E-02	0.120E-01	0.280E-01
0.1	0.110E-02	0.240E-02	0.540E-02	0.120E-02	0.270E-01
0.15	0.120E-02	0.260E-02	0.590E-02	0.130E-01	0.290E-01
0.2	0.120E-02	0.280E-02	0.630E-02	0.140E-01	0.300E-01
0.3	0.120E-02	0.290E-02	0.660E-02	0.140E-01	0.320E-01
0.5	0.860E-03	0.250E-02	0.620E-02	0.140E-01	0.320E-01
1.0	0.270E-03	0.120E-02	0.410E-02	0.120E-01	0.280E-01
1.5	0.140E-03	0.590E-03	0.250E-02	0.870E-02	0.230E-01
3.0	0.420E-04	0.190E-03	0.850E-03	0.380E-02	0.140E-01
5.0	0.210E-04	0.890E-04	0.400E-03	0.180E-02	0.780E-02
질량(kg) 에너지(MeV)	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3
0.01	0.940E+00	0.970E+00	0.990E+00	0.990E+00	0.100E+01
0.02	0.600E+00	0.790E+00	0.900E+00	0.950E+00	0.980E+00
0.03	0.290E+00	0.520E+00	0.740E+00	0.880E+00	0.940E+00
0.04	0.160E+00	0.350E+00	0.600E+00	0.800E+00	0.900E+00
0.05	0.110E+00	0.260E+00	0.500E+00	0.740E+00	0.870E+00
0.06	0.850E-01	0.210E+00	0.440E+00	0.700E+00	0.850E+00
0.07	0.740E-01	0.180E+00	0.410E+00	0.670E+00	0.840E+00
0.08	0.690E-01	0.170E+00	0.380E+00	0.650E+00	0.830E+00
0.09	0.660E-01	0.160E+00	0.370E+00	0.630E+00	0.820E+00
0.1	0.650E-01	0.160E+00	0.360E+00	0.620E+00	0.810E+00
0.15	0.650E-01	0.150E+00	0.330E+00	0.590E+00	0.800E+00
0.2	0.680E-01	0.150E+00	0.330E+00	0.580E+00	0.790E+00
0.3	0.690E-01	0.150E+00	0.320E+00	0.560E+00	0.780E+00
0.5	0.690E-01	0.150E+00	0.300E+00	0.540E+00	0.760E+00
1.0	0.620E-01	0.130E+00	0.270E+00	0.490E+00	0.720E+00
1.5	0.540E-01	0.120E+00	0.250E+00	0.450E+00	0.680E+00
3.0	0.380E-01	0.910E-01	0.200E+00	0.380E+00	0.610E+00
5.0	0.270E-01	0.710E-01	0.160E+00	0.320E+00	0.550E+00

표 11 구형에 대한 electron의 흡수율(Φ)

질량(kg) 에너지(MeV)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
0.01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.02	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.03	0.990E+00	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.04	0.980E+00	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.05	0.970E+00	0.990E+00	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01
0.06	0.960E+00	0.980E+00	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01
0.07	0.950E+00	0.980E+00	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01
0.08	0.930E+00	0.970E+00	0.990E+00	0.990E+00	0.100E+01
0.09	0.920E+00	0.960E+00	0.980E+00	0.990E+00	0.100E+01
0.1	0.910E+00	0.960E+00	0.980E+00	0.990E+00	0.100E+01
0.15	0.820E+00	0.910E+00	0.960E+00	0.980E+00	0.990E+00
0.2	0.720E+00	0.870E+00	0.940E+00	0.970E+00	0.990E+00
0.3	0.500E+00	0.750E+00	0.880E+00	0.950E+00	0.970E+00
0.5	0.210E+00	0.520E+00	0.760E+00	0.890E+00	0.950E+00
1.0	0.820E-01	0.190E+00	0.470E+00	0.730E+00	0.870E+00
1.5	0.530E-01	0.120E+00	0.280E+00	0.590E+00	0.800E+00
3.0	0.270E-01	0.570E-01	0.120E+00	0.290E+00	0.590E+00
5.0	0.170E-01	0.350E-01	0.740E-01	0.160E+00	0.380E+00
질량(kg) 에너지(MeV)	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3
0.01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.02	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.03	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.04	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.05	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.06	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.07	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.08	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.09	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.1	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.15	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.2	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.3	0.990E+00	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01	0.100E+01
0.5	0.970E+00	0.990E+00	0.990E+00	0.100E+01	0.100E+01
1.0	0.940E+00	0.970E+00	0.990E+00	0.990E+00	0.100E+01
1.5	0.900E+00	0.950E+00	0.980E+00	0.990E+00	0.990E+00
3.0	0.800E+00	0.900E+00	0.950E+00	0.980E+00	0.990E+00
5.0	0.660E+00	0.830E+00	0.920E+00	0.960E+00	0.980E+00

2) 육상생태계 동식물 선량환산인자

방사선원과 target organism 사이에 존재하는 매질 특성은 방사선 비정거리에 영향을 주므로 target의 외부 흡수선량에 큰 영향을 준다. 방사선원의 강도가 클수록 매질의 밀도가 작을수록 흡수선량은 커질 것이다. 육상생태계에서 방사선원은 공기 또는 토양에 존재한다. Target organism은 지중에 사는 동물 (예, 지렁이, 들쥐), 지상에 사는 동물 (예, 산토끼, 노루 등), 지상에 사는 식물(예, 소나무), 공기 중에 사는 동물 (예, 조류)로 구분할 수 있다. 공기 중에 존재하는 오염물질은 비, 바람 등을 통해 최종적으로 토양에 침적되므로 육상생태계에 서식하는 동식물의 외부피폭은 주로 오염된 토양으로부터 일어난다. 공기, 토양, 동식물의 구성성분과 밀도는 상이하므로 외부선량환산인자를 구하기 위해서 균일계에 대한 식(5-2)를 적용할 수 없다. 육상생태계와 같은 불균일계에서의 외부선량환산인자는 일반적으로 Monte Carlo 모사를 통해 구한다 [30].

생태계의 자체의 복잡성과 생태계에 살고 있는 동식물의 다양성으로 인해 모든 조건의 외부피폭을 다 고려할 수는 없다. 따라서 가장 전형적인 조건의 에너지 범위, 환경매질의 오염조건, 동식물의 모양과 크기 등이 외부피폭 계산을 위해 먼저 정의되어야 한다. 본 연구에서 육상생태계 동식물의 외부선량환산인자 계산을 위해 다음과 같은 일반적 가정이 고려되었다.

- 오염원은 토양에만 존재하고 외부피폭은 photon에 의해서만 일어난다.
- 육상생태계에 살고 있는 동식물은 거주지 따라 지중에 살고 있는 동물, 지상에 살고 있는 동물 및 식물 3경우로 구분한다.
- 지중 동물은 주변의 균일하게 오염된 토양에 의해 피폭된다.
- 지상에 살고 있는 동식물의 외부 피폭을 계산하기 위해 plane source와 volume source 두 가지 방사선원을 고려한다. 전자는 최근에 오염된 토양에 동식물이 피폭되는 경우를 계산하기 위한 것이고, 후자는 오래전에 오염된 토양에 의한 동식물의 외부 피폭을 계산하기 위한 것이다.

① 지중동물 (In-soil animals)

지중동물에 대한 선량환산인자를 구하기 위한 MCNP geometry를 그림6에서 보여준다. MCNP 모사를 위한 조건은 다음과 같다.

- 토양 오염원은 수평방향의 무한 매질로 가정한다. 단 MCNP 계산에서는 토양 내에서 3MeV이하의 photon은 비정거리가 10cm를 넘기지 못하는 특성을 고려하여 토양오염원은 가로 100cm(x축), 세로 100cm (y축), 깊이 50cm (z축)인 유한 크기의 box 형태로 가정한다.
- 오염된 토양 box의 중앙에 target(organism)이 존재한다. 즉 토양의 깊이가 50cm이므로 target은 지표면으로부터 깊이 25cm에 위치한다. 즉 target 위치의 좌표는 (x,y,z)=(0,0,-25)이다.
- 지중에 거주하는 동물 중 쥐, 개구리, 뱀, 여우 등과 같이 지하에 터널을 파서 서식하는 동물은 직접 토양과 접촉하지 않으므로 해당동물 주변에는 0.5cm 두께의 air pocket이 존재한다고 가정한다. 단 지렁이와 같이 이동시 토양과 직접 접촉하는 지중동물에 대해서는 air-pocket을 고려하지 않았다.
- Organism tissue, 토양 및 공기의 조성은 표12와 같다.
- 0.01~3MeV의 12개 photon 에너지에 대한 대상 organism의 F6 tally로부터 각 organism이 단위 질량당 받는 흡수선량 (MeV/g 혹은 μGy)을 구하였다.

