

단계적 야생동식물 선량평가 코드 K-BIOTA의 특성 및 적용

금동권, 전 인, 임광묵, 최용호, 김병호
한국원자력연구원

2015년 9월 10일 접수 / 2015년 10월 22일 1차 수정 / 2015년 11월 5일 2차 수정 / 2015년 11월 10일 채택

본 논문은 ICRP103 환경방호를 대비하여 국내에서 개발된 야생동식물 선량평가 코드 K-BIOTA의 기술적 배경 및 적용 사례를 기술한다.

K-BIOTA는 스크리닝(screening) 선량평가(Level 1&2)와 부지 특성적 상세평가(Level 3)의 3단계의 단계적 평가방법을 적용한다. 스크리닝 단계평가는 상세평가의 필요성 여부를 판단하기 위한 예비적 평가 단계로 개별적인 생물종보다는 동식물을 그룹별로 구분하여 평가한다. Level 1 평가는 스크리닝 목적의 참조준위로부터 유도된 최대환경매체농도 값과 실제 환경매체농도 값의 비교로부터 위험도 지표(risk quotient)를 계산한다. Level 1 평가 결과 위험도 지표가 1보다 작으면 생태계의 건전성이 유지된다는 결론과 함께 평가를 종료하고, 1 보다 크면 동식물 그룹별로 평균적인 전이계수나 평형분배계수 값을 적용하여 조금 더 실제적인 Level 2 평가를 수행한다. 따라서 Level 2 평가가 Level 1 평가보다 덜 보수적이다. Level 2 평가에서 위험도지표가 1 보다 작으면 생태계의 건전성이 유지된다는 결론을 내리고 평가를 종료하고, 1보다 크면 Level 3 평가를 수행한다. Level 3 평가는 부지 특성적 데이터를 고려하는 상세평가단계로, 동식물 그룹별 평가 대신 부지 대표적 동식물에 대한 개별적 선량평가를 수행하며, 대표적 동식물의 종류 및 크기, 거주인자, 전이계수, 평형분배계수에 대한 부지 특성적인 값을 사용한다. 또한 Level 3 평가 단계에서는 전이계수, 평형분배계수, 환경매체농도 (토양농도 또는 물의 농도)에 대한 개별 동식물의 피폭 선량률에 대한 불확실도 분석을 선택적으로 수행할 수 있다. 적용 가능한 확률밀도함수는 정규분포, 로그정규분포, 균일분포, 지수분포의 4가지이다. 국제원자력기구의 EMRAS II (Environmental Modeling for Radiation Safety) 모델 시나리오 비교 공동연구에 참가하여 K-BIOTA의 적용성을 검증하였다. 그 결과로 K-BIOTA는 다양한 오염 환경에서 거주하는 야생동식물의 방사선 영향을 평가하는데 유용함이 입증되었다.

중심어 : ICRP103, 환경방호, 단계적 선량평가, K-BIOTA, 야생동식물

1. 서론¹⁾

건강하고 깨끗한 환경을 후손에게 물려주자는 유엔환경회의(UNCED)의 브라질 리오선언 이후 원자력이용으로부터 환경방호는 방사선방호 분야에서 핵심 주제가 되고 있다 (Table 1 참조).

국제방사선방호위원회(ICRP)는 전리방사선으로부터 환경을 보호하기 위한 기본 철학 및 방향을 Publication 103 [1]에 기술하고, Publication 108 [2] 에 비인간종 선량평가를 위한 방법론으로 참조동식물(reference animals and plants) 개념을, Publication 114 [3] 에서 참조 동식물 전이계수를, Publication 124 [4]에서 피폭상황 별 환경방호 적용 방법론을 제시하고 있다. 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)는 전리방사선에 의한 비인간종 방사선 영향 평가의 배경 및 기술현황을 종합적으로 정

리하였으며 [5,6], 2012~2013년에는 국제 전문가 그룹을 구성하여 후쿠시마 사고 방사선 영향평가를 수행하였다 [7].

국제원자력기구(IAEA)는 스톡홀름 국제 학술회의 [10]에서의 국제적 합의를 바탕으로 방사선 환경방호를 위한 IAEA의 행동계획을 수립하였다. 이 행동계획의 목적은 방사선 환경방호를 위한 현재의 기술적 능력 강화를 위해 회원국 간의 공동사업을 촉진시키고 회원국들의 환경방호 노력을 지원하는데 있다. IAEA는 현재 생태환경의 모델비교 공동연구를 위해 MODARIA (Model and Data for Risk Impact Assessment) 프로젝트를 진행하고 있다. 동 프로젝트는 ICRP 103 신권고 이 후 방사선 환경방호를 위한 실제적 평가 방법 모색이 핵심 주제이다. 2014년 발간된 IAEA의 Basic Safety Standard [12]에는 환경방호에 대한 기술기준이 제시되어 있으며, 최근 관련 지침이 개발되고 있다. 사람에 대한 일반적 선량평가 방법론을 제시하는 IAEA 보고서[13]가 현재 개정 중

책임저자 : 금동권, dkkeum@kaeri.re.kr
대전 유성구 대덕대로 989-111, 한국원자력연구원

Table 1. Current Technology Status of Environmental Protection.