그림7에 에너지별 지중동물의 선량환산인자를 보여준다. 여우를 제외한 나머지 동물의 선량환산인자는 에너지 크기가 0.03MeV 이상일 때 거의 동일한 결과를 보여 준다. 이는 해당 동물의 크기에 비해 photon의 비정거리가 크기 때문에 해당 동물의 크기에 대한 영향이 거의 반영되지 않았기 때문이다. 그에 비해 상대적으로 크기가 큰 여우는 다른 동물에 비해 선량환산인자가 작게 나타났는데 이는 여우의 self-shielding 효과 때문이다.

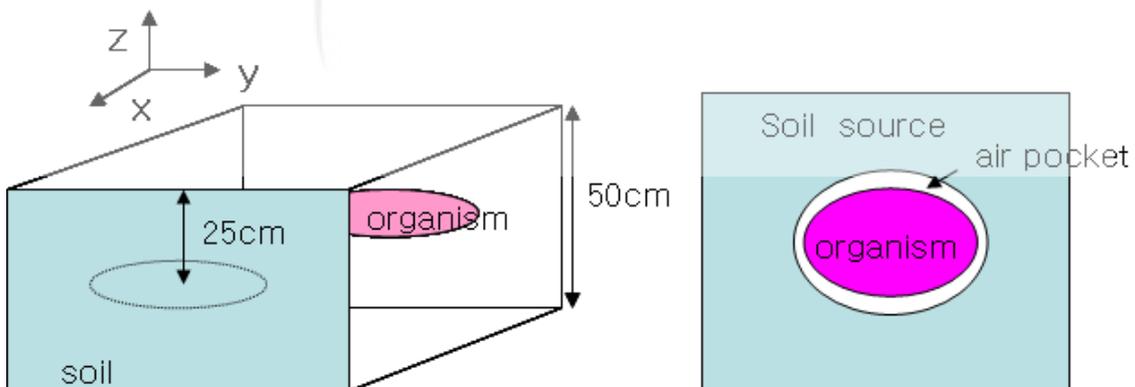


그림 6 지중동물(in-soil animals)의 외부선량환산인자를 계산하기 위한 MCNP 기하구조

표12. MCNP 계산에 적용된 물질의 조성(%)

element	organism ^a	soil ^b	air
H	10.2	2.1	0.064
C	14.3	1.6	0.014
N	3.4		75.09
O	71.0	57.7	23.56
Na	0.1		
Al		5.0	
Si		27.1	
P	0.2		
S	0.3		
Cl	0.1		
Ar			1.28
K	0.4	1.3	
Ca		4.1	
Fe		1.1	
density (g/cm ³)	1.05	1.6	1.2x10 ⁻³

* a: Skeletal muscle [31]; b: Silty soil [32]

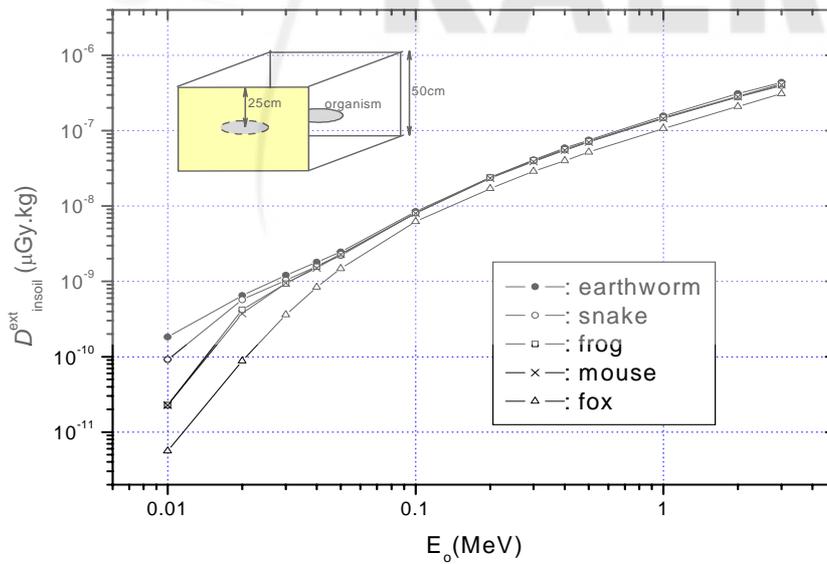


그림 7 단위 에너지별 지중 동물의 외부선량인자

② 지상동물 (On-soil animals)

지상동물은 주로 토양 오염원으로부터 피폭된다. 지상 동물의 외부선량환산인자를 계산하기 위한 가정 및 조건은 다음과 같다.

- 수평 방향으로 무한 크기의 토양 오염원을 가정한다.
- 토양 오염원은 plane source (토양지표)와 volume source (토양 깊이 10cm까지 균일하게 토양이 오염되었다고 가정) 의 두 종류를 고려한다.
- 피폭 받는 organism은 타원체로 가정하고, 피폭 받는 위치는 해당 organisms의 높이 (타원체 식에서 $c/2$ 에 해당) 라고 가정한다.

공기 중에서 photon의 비정거리는 매우 크므로 Monte Carlo 모사시 모델 geometry의 방사선원의 크기를 크게 설정하여야 한다. 그러나 target organism이 토양 오염원에 비해 매우 작은 경우 (크기를 고려하면 모든 biota에 해당) 작은 크기의 target으로 인해 target을 hit하는 track의 수는 매우 적게 된다. 이를 회피하기 위해서는 매우 많은 수의 photon track을 발생시켜야 하지만 현존하는 컴퓨터의 계산 능력을 감안하더라도 이 방법은 매우 시간 및 비용 소모적이다. Taranenko 등 [30] 이 문제를 극복하기 위하여 2단계 근사법을 개발하였다. 일단계로 토양의 plane source 또는 volume source에 대해 target organism이 존재하는 지상 높이 (타원체일 경우 $c/2$ 에 해당)에서 air-kerma를 구하고 이단계로 대상 organism의 평균흡수선량과 공기 중에 동일 높이, 동일 크기로 존재하는 가상의 air cell에 대한 air-kerma와의 비 r 값을 구한다. 일 단계에서 air-kerma를 구할 때 air target cell을 충분히 크게 할 수 있기 때문에 모델 geometry 크기가 커도 photon track 수를 합리적으로 줄일 수 있으며, 이 단계에서 동일 높이, 동일 모양의 air와 organism의 흡수선량 비인 r 값은 target의 크기에 거의 영향을 받지 않으므로 모델 geometry의 크기를 계산에 합리적인 규모로 줄일 수 있는 장점이 있다. 위와 같이 두 단계 과정을 거쳐 각각 구한 air-kerma와 r 값을 이용하여 해당 동물의 외부선량은 다음의 식으로 구한다.

$$D_{ext}^{onsoil}(E_o, h) = K_{air}(E_o, h) \times r(E_o, h) \times A_s \quad (5-10)$$

여기서,

$D_{ext}^{onsoil}(E_o, h)$: 초기 photon 에너지 E_o , organism의 지상 높이 h 에서의 organism의 평균흡수선량, ($\mu\text{Gy/h}$)/(Bq/kg)

$K_{air}(E_o, h)$: 토양 source로부터 방출된 초기 에너지 E_o 의 photon에 대한 organism의 지상 높이 h 에서의 air-kerma, μGy

$r(E_o, h)$: 초기 photon 에너지 E_o , organism의 지상 높이 h 에서의 organism의 평균흡수선량과 air-kerma의 비

A_s : plane source의 면적, m^2 또는 volume source의 질량, kg

일 단계의 air-kerma를 구하기 위한 Monte Carlo 모사조건은 다음과 같다.

- 오염원은 토양이며 plane source 와 volume source 두 가지 경우를 고려하였다.
- 방사선원 photon이며 초기 방출 에너지 범위는 10keV~5MeV 이다.
- 모델 geometry는 수직 방향의 실린더이다 (그림8 참조).
- 실린더의 반경은 공기 중에서 photon의 비정거리를 감안하여 충분히 큰 3km로 하였고, photon의 토양 내 유효 이동거리인 10cm를 감안하여 이 보다 훨씬 큰 5m의 토양 깊이로 설정하였다. target인 공기 cell 의 두께는 1cm로 설정하였다.
- 토양 source에 대한 air target cell의 F6 tally로부터 air-kerma를 구하였다.

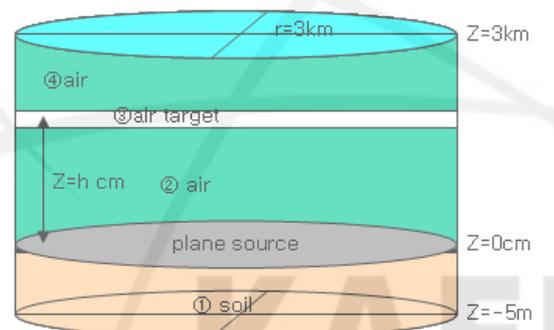
초기 photon 에너지 E_o , organism의 지상 높이 h 에서의 organism의 평균흡수선량과 air-kerma의 비 r 을 계산하기 위한 MCNP geometry 조건은 다음과 같다.

- 에너지 범위는 50keV~3MeV이다.
- 토양 source의 크기는 반지름 20m, 높이 20m, 깊이 20m로 가정하였다(그림10 참조). 이는 air-kerma 계산시 적용한 모델 geometry의 크기(반지름 3km, 높이 3km, 깊이 5m) 보다 매우 작은 값이다. 이 방법이 가능한 것은 동일한 모양, 크기의 target 에 대한 r 값은 토양 source의 크기에 영향은 거의 받지 않는다. 실제로 예비 계산을 통해서 r 값은 모델 geometry의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있었다.
- Air cell과 해당 organism에 대한 각각의 F6 tally로 부터 r 값을 구한다.

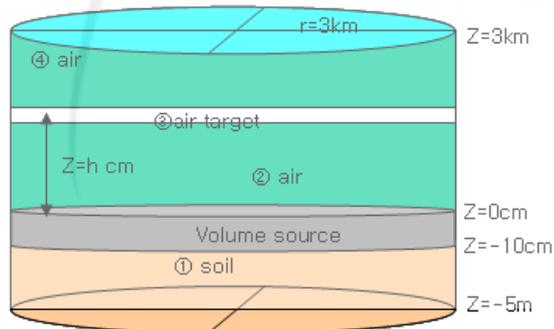
위 방법으로 구한 국내 참조 동식물에 대한 air-kerma와 r 값을 각각 그림9와 그림11에 나타내었다. 식(5-10)으로 구한 3종류의 지상 동물의 에너지별 흡수선량을 그림12에서 보여준다. plane source인 경우 에너지에 따른 피폭은 에너지가 증가할수

륙 감소하다가 약 0.05MeV 크기의 에너지에서는 다시 증가하기 시작한다. 이는 작은 에너지에서 물체의 에너지 흡수율이 상대적으로 크기 때문이다. 크기가 작은 동물의 피폭이 큰 동물보다 더 컸다. 크기가 증가할수록 self-shielding 효과로 인한 방사능 피폭이 감소하기 때문이다. 동물 크기별 차이는 에너지가 크기가 작을수록 더 크게 나타났다. 작은 크기의 에너지에서 물체의 에너지 흡수율이 더 크기 때문이다.

Volume source인 경우는 plane source 와 달리 피폭은 organism의 종류에 상관 없이 에너지가 증가할수록 계속 증가한다. 이는 volume source인 경우 토양 자체 self-shielding으로 인한 에너지 감쇄효과로 저에너지인 경우는 물체에 도달되기 전에 토양에 거의 에너지가 흡수되기 때문이다.



(a) Plane source at zero depth



(b) Volume source uniformly distributed to a depth of 10cm

그림 8 Air-kerma를 구하기 위한 MCNP 기하구조

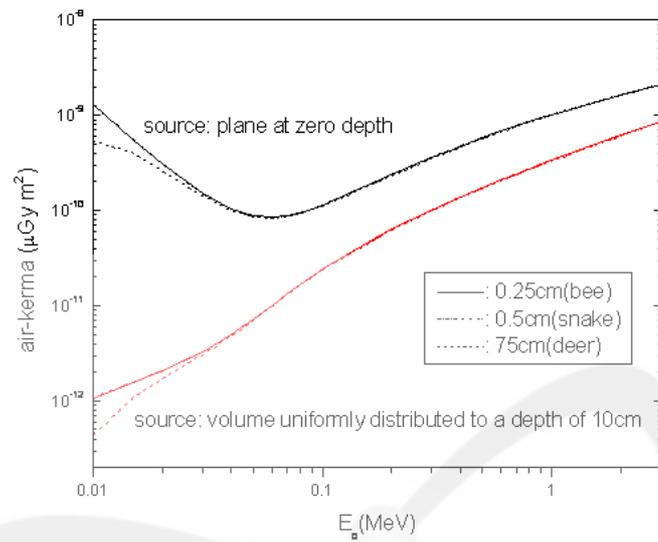


그림 9 MCNP 코드에 의해 구한 에너지별 air-kerma

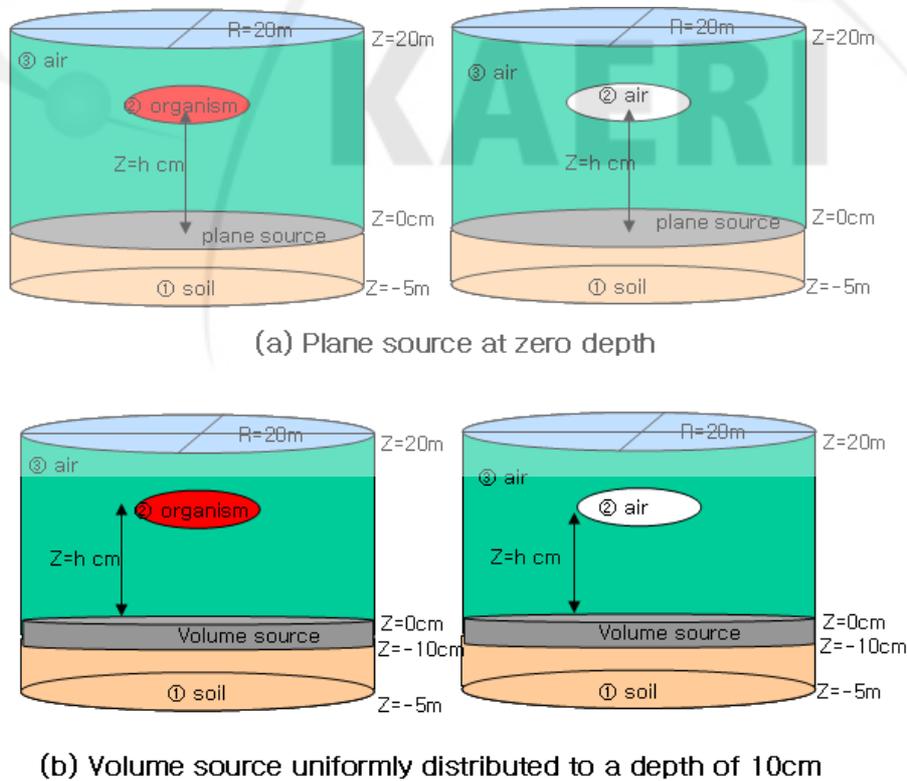


그림 10 r 값을 구하기 위한 MCNP 기하구조

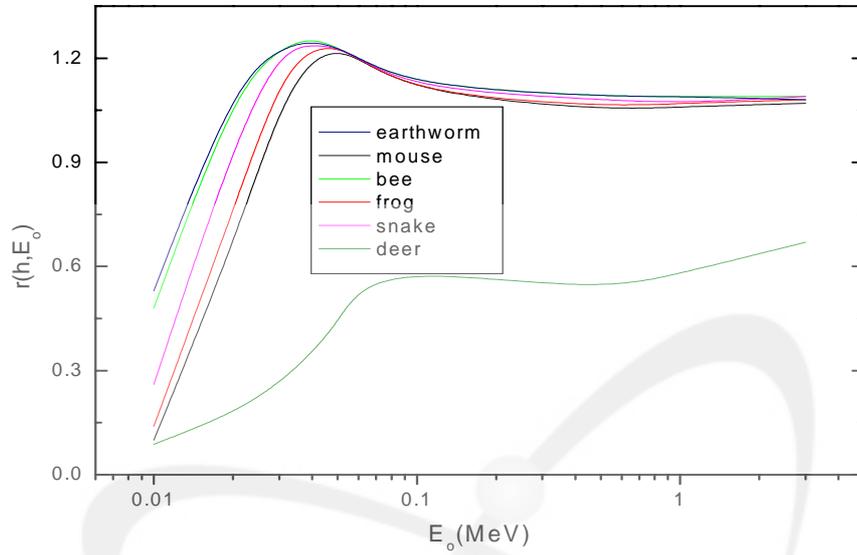


그림 11 Photon 방출 에너지 E_0 에 따른 지상 동물의 r 값
(plane source 와 volume source와 동일)