Organization/ country	Status
ICRP	- ICRP 103 [1], ICRP 108 [1], ICRP 114 [3], ICRP 124 [4]
UNSCEAR	- 1996 UNSCEAR Report: Effects of radiation on the environment [5] - 2008 UNSCEAR Report: Effects of ionizing radiation on non-human biota [6] - 2003 UNSCEAR Report: Radiation exposure due to Fukushima accident [7]
IAEA	- TECDOC-1091 [8], TECDOC-1270 [9] - Stockholm conference [10] - Basic Safety Fundamentals [11], BSS [12] - International Joint Program: EMRAS, EMRAS II, MODARIA [http://www-ns.iaea.org/projects/modaria] - IAEA SRS19 [13] revision: for the application to the planned exposure
USA	- US DOE Order 458.1 (Radiation protection of the Public and the Environment) - US DOE-STD-1153-2002 (RESRAD-BIOTA: A graded approach for evaluating radiation doses to biota) [14] - NUREG-1555 [15]: Require the impact of ionizing radiation on non-human biota in the context of the generic requirements for environmental reviews for nuclear power plants.
EU	- COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM (5 December 2013): this calls for a policy protecting the environment against the harmful effects of ionizing radiation - FASSET project, ERICA project [http://www.ERICA-project.org/], EPIC project, PROTECT project [http://wiki.ceh.sc.uk/display/rpmain/protect/] - European Radioecology Alliance start [http://www.star-radioecology.org/]
Japan	- Organization of new nuclear regulation authority (NRA) - Addition of environmental protection as one of goals in amended safety law (June, 2012)
Canada	- Canadian Environmental Protection Act [32]: Require the non-human biota radiation impact in environmental risk assessment
others	- Sweden, UK, Canada, Finland (radwaste disposal site)), Canada, Australia (uranium mine), China, UK (new nuclear power plant)

이며, 개정판에는 계획피폭 시 야생동식물 방사선 영향 평가가 새로이 포함될 예정이다.

미국의 전리방사선으로부터 환경방호는 US/DOE order 5400.5 및 5400.1에 근거를 두고 있다. 이들 규제법은 방사능 오염으로부터 주민 뿐 아니라 환경도 보호하는 것을 규정한다. 이 규정에 따라 DOE는 산하에 생물군 선량평가위원회(biota dose assessment committee)을 설치하고 전리방사선으로부터 생태계 선량평가를 위한 기술표준(DOE-STD-1153-2002)을 개발하였으며, 이의 결과로 탄생한 것이 RESRAD-BIOTA [14]이다. RESRAD-BIOTA는 단계적 평가법(graded approach)을 적용하여 미국 방사선방호규제위원회의 선량한도 기준을 만족하는가를 판단하기 위해 개발된 코드이다. 영국은 방사선 방호 측면보다는 자연보존 차원에서 전리방사선을 포함한 모든 환경 위해 인자로부터 환경을 보존하는 정책을 법적으로 규정하고 있다. 이를 위한 연구가 CEH (Center for Ecology and Hydrology)를 중심으로 활발하게 진행되고 있으며, 관리감독기관인 EA (Environmental Agency)도 규제 및 검증 차원의 연구를 수행하고 있다. 개발된 기술은 UK Natura 2000 site 환경평가에 적용하고 있다. 유럽연합은 비인간종 방사선 위해도 영향 평가를 위한 종합시스템 개발을 위해 EC EURATOM 연구개발 프로그램을 통해 FASSET (Framework for Assessment of Environmental Impact,

2000~2003) 프로젝트, 후속연구인 ERICA(Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management, 2004~2007) 프로젝트 [<http://www.ERICA-project.org/>], 노르웨이를 중심으로 북해지역의 생태 보전에 중점을 둔 EPIC (Environmental Protection from Ionizing Contaminants in the Arctic) 프로젝트, PROTECT (Protection of the Environment from Ionizing Radiation in a Regulatory Context) 프로젝트를 수행하였다. 2013년 유럽연합은 환경방호를 의무적으로 하도록 법을 개정하였다. 2011년 유럽의 8개 연구기관이 연합하여 European Radioecology Alliance를 결성하였으며 향후 15년간 핵심 연구주제로 주민 및 환경 방사선 통합방호기술 실용화, 야생동식물의 저선량 방사선 생물학적 특성 연구, 방사성물질 및 일반 독성물질의 혼합 위해도 평가 기술개발로 정하고 연구를 추진하기 시작하였다[<http://www.star-radioecology.org/>].

캐나다는 원자력시설 운영 및 관련 사업수행으로부터 주변 생태계가 건전하게 유지된다는 것을 입증하도록 법적으로 요구 한다 [16]. 환경평가를 위한 4가지 범주 (screening, comprehensive study, mediation, review panel)를 설정하고 캐나다규제위원회(CNSC)와 캐나다환경평가청(CEAA)이 협력하여 기술검토를 수행한다. 특히 우리나라 주변의 호수 및 생태계에 대한 방사선 영향평가를 다수 수행하였다. 스웨덴과 핀란드는 원자력시설

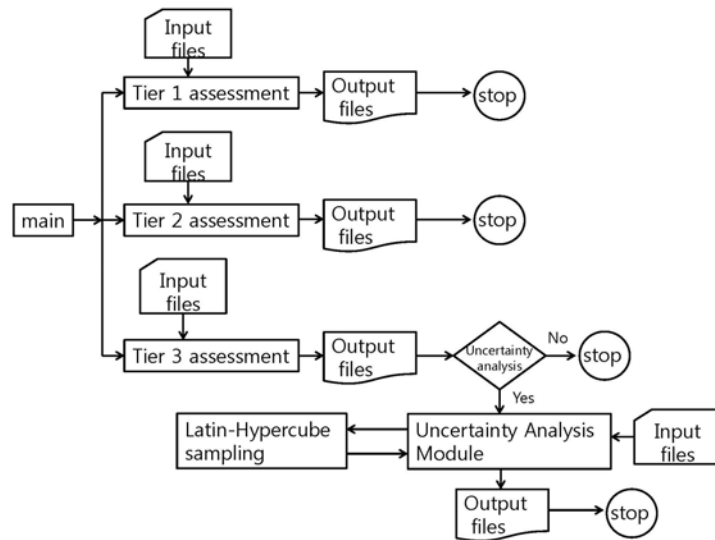


Fig. 1. Flowchart for the graded assessment of K-BIOTA.