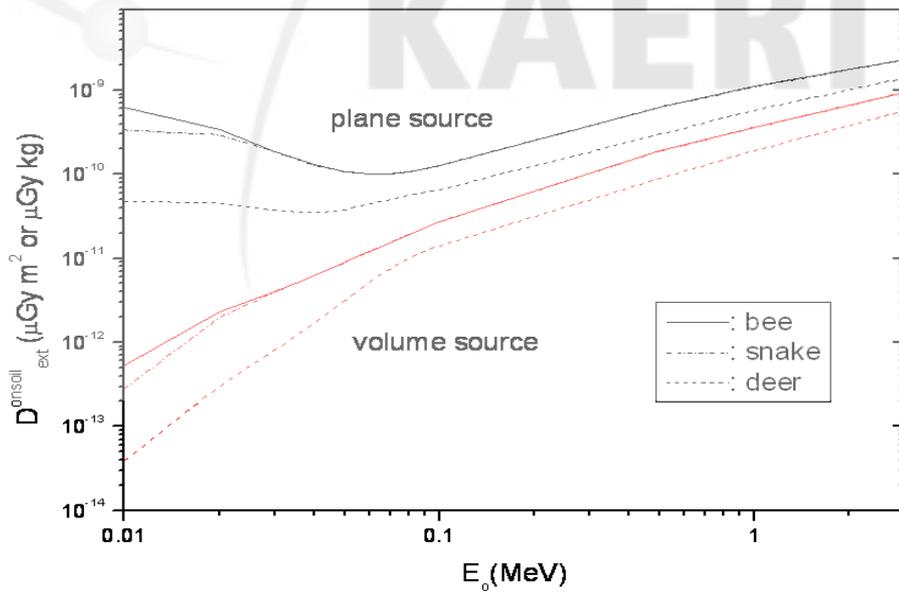


그림 12 Plane 및 volume source에 대한 지상동물의 에너지별 흡수선량

③ 지상식물 (on soil plant)

식물(나무)의 경우는 식물의 크기에 따라 herb(초목류), shrub(관목), tree(나무)로 크게 나눈다(그림 13). 높이에 따라 토양과 평행하게 존재하는 3 종류의 혼합(공기+식물) layer를 가정한다(Taranenko 등, 2004). 각 layer의 혼합 밀도와 높이는 layer1(herb), layer2(관목), layer3(교목)에 대해 각각 13.7, 3.4, 2.3 kg/m³, 0.1m, 0.9m, 9m로 가정한다. MCNP 코드를 이용한 물질조성을 위해 각 layer의 조성은 공기와 식물(물의 조성과 동일하다고 가정)의 혼합 밀도를 고려하여 하였다. 지상 식물의 MCNP 모사 조건은 다음과 같다.

- 모델 geometry는 수직 실린더이다.
- 수평 방향으로 무한 크기의 두 종류의 토양 source (plane 및 volume)를 고려하였다. (실제 계산시 1.4km의 반지름 적용)
- target의 위치는 각 layer의 중심에 있으며 반지름 200m, 두께 1cm인 central core cell로 가정 (본 연구에서는 참조 동식물로 선정된 소나무에 대해서만 계산)
- 방사선 중 photon만 고려 (에너지 범위: 0.01MeV~5MeV)
- 토양의 깊이는 3m로 가정
- 토양 위는 식물의 높이에 따라 3종류의 공기와 식물의 혼합 layer가 존재
- F6 tally로부터 target cell의 흡수선량 계산

위의 가정으로부터 MCNP 코드에 의해 계산된 에너지별 소나무의 흡수선량을 그림 14에서 보여준다. 에너지가 증가할수록 흡수선량은 증가하며, plane source일 때가 volume source일 때 보다 흡수선량이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 토양 source의 self-shielding 효과 때문이다.

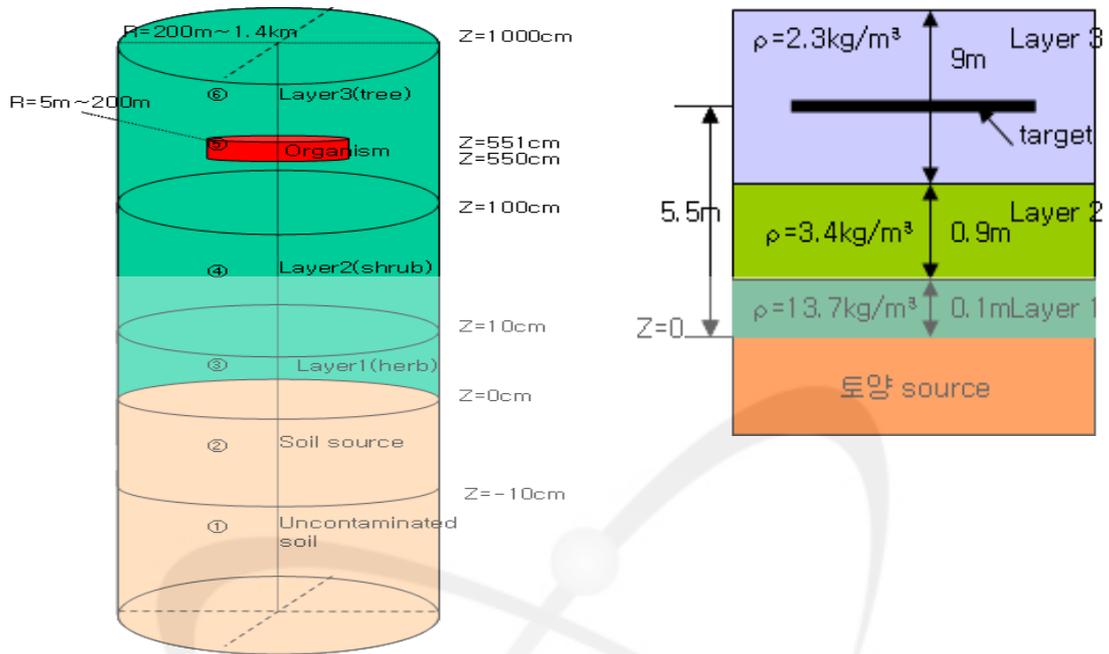


그림 13 지상식물의 MCNP 기하구조

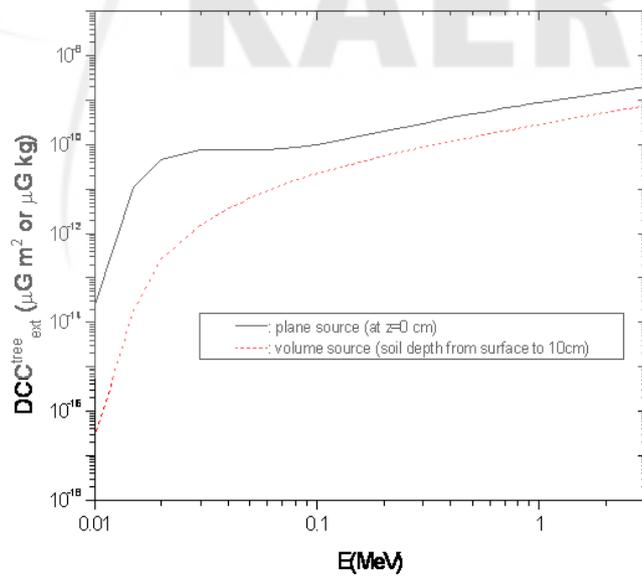


그림 14 소나무에 대한 에너지별 선향환산인자

5-3. 핵종별 국내 참조동식물 선량환산인자

1) 국내 참조동식물

선량환산인자를 구하기 위해서는 우선 참조 동식물의 기하학적 크기와 핵종이 정의되어야 한다. 경주 방사성폐기물처분장 주변 생태계를 참조 모형으로 표13과 같이 국내 참조동식물을 선정하였다. 등줄쥐는 토양 속 뿐 아니라 지표에서도 생활하고, 개구리는 물 및 지표에 생존한다.

표13 국내 참조동식물의 기하학적 모형¹⁾ 및 크기

참조동식물	크기 (cm)			air pocket	서식지
	major axis (a)	1st minor axis (b)	2nd minor axis (c)		
소나무 (아교목)	1000(800-1200)	30	30	-	on soil
등줄쥐	10 (9-12)	3	2.5	0.5cm	in soil, on soil
고라니	105(100-112)	50	50	-	on soil
청개구리	3.2(2.4-4)	3	2	-	water, on soil
살모사	85(80-90)	1	1	-	on soil, in soil
버들치	8(4-12)	3	1	-	water
벌	1.8(1.6-2)	0.5	0.5	-	on soil
(참)지렁이	9.5(9.3-10.5)	0.4	0.4	-	in soil

주): 1) 참조동식물의 기하학적 구조식: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$

2) 질량: $\frac{4}{3}\pi\rho abc$ (모든 참조동식물의 밀도(ρ)는 1g/cm^3 으로 가정)

2) 핵종

계산에 적용된 핵종은 경주 처분장 방사선환경조사계획서를 참조하여 선택하였다. 일반적으로 방사능 붕괴에 의해 딸핵종이 생기며 쉽게 반응평형에 도달하지 않는다. 고려된 핵종의 딸 핵종 중 생존기간이 짧은 것은 환경에서 쉽게 소멸되지만

환경에 존재하는 동안 동식물에 영향을 준다. 이 효과를 반영하기 위해 딸 핵종 중 반감기가 10일 이하인 것은 모핵종의 선량환산인자 계산시 해당 딸핵종의 방사선 효과를 추가로 고려하였다. 이 보다 반감기간 긴 딸핵종은 별도의 핵종으로 고려할 수 있다.