Table 2. Input Parameters and Function According to Assessment Level.

Item	Level 1	Level 2	Level 3
Environmental medium concentration	Changeable	Changeable	Changeable
Organism	Fixed	Fixed	Changeable
Dose conversion coefficient	Fixed	Fixed	Changeable
CR and Kd	Fixed	Changeable	Changeable
Radiation weighting factor, Occupancy factor	Fixed	Fixed	Changeable
Uncertainty analysis	Not possible	Not possible	Possible

건설 및 운영으로 인한 주민 및 환경 방호를 위한 법적 체계를 가지고 있으며, 관련기술 개발은 EU 차원의 공동 연구를 통해 하고 있다. 특히 스웨덴의 경우 포스마르크 사용후핵연료 처분시설의 건설로 인한 장기 생태영향 평가를 수행하고 있다. 일본은 2011년 후쿠시마 사고 후원 자력안전 관리 및 규제를 향상하기 위해 새로운 규제기관(Nuclear Regulation Authority, NRA)을 설립하고 안전지침과 규제요건의 전면검토를 실시하였고, 신규제요건 및 법개정 (2012년 6월 공표)에서 안전 목표를 인간 외에 환경보호를 추가한 것이 핵심 사항이다. 이러한 국제적 환경에서 국내 독자적 생태계 선량평가 체계 구축을 통한 ICRP 103 환경방호를 대비하기 위하여 한국원자력연구원은 원자력중장기연구개발사업을 통해 미국, 유럽에 이어 아시아에서 최초로 생태계 선량평가코드(K-BIOTA)를 개발하였다. K-BIOTA는 육상생태계, 민물생태계, 해양생태계에 존재하는 야생 동식물의 방사선량을 계산하여 생태계의 건전성 여부를 판단하는 것을 주목적으로 개발되었다 [17]. 본 논문의 주 목적은 K-BIOTA의 이론적 배경과 적용 사례를 소개하는 것이다.

2. K-BIOTA의 단계적 선량평가 방법

미국의 RESRAD-BIOTA 코드 [14], EU의 EIRCA 코드 [18] 모두 3단계로 구성된 단계적 평가 방법론을 도입하

고 있다. 단계적 평가 방법론은 보수적 방법으로 평가를 우선 수행하고 정한 기준을 만족하지 못하면 보다 부지 특성자료를 사용한 상세한 평가를 추가로 수행하는 방식이며 국제적으로 통용되고 있는 방법이다. Fig. 1에 K-BIOTA에서 적용한 단계적 평가방법의 흐름도를 보여 준다. K-BIOTA는 스크리닝 단계평가인 Level 1&2, 부지 특성 데이터를 고려한 상세평가인 Level 3 평가로 구성된다. 각 평가 단계별로 변동 가능한 입력인자는 다르다. Table 2 에 단계별 입력인자의 항목을 요약하였다. Level 1 평가는 가장 보수적인 방법으로 환경매체 농도가 유일한 입력인자이며, Level 2 평가에서는 입력인자 중 전이계수(CR)와 평형분배계수(Kd)의 평균적인 값을 적용한다. 물론 사용자의 목적에 따라 임의의 값을 사용할 수 있다. Level 3 평가에서는 부지 특성을 고려하기 위하여 동식물의 종류 및 크기를 포함하여 모든 종류의 입력인자 값을 평가 목적에 따라 변경할 수 있으며, 입력인자 중 전이계수, 평형분배계수, 환경매체농도에 대한 계산되는 선량률의 불확실도 분석(uncertainty analysis)을 선택에 따라 수행할 수 있다.

2.1 스크리닝 단계 (Level 1&2) 평가

스크리닝 단계 평가는 개별 동식물의 위험성 보다는 동식물 집단에 대한 위험을 평가하는 예비적 평가 단계로 동식물을 거주 특성 별로 그룹화 하여 그룹별로 선량 평가를 수행한다. 이를 위하여 K-BIOTA에서는 육상, 민

Table 3. Benchmark Reference Level for Chronic Exposure.

Organism	IAEA [19]	NCRP [20], US/DOE [21]	UNSCEAR [6]	ERICA (EU) [18]
Terrestrial plants	10 mGy·d ⁻¹ (400 μGy·h ⁻¹)	10 mGy·d ⁻¹	10 mGy·d ⁻¹	
Terrestrial animals	1 mGy·d ⁻¹ (40 μGy·h ⁻¹)	1 mGy·d ⁻¹	1 mGy·d ⁻¹	10 μGy·h ⁻¹
Aquatic organisms		10 mGy·d ⁻¹	10 mGy·d ⁻¹	

물, 해양3개의 생태계로 구분하고 서식지 환경 별로 대 상 동식물을 11개로 그룹화 하였다. 육상생태계는 지상 식물, 지상동물, 지중동물로 그룹화하고, 민물 및 해양생 태계는 각각 수상동물, 수중동물, 저서동식물, 퇴적토 거 주 동물로 구분한다. 동식물 그룹에 대한 상세한 내용은 참고문헌 [17]에 기술되어 있다.

Level 1 평가는 일반적 스크리닝 단계 평가로 측정 또 는 계산된 환경매체 방사능 농도 준위가 야생생태계에 방사선 위해를 주는지 여부를 일차적으로 판단하기 위한 과정이다. Level 1 평가에서 동식물 그룹별 핵종별 환경 매체농도제한값(environmental medium concentration limit, EMCL)을 보수적으로 평가하고 다음과 같이 생태 계 건전성 여부를 판단하는 위험도지표(risk quotient, RQ)를 계산한다.

$$RQ_{level1} = \Sigma(RQ)_i = \Sigma \frac{ECL_i}{EMCL_i} \quad (1)$$

여기서

ECL_i : 핵종 i 의 환경매체농도 (물: Bq·L⁻¹; 토양: Bq·kg⁻¹)

$EMCL_i$: 핵종 i 의 환경매체농도제한값 (물: Bq·L⁻¹; 토양: Bq·kg⁻¹)

만약 식(1)로부터 계산된 RQ_{level1} 값이 1 보다 작을 때 생태계의 방사선 위험은 무시할 수 있다는 판단과 함 께 평가는 종료된다. 반대로 RQ_{level1} 값이 1 보다 클 때 평가에 포함된 동식물 중 적어도 하나 이상이 스크리닝 목적의 참조준위를 초과할 확률이 가능성이 크므로 다음 단계(Level 2) 의 평가를 진행한다. Level 1 평가를 위 해서는 식 (1)의 EMCL을 구하는 것이 필요하다. EMCL은 핵종별, 생태계 별로 다르며 다음의 식으로부터 구한다.

$$EMCL = \frac{D_{lim}}{F} \quad (2)$$

D_{lim} : 스크리닝 목적의 참조준위 (μGy·d⁻¹)

F : 환경매체 단위농도로부터 받는 선량률 (물: μGy·d⁻¹ per Bq·L⁻¹; 토양: μGy·d⁻¹ per Bq·kg⁻¹)

F 값은 핵종의 종류 및 거주지 특성에 따라 변한다. D_{lim} 은 만성피폭 시 동식물 방사선 위해를 판단하기 위 한 스크리닝 목적의 참조준위이다. Table 3에 여러 국제 기관에서 제시하는 참조준위를 요약하였다. K-BIOTA에 서는 UNSCEAR[6], US/DOE[21]에서 적용한 값을 이용하 여 EMCL을 구한다. 그러나 EU의 ERICA 코드[18]처럼 스크리닝 목적으로 보다 강화된 참조준위 값을 사용할 수도 있다. ERICA에서는 동식물 구분 없이 10 μGy·h⁻¹를 적용한다. 적용된 참조준위 값이 작을수록 비례하여 방

사선 위해도가 무시될 수 있는 EMCL 값도 작아진다.

Level 2 평가는 평균적인 전이계수 및 평형분배계수 값을 사용한다. 따라서 이들 값의 가능한 최대값을 적용 하는 Level 1 평가보다 더 실제적으로 평가한다. 다음과 같이 Level 2 위험도지표를 계산한다.

$$RQ_{level2} = \Sigma(RQ)_i = \Sigma \frac{DR_i}{D_{lim}} \quad (3)$$

여기서

DR_i : 핵종 i 의 선량률 (mGy·d⁻¹)

식(3)로부터 계산된 RQ_{level2} 값이 1 보다 작을 때 평 가에 포함된 어떤 동식물도 스크리닝 기준 참조준위를 초과할 확률이 낮으므로 방사선적 위험은 무시할 수 있 다고 판단할 수 있으며 평가를 종료한다. 반대로 RQ_{level2} 값이 1 보다 클 때 평가에 포함된 동식물 중 적 어도 하나 이상이 스크리닝 기준 참조준위를 초과할 가 능성이 크므로 다음단계(Level 3) 의 평가를 진행한다.

식(2)의 생태계 별 거주 환경에 따른 F 와 식(3)의 DR_i 계산 방법은 참고문헌[17]에 상세하게 기술되어 있 으므로 지면 관계상 여기서는 생략하기로 한다. Level 1 과 2 평가의 가장 큰 차이점은 선량률 계산시 Level 1의 경우 동식물 그룹별로 가장 큰 전이계수 및 평형분배 계 수 값을 사용한다는 것이고 Level 2는 보다 현실적인 평 가로 평균값을 사용한다는 것이다.

2.2 부지특성적 (Level 3) 상세 평가

Level 3 평가는 Level 2 평가에서 위험도 지표 RQ_{level2} 값이 1을 초과할 때 부지 특성적 자료를 고려하 여 보다 상세한 평가를 위한 단계이다. 이 단계에서는 스크리닝 평가(Level 1&2)와 달리 부지 특성을 지닌 개 별적인 대표동식물에 대해 선량평가를 수행하며, 각 동 식물의 크기, 거주인자 등 모든 입력인자의 값을 부지특 성적인 자료를 적용한다. Level 3 평가에서 평가 대상 개별동식물은 타원체로 가정하여 타원체의 x, y, z 축의 길이로 크기를 정의한다. 대상 동식물의 크기(질량)가 결정되면 선량환산인자가 코드 내부에서 자체적으로 계 산된다. Level 1&2 평가에서는 동식물을 무한 크기로 가 정하여 보수적으로 사전 계산된 내 외부 선량환산인자가 코드 내에 데이터베이스로 저장되어 있지만, Level 3 평 가에서는 유한 크기의 개별적인 동식물이 사용자에 의해 정의되면, 질량이 계산되고 계산된 질량에 따른 핵종별 선량환산인자가 내부적으로 자동 계산된다. 계산에 적용 된 핵종별 에너지 방출자료는 ICRP38의 값을 적용하였 다. K-BIOTA 에서는 ICRP 108 [2] 방법에 따라 물과 같 이 균일한 매질 특성을 갖는 수 생태계 환경에서는 uni-