표 14 국내 참조 동식물 선량환산인자 계산에 적용된 핵종

핵종*	반감기	붕괴모드	반감기가 10일 이하인 딸핵종
Ba-140	12.74 days	β^-	La-140 (40.272 h)
Be-7	52.3 days	EC	-
C-14	5730 years	β^-	-
Ce-144	284.3 days	β^-	Pr-144 (17.28 min.), Pr144m (7.2min.)
Co-58	70.8 days	EC, β^+	-
Co-60	5.271 years	β^-	-
Cr-51	20.704 years	EC	-
Cs-134	2.062 years	EC, β^-	-
Cs-137	30 years	β^-	Ba-137m (2.552 min.)
Fe-59	44.529 days	β^-	-
H-3	12.35 years	β^-	-
I-129	1.57 e7 years	β^-	-
I-131	8.04 days	β^-	-
K-40	1.28e9 years	EC, β^-	-
La-140	40.272 hours	β^-	-
Mn-54	312.5 days	EC	-
Nb-95	35.15 days	β^-	-
Pu-239	24065 years	α	-
Pu-240	6537 years	α	-
Ru-106	368.2 days	β^-	Rh-106 (29.9 sec.) Y-90 (64 hours)
Sr-90	29.12 years	β^-	-
Tc-99	14.3 minutes	β^-	-
U-238	4.468e9 years	SF, α	-
Zn-65	243.9 days	EC, β^-	-
Zr-95	63.98 days	β^-	-

*경주 방사성폐기물 처분장 방사선 환경조사계획서

3) 컴퓨터 코드 K-BIOTA-DCC

국내 참조 동식물의 내외부 선량환산인자를 구하기 위한 컴퓨터 프로그램 K-BIOTA-DCC를 개발하였다. 표13의 8종류의 국내 참조동식물에 대한 표14의 25개 핵종의 내외부 선량환산률 구하는 프로그램의 구조는 그림15에서 보여준다. K-BIOTA-DCC 현재 version은 아래와 같은 총 38개의 입력데이터 파일과 선량환산인자 계산을 위한 FORTRAN source 프로그램 (dcc.for)과 입력데이터 파일로 이루어진다.

- 핵종붕괴 데이터 입력 파일 (31개)
'Ba140','Be7','C14', 'Ce144','Co58','Co60', 'Cr51','Cs134','Cs137'
'Fe59','H3','I129', 'I131','K40','La140', 'Mn54','Nb95','Pu239'
'Pu240','Ru106','Sr90', 'Tc99','U238','Zn65', 'Zr95','Pr144','Ba137m'
'Rh106','Y90','Pr144m', 'Nb95m'
- 내부선량환산인자 계산에 사용되는 파일 (5개)
 - csda_e_int.inp: 전자의 물에서의 CSDA (continuous slow down approximation) (그림4)
 - mfp_int.inp : photon의 물에서의 평균이동거리(mean free path) (그림4)
 - paise_int.inp : 전자의 모노에너지별, target 질량별 에너지 흡수율 (표10)
 - paisp_int.inp : photon의 모노에너지별, target 질량별 에너지 흡수율(표11)
 - K_organ_int.inp : target organism의 크기 파일 (표13)
- 외부선량환산인자 계산에 사용되는 입력데이터 (2개)
 - K_insoil_ext.inp: 지중동물의 target organism 크기, 해당 동물의 모노에너지별 침착에너지(deposition energy) (D_{ext}^{insoil} 로 표기) (그림7)
 - K_onsoil_ext.inp: 지상 동식물의 target organism 크기, 해당 동물의 위치에 해당 되는 높이에서의 air-kerma (K_{air}), target과 동일한 위치에서 동일한 크기의 air cell과 target의 흡수에너지 비(r) (각각 그림9 및 그림11)

위의 입력 데이터 중 핵종별 방출에너지와 수율 데이터는 ICRP38로부터, csda,와 mph는 미국 NIST로부터 인용하였다(그림14). paise, paisp, D_{ext}^{insoil} , K_{air} , r은 organism specific 데이터로 5-2절에서 기술된 방법으로 계산되었다. 내부선량환산인자 및 수계 동물의 외부선량환산인자는 각각 식(5-1)과 식(5-2)으로부터, 육상생태계의 지중

동물의 외부선량환산인자와 지상동식물의 외부선량환산인자는 각각 다음의 식(5-11)과 식(5-12)로부터 구한다.

$$D_{ext} = \sum_i D_{ext}^{insoil}(i) Y(i) \quad (\text{지중동물}) \quad (5-11)$$

$$D_{ext} = \sum_i D_{ext}^{onsoil}(i) Y(i) \quad (\text{지상 동식물}) \quad (5-12)$$

K-BIOTA-DCC에 의해 계산된 국내 참조동식물의 핵종별 내외부 선량환산인자는 표 15~표20에 요약하였다. 외부선량환산인자는 다음과 같이 각 동식물의 거주 형태에 따라 구분하였다.

- 지중동물: 지렁이, 살모사, 등줄쥐 (표17)
- 지상동물: 지렁이, 살모사, 등줄쥐, 고라니, 벌, 개구리 (표18, 표19)
- 지상식물: 소나무 (표20)