form isotropic model [22]을 적용하고, 토양, 나무, 공기 등을 포함하여 불균일한 매질 특성을 갖는 육상환경에서는 Taranenکو 모델[23]을 적용하였다. K-BIOTA에서 적용한 선량환산인자 계산은 별도의 문헌에서 상세하게 기술하였다 [24, 25].

기존 및 예방 피폭상황의 선량계산은 일반적으로 평형모델을 적용하여 구한다. 평형모델에 근거한 내부 및 외부피폭에 의한 특정 생물종이 받는 총 피폭선량(D_{tot})은 다음과 같이 계산한다.

수생태계:

$$D_{tot} = \Sigma[CR_i \times DCC_{int,i} + \{\gamma_w + 0.5(1 + K_d)\gamma_{ws} + \gamma_s K_d\} DCC_{ext,i}] \times C_{water,i} \quad (4)$$

육상생태계:

$$D_{tot} = \Sigma[CR_i \times DCC_{int,i} + DCC_{ext,i}] \times C_{soil,i} \quad (5)$$

여기서

D_{tot} : 내부 및 외부피폭에 의한 총 피폭선량 ($\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$)

CR_i : 전이계수

$DCC_{int,i}$: 내부선량환산계수 ($\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$ per Bq·kg⁻¹)

$DCC_{ext,i}$: 외부선량환산계수 (토양 : $\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$ per Bq·kg⁻¹; 물 : $\mu\text{Gy}\cdot\text{d}^{-1}$ per Bq·L⁻¹)

γ_w : 물 내에서 생물종의 거주인자

γ_{ws} : 물-퇴적도 경계에서의 생물종의 거주인자

γ_s : 퇴적도 내에서의 생물종의 거주인자

K_d : 평형분배계수 (L·kg⁻¹)

C_{water} : 수중 방사능농도 (Bq·L⁻¹)

C_{soil} : 토양 중 방사능 농도 (Bq·kg⁻¹)

Level 3 평가에서는 입력인자 중 전이계수, 평형분배계수 및 환경매체농도 값에 대한 피폭선량을 불확실성 분석이 가능하다. K-BIOTA에서는 정규분포, 로그정규분포, 균일분포, 지수분포 4가지 종류의 확률밀도함수 적용이 가능하고, 각 분포의 누적확률밀도함수로부터 LHS (Latin Hypercube Sampling) 방법을 사용하여 불확실성 분석을 수행한다.

3. 적용 사례

K-BIOTA는 개발 단계에서부터 코드의 검증과 국제적으로 유사한 코드와의 비교를 통한 국제 경쟁력 확보를 위해 IAEA에서 주관하는 방사선환경모델 국제 비교연구에 적극 참여하였다. 다음은 IAEA의 방사선환경모델 비교 국제공동연구 EMRAS II biota working group에서 수행되었고 K-BIOTA가 참여한 코드의 적용사례를 간단히 기술한다. 각 시나리오 별 상세한 내용은 공동연구로 발간한 참고문헌에 기술되어 있다.

3-1. 모델 간 선량환산인자 비교[26]

5개의 ICRP 참조동물(duck, frog, flatfish, egg, rat,

earthworm) 의 ICRP 74개 핵종에 대한 비가중 전신흡수 선량(unweighted whole body absorbed dose rate)의 모델 간 비교가 수행되었다. K-BIOTA를 포함한 참가모델에서 제출한 결과는 통계적 기법으로 분석하였다. 내부선량환산인자는 모델 간 편차가 심하지 않았으며, 결과의 70%가 $\pm 20\%$ 범위 내에 분포하였다. 그에 반해 외부선량환산인자는 모델 간 편차가 한 승수 내에 존재하는 다소 큰 편차를 보여주었다. 이 차이의 원인은 각 코드에서 선량환산인자 계산 시 적용하는 가정 즉, 딸핵종의 수, 생물종의 기하학적 특징, 핵종의 에너지 수율, 적분오차 등 다양한 특징에 따라 기인하는 것으로 분석되었다.

3-2. 호주 Little Forest Burial Site 시나리오 [27]

육상생태계의 적용연구를 위해 호주의 핵폐기물 매립지인 Little Forest Burial 부지 주변 생태계에 대한 선량평가의 모델 비교연구가 수행되었다. 모델에 참가한 코드는 크게 ERICA, RESRAD-BIOTA, K-BIOTA로 구분할 수 있다 (Table 4 참조). Fig. 2 에 시나리오에서 제시한 wallaby에 대한 비교 결과를 한 예를 보여준다. K-BIOTA에 의한 결과 (5번째 결과)가 다른 모델의 결과와 유사한 것을 볼 수 있다. 전체적으로 모델간의 가장 큰 차이는 토양-생물종 전이계수 값의 차이로 나타났다. 이 결과는 육상 야생 동물 선량평가 시 평가 결과의 정확성을 위해 가능하면 부지 특성적 토양-생물종 전이계수 값 적용을 권고한다.

3-3. 스웨덴 습지(wetland) 시나리오 [29]

습지는 육상생태계와 수 생태계가 공존하며 양 생태계의 특성을 동시에 가지고 있다. 전 세계적으로 습지는 다양하게 존재하나 아직 습지 생태계에 대한 방사선영향 평가는 수행된 적이 없다. 이런 배경으로 습지생태계가 EMRAS II 공동연구 시나리오로 채택되었다. 본 연구에서는 지역적으로 서로 다른 Steel Creek (South Carolina, USA), Utnora swamp (Sweden), Duke Swamp (Canada)의 3 곳의 습지를 시나리오 적용 대상으로 선정하였다. 본 시나리오에는 크게 3가지 모델 (ERICA, RESRAD-BIOTA, K-BIOTA)과 6 개의 기관이 참가하였으며 각 참가자들은 습지 별 핵종정보를 이용하여 습지 별 동식물의 핵종농도와 선량 계산결과를 요청 받았다.

Fig. 3은 결과의 한 예시로 Utnora swamp 에서의 ¹³⁷Cs에 의한 선량률($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)의 모델 간 비교를 보여준다. 각 모델이 적용한 가정 (참조동물 크기, 거주인자, 전이계수 값 등)의 차이에 의해 평가 결과가 다르게 나타났다. 전체적으로 K-BIOTA에 의한 결과가 타 결과와 유사하거나 중간 값 정도의 평가결과를 보여준다. 본 연구의 주목적은 시나리오 비교 분석을 통해 평가의 본질적 불확실성, 접근법 차이에 따른 결과의 영향, 평가의 문제점 분석이다.

Table 4. Biota Dose Codes and Soil-to-Organism Approaches Used among Study Participants.

Participant	Code	Method for soil-to-organism transfer
Centre for Ecology & Hydrology, Lancaster, UK (ERICA-CEH)	ERICA tool	CRwo-soil values from the wildlife transfer database [http://www.wildlifetransferdatabase.org] and IAEA TRS 472[28] for yam and some grass values
Belgian Nuclear Research Centre, Mol, Belgium (ERICA-SCK)	ERICA tool	CRwo-soil values from ERICA tool defaults [18], except grass and yam from IAEA TRS 472 [28]
Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia (ERICA-JSI)	ERICA tool	CRwo-soil values from ERICA tool defaults
Norwegian Radiation Protection Authority, Norway (FASTer-lite-NRPA)	FASTer-lite used with ERICA tool, Eikos, and ECOLOGO	Dynamic and steady-state biokinetic transfer based on ingestion and inhalation parameters). Soil-to-diet CRwo-soil values from ERICA tool defaults.
Korea Atomic Energy Research Institute Daejeon, Republic of Korea (K-BIOTA-KAERI)	K-BIOTA	CRwo-soil values from: 1) ERICA tool defaults for grass, tree, earthworm, insect, bird; 2) IAEA TRS 472 for yam (potato); 3) allometric equation for goanna, echidna, fox, and wallaby [14]
Argonne National Laboratory, IL, USA (RESRAD-BIOTA-ANL)	RESRAD-BIOTA	CRwo-soil values from RESRAD-BIOTA defaults [14]
Manchester Metropolitan University Manchester, UK (RESRAD-BIOTA-MMU)	RESRAD-BIOTA	CRwo-soil values from RESRAD-BIOTA defaults used except allometric equation for goanna, raven, echidna, fox, and wallaby