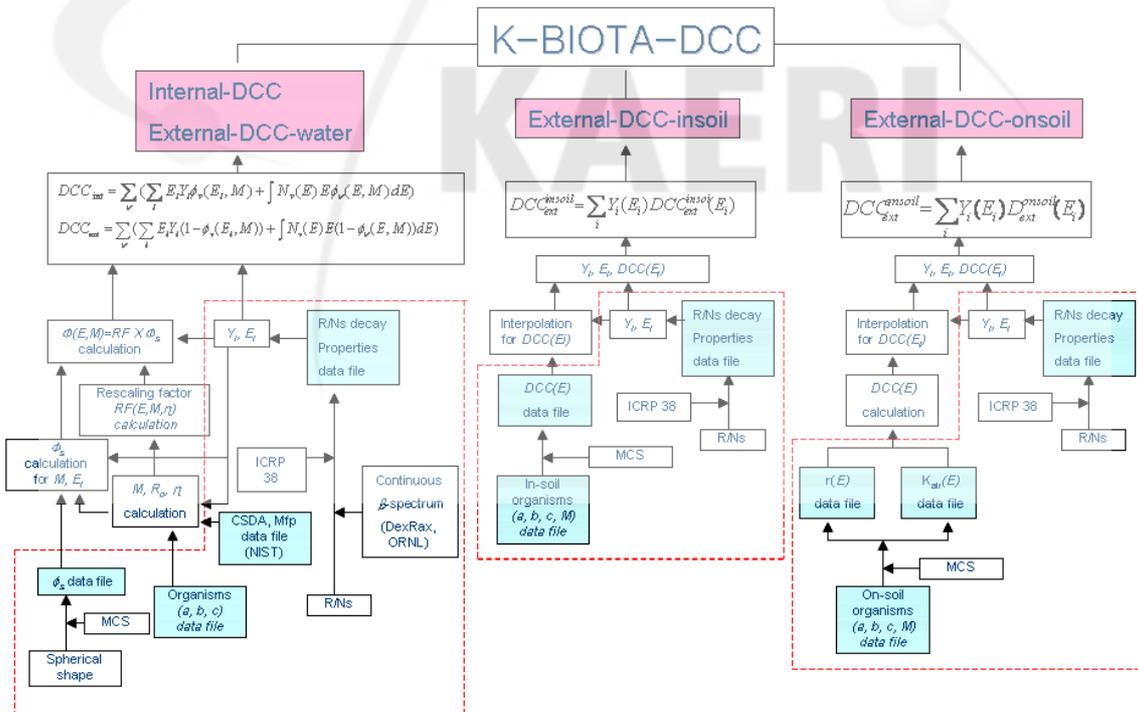


그림 15 국내 참조 동식물의 내외부 선량환산인자를 구하기 위한 컴퓨터 코드 K-BIOTA-DCC의 구조

표 15 국내 참조 동식물의 내부선량환산인자

R/N	별	지렁이	개구리	등줄쥐	뱀	노루	버들치	소나무	소나무 (ICRP)
Ba140	8.20E-03	7.90E-03	1.20E-02	1.20E-02	1.00E-02	2.80E-02	1.10E-02	2.40E-02	3.20E-02
Be7	4.60E-06	5.20E-06	2.20E-05	2.70E-05	1.40E-05	3.70E-04	1.70E-05	2.90E-04	
C14	6.70E-04	6.80E-04							
Ce144	7.60E-03	7.50E-03	1.50E-02	1.50E-02	1.20E-02	1.90E-02	1.30E-02	1.90E-02	1.80E-02
Co58	5.20E-04	5.30E-04	8.70E-04	9.80E-04	7.40E-04	7.30E-03	7.90E-04	5.80E-03	1.00E-02
Co60	1.40E-03	1.50E-03	2.20E-03	2.40E-03	1.90E-03	1.70E-02	2.00E-03	1.40E-02	1.80E-02
Cr51	6.90E-05	7.00E-05	8.20E-05	8.50E-05	7.70E-05	3.10E-04	7.90E-05	2.60E-04	
Cs134	2.10E-03	2.10E-03	2.80E-03	3.00E-03	2.50E-03	1.30E-02	2.70E-03	1.10E-02	1.40E-02
Cs137	2.90E-03	2.80E-03	3.60E-03	3.70E-03	3.40E-03	7.80E-03	3.50E-03	6.80E-03	7.80E-03
Fe59	1.60E-03	1.60E-03	2.00E-03	2.10E-03	1.90E-03	9.40E-03	1.90E-03	7.50E-03	
H3	7.90E-05								
I129	8.90E-04	8.90E-04	9.30E-04	9.40E-04	9.10E-04	1.20E-03	9.20E-04	1.10E-03	1.20E-03
I131	2.40E-03	2.30E-03	2.70E-03	2.80E-03	2.60E-03	5.50E-03	2.70E-03	4.90E-03	5.90E-03
K40	4.40E-03	4.10E-03	6.60E-03	6.70E-03	5.80E-03	8.10E-03	6.30E-03	7.90E-03	9.00E-03
La140	4.70E-03	4.50E-03	7.50E-03	7.80E-03	6.40E-03	2.20E-02	7.00E-03	1.90E-02	2.20E-02
Mn54	1.20E-04	1.40E-04	3.90E-04	4.80E-04	2.80E-04	5.90E-03	3.30E-04	4.50E-03	
Nb95	6.60E-04	6.80E-04	9.20E-04	1.00E-03	8.20E-04	6.00E-03	8.60E-04	4.80E-03	6.30E-03
Pu239	7.20E-02	7.10E-02							
Pu240	7.20E-02								
Ru106	6.10E-03	6.00E-03	1.50E-02	1.50E-02	1.00E-02	2.10E-02	1.30E-02	2.10E-02	2.10E-02
Sr90	7.80E-03	7.60E-03	1.30E-02	1.40E-02	1.10E-02	1.50E-02	1.20E-02	1.50E-02	1.60E-02
Tc99	1.30E-03	1.30E-03	1.40E-03						
U238	5.90E-02	5.80E-02							
Zn65	1.50E-04	1.70E-04	3.40E-04	4.00E-04	2.70E-04	4.00E-03	3.00E-04	3.10E-03	6.00E-03
Zr95	1.60E-03	1.60E-03	1.90E-03	2.00E-03	1.80E-03	6.80E-03	1.80E-03	5.60E-03	7.20E-03

표 16 수계 동물의 외부선량환산인자

R/N	개구리	버들치
Ba140	1.40E-03	1.50E-03
Be7	2.70E-05	2.80E-05
C14	1.70E-08	1.70E-08
Ce144	1.80E-04	2.60E-04
Co58	5.40E-04	5.50E-04
Co60	1.40E-03	1.40E-03
Cr51	1.80E-05	1.80E-05
Cs134	8.70E-04	8.80E-04
Cs137	3.40E-04	3.40E-04
Fe59	6.70E-04	6.70E-04
H3	0.00E+00	1.10E-18
I129	1.20E-05	1.30E-05
I131	2.10E-04	2.20E-04
K40	1.20E-04	1.30E-04
La140	1.30E-03	1.30E-03
Mn54	4.70E-04	4.70E-04
Nb95	4.30E-04	4.30E-04
Pu239	2.00E-07	2.50E-07
Pu240	4.50E-07	5.60E-07
Ru106	3.10E-04	4.10E-04
Sr90	9.00E-05	1.40E-04
Tc99	4.20E-07	4.30E-07
U238	3.30E-07	4.20E-07
Zn65	3.30E-04	3.30E-04
Zr95	4.10E-04	4.20E-04

표 17 국내 지중 동물의 외부선량 환산인자

R/N	지렁이	뱀	여우	여우* (Taranenko et al)	쥐	개구리
Ba140	3.30E-02	3.00E-02	2.30E-02		3.10E-02	3.00E-02
Be7	6.40E-04	6.00E-04	4.40E-04		6.10E-04	6.00E-04
C14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00
Ce144	6.30E-04	5.90E-04	4.20E-04		6.00E-04	5.80E-04
Co58	1.30E-02	1.20E-02	8.90E-03		1.20E-02	1.20E-02
Co60	3.40E-02	3.10E-02	2.30E-02		3.20E-02	3.10E-02
Cr51	3.80E-04	3.60E-04	2.70E-04		3.70E-04	3.60E-04
Cs134	2.10E-02	2.00E-02	1.40E-02		2.00E-02	1.90E-02
Cs137	7.90E-03	7.40E-03	5.40E-03	5.04E-03	7.60E-03	7.30E-03
Fe59	1.60E-02	1.50E-02	1.10E-02		1.50E-02	1.50E-02
H3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00
I129	8.60E-05	7.40E-05	2.90E-05	2.64E-05	6.80E-05	6.80E-05
I131	4.80E-03	4.50E-03	3.30E-03	3.12E-03	4.60E-03	4.50E-03
K40	2.10E-03	1.90E-03	1.40E-03	1.42E-03	2.00E-03	1.90E-03
La140	3.10E-02	2.80E-02	2.10E-02		2.90E-02	2.80E-02
Mn54	1.10E-02	1.10E-02	7.70E-03		1.10E-02	1.00E-02
Nb95	1.00E-02	9.70E-03	7.00E-03		9.80E-03	9.50E-03
Pu239	2.30E-06	1.90E-06	5.30E-07	5.04E-07	1.40E-06	1.30E-06
Pu240	4.30E-06	3.60E-06	5.90E-07	3.60E-07	2.50E-06	2.30E-06
Ru106	2.60E-03	2.50E-03	1.80E-03		2.50E-03	2.50E-03
Sr90	4.20E-09	3.50E-09	5.00E-10	2.64E-10	2.40E-09	2.10E-09
Tc99	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00
U238	3.40E-06	2.70E-06	4.60E-07		1.90E-06	1.70E-06
Zn65	7.90E-03	7.30E-03	5.30E-03		7.40E-03	7.20E-03
Zr95	9.90E-03	9.30E-03	6.80E-03		9.40E-03	9.20E-03

표 18 국내 지상 동물의 외부선량환산인자 (plane source)

R/N	지렁이	벌	뱀	개구리	쥐	노루
Ba140	3.50E-04	2.30E-04	2.20E-04	2.20E-04	2.20E-04	1.20E-04
Be7	5.40E-06	5.40E-06	5.30E-06	5.20E-06	5.20E-06	2.60E-06
C14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ce144	1.20E-05	1.20E-05	1.10E-05	1.00E-05	9.80E-06	3.90E-06
Co58	1.90E-04	1.00E-04	1.00E-04	9.80E-05	9.70E-05	5.00E-05
Co60	2.20E-04	2.20E-04	2.20E-04	2.20E-04	2.20E-04	1.20E-04
Cr51	7.00E-06	6.60E-06	5.20E-06	4.40E-06	4.10E-06	2.00E-06
Cs134	1.60E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.50E-04	7.90E-05
Cs137	6.30E-05	6.30E-05	6.20E-05	6.10E-05	6.10E-05	3.10E-05
Fe59	1.10E-04	1.10E-04	1.10E-04	1.10E-04	1.00E-04	5.70E-05
H3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
I129	1.30E-05	1.30E-05	1.20E-05	1.10E-05	1.10E-05	2.50E-06
I131	4.30E-05	4.30E-05	4.30E-05	4.20E-05	4.20E-05	2.10E-05
K40	1.30E-05	1.30E-05	1.30E-05	1.30E-05	1.30E-05	7.10E-06
La140	3.20E-04	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-04	1.10E-04
Mn54	3.60E-04	8.30E-05	8.20E-05	8.20E-05	8.10E-05	4.20E-05
Nb95	7.80E-05	7.80E-05	7.70E-05	7.60E-05	7.50E-05	3.90E-05
Pu239	1.70E-06	1.60E-06	1.30E-06	9.60E-07	8.10E-07	1.90E-07
Pu240	4.20E-06	4.00E-06	3.10E-06	2.40E-06	2.00E-06	4.70E-07
Ru106	2.40E-05	2.10E-05	2.10E-05	2.10E-05	2.00E-05	1.00E-05
Sr90	4.10E-09	3.90E-09	3.10E-09	2.30E-09	2.00E-09	4.80E-10
Tc99	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
U238	3.70E-06	3.60E-06	2.70E-06	2.00E-06	1.70E-06	4.00E-07
Zn65	6.70E-05	6.60E-05	5.90E-05	5.60E-05	5.50E-05	2.90E-05
Zr95	7.60E-05	7.60E-05	7.50E-05	7.40E-05	7.30E-05	3.80E-05

표 19 국내 지상 동물의 외부선량환산인자 (volume source)

R/N	지렁이	벌	뱀	개구리	쥐	노루
Ba140	1.20E-02	1.20E-02	1.20E-02	1.20E-02	1.20E-02	6.40E-03
Be7	2.60E-04	2.60E-04	2.50E-04	2.50E-04	2.50E-04	1.20E-04
C14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ce144	2.60E-04	2.60E-04	2.60E-04	2.50E-04	2.50E-04	1.30E-04
Co58	5.00E-03	5.00E-03	4.90E-03	4.90E-03	4.80E-03	2.50E-03
Co60	1.20E-02	1.20E-02	1.20E-02	1.20E-02	1.20E-02	6.50E-03
Cr51	1.60E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.60E-04	8.00E-05
Cs134	8.00E-03	8.00E-03	7.90E-03	7.80E-03	7.80E-03	4.00E-03
Cs137	3.10E-03	3.10E-03	3.00E-03	3.00E-03	3.00E-03	1.50E-03
Fe59	5.90E-03	5.90E-03	5.80E-03	5.80E-03	5.70E-03	3.10E-03
H3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
I129	4.60E-05	4.60E-05	4.60E-05	4.30E-05	4.00E-05	9.80E-06
I131	2.00E-03	2.00E-03	2.00E-03	1.90E-03	1.90E-03	9.60E-04
K40	7.50E-04	7.50E-04	7.40E-04	7.40E-04	7.30E-04	4.00E-04
La140	1.10E-02	1.10E-02	1.10E-02	1.10E-02	1.10E-02	5.90E-03
Mn54	4.30E-03	4.30E-03	4.20E-03	4.20E-03	4.10E-03	2.20E-03
Nb95	3.90E-03	3.90E-03	3.90E-03	3.90E-03	3.80E-03	2.00E-03
Pu239	1.10E-06	1.10E-06	8.90E-07	7.30E-07	6.50E-07	2.10E-07
Pu240	2.30E-06	2.20E-06	1.80E-06	1.40E-06	1.20E-06	2.90E-07
Ru106	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	5.10E-04
Sr90	2.20E-09	2.10E-09	1.70E-09	1.20E-09	1.10E-09	2.60E-10
Tc99	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
U238	1.70E-06	1.70E-06	1.30E-06	1.00E-06	8.60E-07	2.20E-07
Zn65	2.90E-03	2.90E-03	2.80E-03	2.80E-03	2.80E-03	1.50E-03
Zr95	3.80E-03	3.80E-03	3.80E-03	3.70E-03	3.70E-03	1.90E-03

표 20 국내 소나무의 외부선량환산인자

R/N	Plane source $\mu\text{Gy/d per Bq/m}^2$	Volume source $\mu\text{Gy/d per Bq/kg}$
Ba140	1.80E-04	9.60E-03
Be7	4.20E-06	2.00E-04
C14	0.00E+00	0.00E+00
Ce144	6.50E-06	2.00E-04
Co58	7.90E-05	3.90E-03
Co60	1.80E-04	9.60E-03
Cr51	2.80E-06	1.30E-04
Cs134	1.30E-04	6.30E-03
Cs137	5.00E-05	2.40E-03
Fe59	8.80E-05	4.60E-03
H3	0.00E+00	0.00E+00
I129	5.00E-06	2.00E-05
I131	3.30E-05	1.50E-03
K40	1.10E-05	5.90E-04
La140	1.70E-04	8.80E-03
Mn54	6.70E-05	3.30E-03
Nb95	6.20E-05	3.10E-03
Pu239	8.00E-08	2.30E-07
Pu240	1.90E-07	2.00E-07
Ru106	1.70E-05	8.10E-04
Sr90	1.60E-10	1.00E-10
Tc99	0.00E+00	0.00E+00
U238	1.30E-07	1.40E-07
Zn65	4.40E-05	2.30E-03
Zr95	6.00E-05	3.00E-03

6. 결 론

환경방호를 위한 비인간종 방사선 방호 연구는 지난 수년간 세계적으로 많은 연구가 진행되어 괄목할 만한 성과를 이루었지만 부족한 데이터, 본질적인 생태계의 복잡성으로 인해 국제적으로 합의되고 통일된 환경방호 기준과 방법론은 아직까지 정립되지는 않고 있다. 현재 국제적 기준 도출을 위한 연구가 ICRP나 IAEA를 통해 활발하게 진행되고 있으므로 가까운 장래에 국제적으로 합의된 기준이 제시될 것으로 보이고 이에 따라 ICRP 신권고 개념이 확정되고 회원국에 권고될 것으로 보인다. 우리나라도 결국 ICRP 신권고에 부합되는 규제 제정과 함께 비인간종에 방사선 영향평가가 규정으로 도입될 것으로 전망된다.

본 보고서에서 제시한 국내 참조동식물의 내외부선량환산인자는 현재 중장기연구개발 사업으로 개발 중인 국내 비인간종 선량평가 도구 K-BIOTA의 핵심 요소기술의 하나로 개발되었으며 현재 본 연구에서 적용한 방법론의 검증을 위해 국제원자력위원회 (IAEA)가 주관하여 수행중인 국제공동연구 EMRAS (Environmental Modeling for Radiation safety)에 참가하고 있다. 본 보고서에 제시된 국내 참조동식물 내외부 선량환산인자 계산을 위한 방법론과 핵종별 선량환산인자는 향후 국내 비인간종 선량평가 체계 구축을 위한 매우 소중한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

KAERI

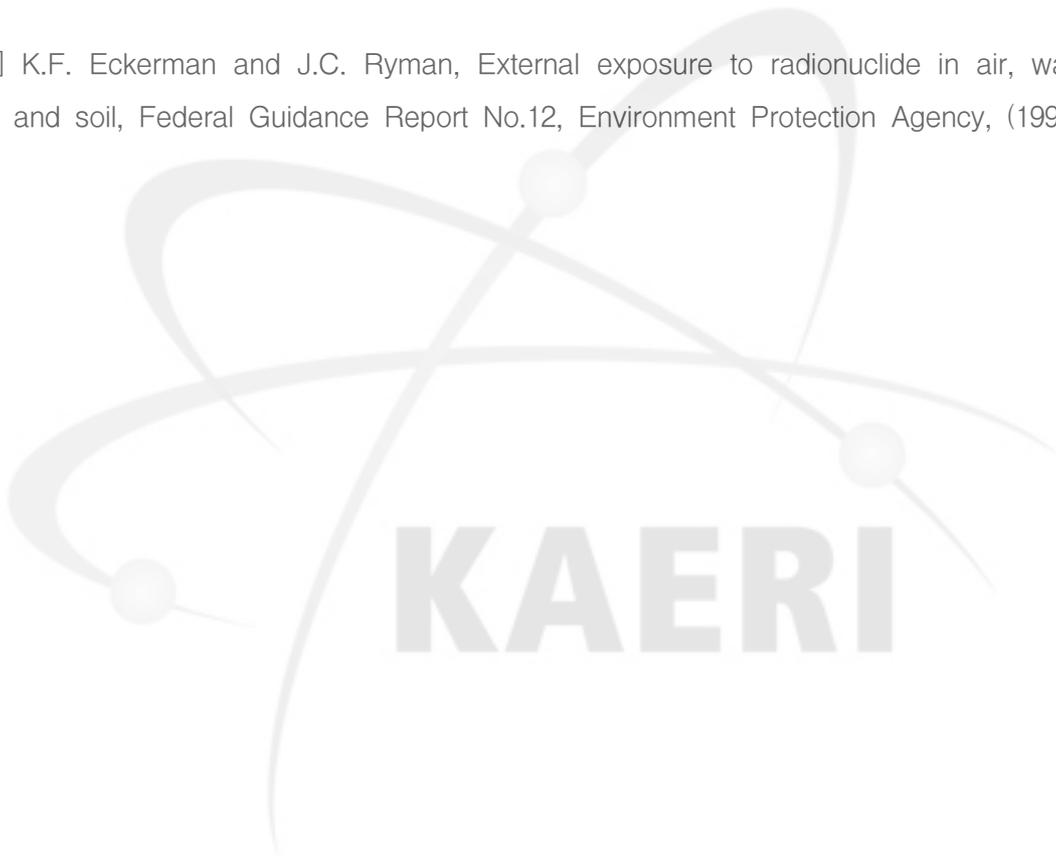
참고문헌

- [1] UNCED, United Nations Conference on Environment and Development, Rio declaration on environment and development, 1992.
- [2] ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 26. Pergamon Press, Oxford, 1977.
- [3] ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, Annals of the ICRP 21, Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [4] ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 91, Pergamon Press, Oxford, 2003.
- [5] ICRP, The concept and use of reference animals and plants for the purposes of environmental protection (draft for discussion), Publication XX1, Annals of the ICRP, 2005.
- [6] IAEA, Environmental Modeling for Radiation Safety (EMRAS), <http://www-ns.iaea.org/projects/emras/>,
<http://www-ns.iaea.org/projects/emras/emras2/default.htm>
- [7] Coppelstone D., Bielby S., Jones SR, Patton D., Daniel CP, Gize I., Impact assessment of ionizing radiation on wildlife, R&D Publication 128, Environment Agency and English Nature, Bristol, 2001.
- [8] FASSET, Deliverable 1: Identification of candidate reference organisms from a radiation exposure pathways perspective, November, 2001.
- [9] FASSET, Deliverable 2, Part 1: Formulating the FASSET assessment context, December 2002.