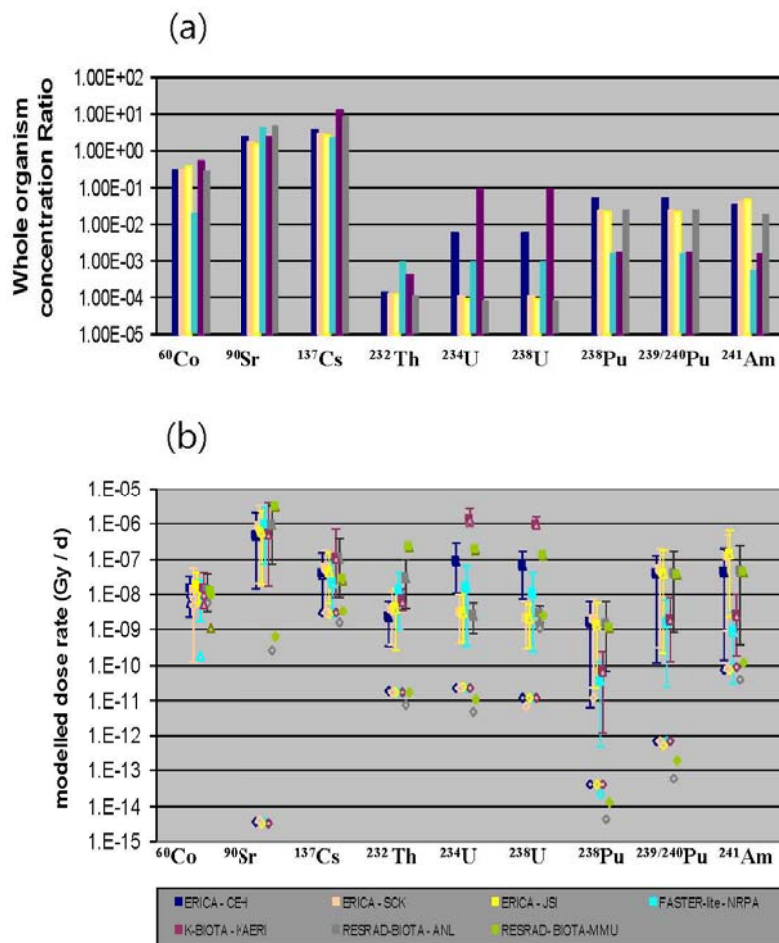


Fig. 2. For wallaby, (a) $CR_{wo-soil}$ values, and (b) corresponding modelled total dose rates: mean (\square) with 5th and 95th percentiles indicated. Order for each set are: ERICA-CEH, ERICA-SCK, ERICA-JSI, FASTer-lite-NRPA, K-BIOTA-KAERI, RESRAD-BIOTA-ANL, RESRAD-BIOTA-MMU (this figure was cited from reference [27]).

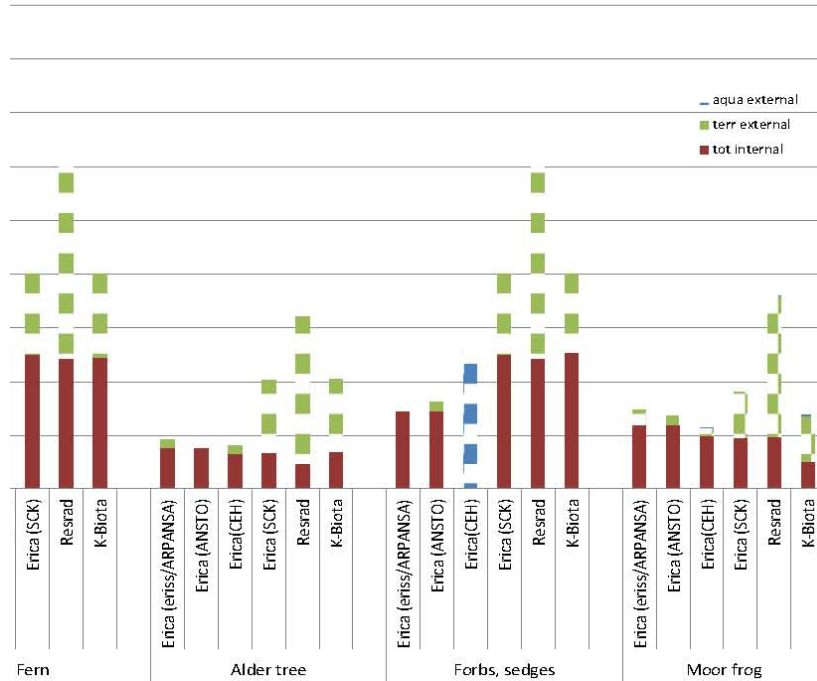


Fig. 3. Estimated internal and external radiation dose rates (mGy·h⁻¹) from ¹³⁷Cs to organisms in Utnora Swamp (this figure was cited from reference [29]).

4. 결론

본 논문은 ICRP 103 환경방호를 대비하여 국내에서 개발된 생태계선량평가 코드 K-BIOTA의 소개와 함께 IAEA EMRAS II (Environmental Modeling for Radiation Safety) 국제공동연구참여를 통한 코드의 검증사례를 보여준다. K-BIOTA코드는 국제표준 방법으로 정착되고 있는 단계적 평가 방법을 적용하고 있으며, 공동연구 시나리오 비교 결과 ERICA, RESRAD-BIOTA등 국제코드와 유사한 평가 결과를 보여 주었다. 결론적으로 K-BIOTA는 다양한 오염 환경에 거주하는 생물종의 방사선영향을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

향후 K-BIOTA는 사람 및 환경을 통합 방호하는 ICRP의 신권고 정책에 부응하기 위한 국내 방사선방호 기반 기술로, 아울러 국내 환경방호 규제체계 구축을 위한 참조기술로 활용할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 미래창조부의 원자력연구개발사업 (NRF-2012-M2A8A4025913)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. ICRP, The 2007 Recommendations of International Commission on Radiological Protection, ICRP Publications 103, 2007.
2. ICRP, Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants, ICRP Publication 108, 2008.

3. ICRP, Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants, ICRP Publication 114, 2009.
4. ICRP, Protection of the environment under different exposure situations, Publication 124, 2014.
5. UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1996 report to the General Assembly with scientific annexes, 1996.
6. UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with scientific annexes, Volume II Scientific Annexes E: Effects of ionizing radiation on non-human biota, 2011.
7. UNSCAER, Sources, effects and risk of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2013 report to the General Assembly, scientific annex A: Levels and effects of radiation exposure to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami, 2014.
8. IAEA, Protection of the environment from the effects of ionizing radiation, IAEA-TECDOC-1091, 1999.
9. IAEA, Ethical considerations in protecting the environment from the effects of ionizing radiation,