- [10] FASSET, Deliverable 2, Part 2: Overview of programmes for the assessment of risks to the environment from ionising radiation and hazardous chemicals, December, 2002.
- [11] FASSET, Deliverable 3: Dosimetric models and data for assessing exposures to biota, June 2003.
- [12] FASSET, Deliverable 4: Radiation effects on plants and animals, June 2003.
- [13] FASSET, Deliverable 5: Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment, October 2003.
- [14] EPIC, Deliverable 1: Reference Arctic organisms, November 2001.
- [15] EPIC, Deliverable 2: Transfer and uptake models for reference Arctic organisms, September 2002.
- [16] EPIC, Deliverable 3: Currently available internal and external dose models, May 2003.
- [17] EPIC, Deliverable 4: Internal and external dose models, August 2003.
- [18] EPIC, Deliverable 6: The "EPIC" impact assessment framework: Towards the protection of the Arctic environment from the effects of ionising radiation, December 2003.
- [19] ERICA, ERICA project home, <http://www.ERICA-project.org/>
- [20] DOE, Interagency Steering Committee on Radiation Standards –RESRAD–BIOTA User guide, Version 1. A tool for implementing a graded approach to biota dose evaluation, Technical Report 2004-02, US DOE/EH-0676, January 2004.
- [21] 환경부, 한국고유생물종도감, 환경부, 2005.

- [22] B.D. Amiro, "Radiological Dose Conversion Factors for Generic Non-human Biota used for Screening Potential Ecological Impacts," *J. Environmental Radioactivity*, Vol.35, No.1, p37–51, (1997).
- [23] J. Vivies i Batlle, M. Balonov, K. Beaugelin–Seiller, N.A. Bresford, J. Brown, J–J. Cheng, D. Coppelstone, M. Doi, V. Filistovic, V. Golikov, J. Horyna, A. Hosseini, B.J. Howard, S.R. Jones, S. Kamboj, A. Kryshev, T. Nedvechaite, G. Olyslaegers, G. Proel, T. Sazykina, A. Ulanovsky, S. Vivis Lynch, T. Yankovich, C. Yu, "Inter-comparison of Absorbed Dose Rates for Non-human Species," *Radiat. Environ. Biophys*, 46, 349–373, (2007).
- [24] A. Ulanovsky, G. Pröhl, "A Practical Method for Assessment of Dose Conversion Coefficients for Aquatic Biota," *Radiat. Environ. Biophys.*, Vol.45, p203–214, (2006).
- [25] M.J. Berger, "ESTER, PSTAR, and ASTAR: computer programs for calculating stopping-power and range tables for electron, photons, and helium ions," National Institute of Standards and Technology Report NISTER 4999. NIST, Gaithersburg, MD (1999). <http://www.physics.nist.gov/Star/>
- [26] J.R. Hubbel and S.M. Seltzer, "Tables X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1keV to 20MeV for elements Z=1–92 and 48 additional substances of dosimetric interest," National Institute of Standards and Technology Report NISTER 5632. NIST, Gaithersburg, MD (1995). <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>
- [27] ICRP, *Recommendations of the ICRP*, Publication 103, (2008).
- [28] ICRP, *Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions*, Publication 38, (1983).
- [29] K.F. Eckerman, R.J. Westfall, J.C. Ryman, M. Cristy, "Availability of Nuclear Decay Data in Electronic Form, including Beta Spectra not Previously Published," *Health Phys*, 67(4), p338–345, (1994).

- [30] V. Taranenko, G. Pröhl, J.M. Comez-Ros, "Absorbed Dose Rate Conversion Coefficients for Reference Terrestrial Biota for External and Internal exposures," *J. Radiol. Prot.*, Vol.24, A35-A62, (2004).
- [31] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues, ICRU report, (1992).
- [32] K.F. Eckerman and J.C. Ryman, External exposure to radionuclide in air, water and soil, Federal Guidance Report No.12, Environment Protection Agency, (1993).



서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-3767/2009			
제목 / 부제			
국내 참조동식물 내외부 선량환산인자			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	금동권 (원자력환경안전연구부)		
연구자 및 부서명	전인, 임광묵, 박두원, 최용호 (원자력환경안전연구부)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	52 p.	도표	있음(O), 없음()
참고사항			
비밀여부	공개(O), 대외비(), __ 급비밀	보고서종류	TR
연구위탁기관			계약번호
초록 (15-20줄내외)			
<p>비인간종에 대한 환경방사선의 방사선적 영향 평가를 위한 필수 구성요소인 참조동식물의 내외부선량환산인자를 본 보고서에서 제시한다. 내부선량환산인자는 isotropic 모델을, 외부선량환산인자는 불균일 환경미디움에서 photon 이동을 모사하기 위해 몬테칼로법을 각각 적용하여 구하였다. 모델링을 위하여 모든 참조동식물은 3차원 타원체로 가정되었다. 외부선량환산인자 계산을 위해 수중 동물에 대해서는 무한크기의 오염된 물이, 땅위에 사는 지상동물의 경우는 무한크기의 오염토양, 땅속에 사는 지중동물의 경우는 수평방향으로 무한크기의 토양 속 깊이 50cm까지 오염된 토양이 외부 방사선원으로 가정되었다. 8개 종류위 국내 참조동식물(쥐, 노루, 개구리, 뱀, 버들치, 벌, 지렁이, 소나무)에 대한 내외부선량환산인자가 경주 방사성폐기물 처분장 환경모니터링 대상 25개 핵종 (^3H, ^7Be, ^{14}C, ^{40}K, ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{90}Sr, ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{99}Tc, ^{106}Ru, ^{129}I, ^{131}I, ^{136}Cs, ^{137}Cs, ^{140}Ba, ^{140}La, ^{144}Ce, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu)에 대해 계산되었다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)			
내외부 선량환산인자, 비인간종, 몬테칼로법, Isotropic모델			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-3767/2009			
Title / Subtitle			
Internal and external dose conversion coefficient for domestic reference animals and plant			
Project Manager and Department (or Main Author)		Dong-Kwon Keum, Nuclear Environmental Safety Research Division	
Researcher and Department		In Jun, Kwang-Muk Lim, Du-won Park, Young-Ho Choi	
(Nuclear Environmental Research Division)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI
			Publication Date
			Aug, 2009
Page	52 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()
			Size
			Cm.
Note			
Classified	Open(O), Restricted(), ___ Class Document	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract			
<p>This report presents the internal and external dose conversion coefficients for domestic reference animals and plant, which are essential to assess the radiological impact of an environmental radiation on non-human species. To calculate the dose conversion coefficients, a uniform isotropic model and a Monte Carlo method for a photon transport simulation in environmental media with different densities have been applied for aquatic and terrestrial animals, respectively. In the modeling all the target animals are defined as a simple 3D elliptical shape. To specify the external radiation source it is assumed that aquatic animals are fully immersed in infinite and uniformly contaminated water, and the on-soil animals are living on the surface of a horizontally infinite soil source, and the in-soil organisms are living at the center of a horizontally infinite and uniformly contaminated soil to a depth of 50cm. A set of internal and external dose conversion coefficients for 8 Korean reference animals and plant (rat, roe-deer, frog, snake, Chinese minnow, bee, earthworm, and pine tree) are presented for 25 radionuclides (^3H, ^7Be, ^{14}C, ^{40}K, ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{90}Sr, ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{99}Tc, ^{106}Ru, ^{129}I, ^{131}I, ^{136}Cs, ^{137}Cs, ^{140}Ba, ^{140}La, ^{144}Ce, ^{238}U, ^{239}Pu, and ^{240}Pu).</p>			
Subject Keywords: internal and external dose conversion coefficient, non-human species, Monte-Carlo method, isotropic model			