- IAEA-TECDOC-1270, 2002.
10. IAEA, Protection of the environment from the effects of ionizing radiation, Proceedings of an international conference stockholm, 6-10 October, IAEA, 2005.
 11. IAEA, Safety Standards for protecting people and the environment, Fundamental safety principles, safety fundamentals, IAEA-No.SF-1, 2006.
 12. IAEA, Safety Standards for protecting people and the environment, Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards, General safety requirement Part 3 No. GSR part 3, 2014.
 13. IAEA, Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment, IAEA Safety Reports Series No. 19, 2001.
 14. DOE, Interagency steering committee on Radiation standards-RESRAD-BIOTA user guide, Version 1. A tool for implementing a graded approach to biota dose evaluation, DOE Technical Report 2004-02, DOE/EH-0676, 2004.
 15. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Environmental standard review plan: standard review plans for environmental reviews for nuclear power plants, Office of Nuclear Reactor Regulation, NUREG-1555, 2000.
 16. Environment Canada and Health Canada, Canadian Environmental Protection Act 1999, Priority substances list assessment report, Releases of radionuclides from nuclear facilities (Impact on non-human biota), Environment Canada and Health Canada, Ottawa, Ontario, 2003.
 17. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Graded wildlife dose assessment technology, KAERI-TR-5909, 2015.
 18. Brown, JE, Alfonso, B, Avila R, Beresford NA, Copplestone D, Pröhl G, Ulanovsky A. The EIRCA Tool, J Environ Radioactiv, 2004;99:1371-1383.
 19. IAEA, Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radioecological assessment, IAEA-TECDOC-1616, 2009.
 20. National Council on Radiation Protection and Measurements, Effects of ionizing radiation on aquatic organisms, NCRP report No. 109, 1991.
 21. Higley KA, Domotor SL, Antonio EJ, Kocher DC. Derivation of a screening methodology for evaluating radiation dose to aquatic and terrestrial biota, J Environ Radioactiv, 2003;66:41-59.
 22. Ulanovsky A, Pröhl G. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota, Radiat Environ Biophys, 2006;45: 203-214.
 23. Taranenko V, Pröhl G, Comez-Ros JM, Absorbed dose rate conversion coefficients for reference terrestrial biota for external and internal exposures, J Radiol Prot, 2004;24:A35-A62.
 24. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Internal and external dose conversion coefficient for domestic reference animal and plants, KAERI-TR-3767, 2009.
 25. Keum DK, Jun I, Lim KM, Choi YH, Absorbed internal dose conversion coefficients for domestic reference animals and plant, Nucl Eng Technol, 2010;42:89-96.
 26. Vives i Batlle J, Beaugelin-Seiller K, Beresford NA, Copplestone D, Horyna, J, Hosseini A, Johansen M, Kamboj S, Keum DK, Kurosawa N, Newsome L, Olyslaegers G, Vandenhove H, Ryufuku S, Vives Lynch S, Wood MD, Yu C. The estimation of absorbed dose rates for non-human biota: an extended inter-comparison, Radiat Environ Biophys, 2012;50:231-251.
 27. Johansen MP, Barnett CL, Beresford NA, Brown JE, Černe M, Howard BJ, Kamboj S, Keum DK, Smodiš B, Twining JR, Vandenhove H, Vives i Batlle J, Wood MD, Yu C. Assessing doses to terrestrial wildlife at a radioactive waste disposal site: inter-comparison of modelling approaches, Sci Total Environ, 2012;427-428:238-246.
 28. IAEA, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to wildlife, IAEA TRS No.479, 2014.
 29. Stark K, Andersson P, Beresford NA, Yankovich TL, Wood MD, Johansen MP, Vives i Batlle J, Twining JR, Keum DK, Bollhofer A, Doering C, Ryan B, Grzechnik M, Vandenhove H, Predicting exposure of wildlife in radionuclide contaminated wetland ecosystems, Environ Pollut, 2015;196: 201-213.

Characteristics of the Graded Wildlife Dose Assessment Code K-BIOTA and Its Application

Dong-Kwon Keum, In Jun, Kwang-Muk Lim, Byeong-Ho Kim, and Yong-Ho Choi
Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeokdaero, Yuseonggu, Daejeon, 34057 South Korea

Abstract - This paper describes the technical background for the Korean wildlife radiation dose assessment code, K-BIOTA, and the summary of its application. The K-BIOTA applies the graded approaches of 3 levels including the screening assessment (Level 1 & 2), and the detailed assessment based on the site specific data (Level 3). The screening level assessment is a preliminary step to determine whether the detailed assessment is needed, and calculates the dose rate for the grouped organisms, rather than an individual biota. In the Level 1 assessment, the risk quotient (RQ) is calculated by comparing the actual media concentration with the environmental media concentration limit (EMCL) derived from a bench-mark screening reference dose rate. If RQ for the Level 1 assessment is less than 1, it can be determined that the ecosystem would maintain its integrity, and the assessment is terminated. If the RQ is greater than 1, the Level 2 assessment, which calculates RQ using the average value of the concentration ratio (CR) and equilibrium distribution coefficient (Kd) for the grouped organisms, is carried out for the more realistic assessment. Thus, the Level 2 assessment is less conservative than the Level 1 assessment. If RQ for the Level 2 assessment is less than 1, it can be determined that the ecosystem would maintain its integrity, and the assessment is terminated. If the RQ is greater than 1, the Level 3 assessment is performed for the detailed assessment. In the Level 3 assessment, the radiation dose for the representative organism of a site is calculated by using the site specific data of occupancy factor, CR and Kd. In addition, the K-BIOTA allows the uncertainty analysis of the dose rate on CR, Kd and environmental medium concentration among input parameters optionally in the Level 3 assessment. The four probability density functions of normal, lognormal, uniform and exponential distribution can be applied. The applicability of the code was tested through the participation of IAEA EMRAS II (Environmental Modeling for Radiation Safety) for the comparison study of environmental models comparison, and as the result, it was proved that the K-BIOTA would be very useful to assess the radiation risk of the wildlife living in the various contaminated environment.

Keywords : ICRP103, Environment protection, Graded dose assessment, K-BIOTA, Wildlife