

육상식품 섭취경로에 의한 선량계산 모델에서 파라미터의 불확실성 및 민감도 분석*

이창우 · 최용호 · 천기정 · 이정호

한국원자력연구소

요 약

육상 섭취 경로에 따른 내부 피폭선량 계산 모델 KFOOD의 파라미터 불확실성 및 민감도를 몬테칼로법을 사용하여 수치 분석하였다. 쌀을 통한 섭취 경로의 경우 KFOOD 코드에 의한 예측치는 아주 보수적인 값을 나타내었다. 모델에서 민감도가 큰 입력변수는 방사능의 침적속도와 식물전이계수였다.

Key words : 육상섭취경로 모델, 불확실성, 민감도

서 론

원자력시설로 부터 누출된 방사성 물질은 먹이사슬을 따라 이동하여 식품을 통하여 인체에 흡수된다. 섭취경로에 따른 피폭선량에 대한 연구는 원자력 산업 발전과 함께 시작되었는데 섭취경로모델은 환경에 누출된 방사능이 먹이사슬을 따라 이동하는 경로를 규명하여 수학적 모델을 수립하고 전산코드화 한 것이다. 현재 쓰이고 있는 대부분의 모델들은 1970년대 후반에 개발된 FOOD 모델[1]을 기초로 한 것이다. 이들은 원자력시설의 정상가동시 누출되는 방사능이 먹이사슬 각 부분에서 평형상태에 있다고 가정한 평형모델들이다. 지금까지 평형모델로써 FOOD 모델에 사용된 개념은 육상섭취 경로상의 핵종이동을 잘 설명하고 있다고 받아들여지고 있으며 이를 기초로 각 나라에서는 지역 환경 특성과 평가목적에 맞게 수정보완하여 사용

하고 있다[2, 3]. 본 연구실에서도 한국의 환경에 맞는 평가모델에 대한 연구가 수행된 바 있고[4] 한국고유치의 데이터 베이스를 보완한 육상식품의 섭취 경로 모델 KFOOD를 개발한 바 있다[5].

일반적으로 환경 평가에 사용되는 모델들은 현실의 모사과정에서 발생하는 불확실성을 내포하고 있다. 불확실성을 일으키는 요소로는 모델 구조가 현실을 적절히 표현하지 못한 경우이거나 모델에 포함된 파라미터의 불확실성 때문이다[6]. 불확실성을 분석하는 방법으로는 실험에 의한 관측치와 모델예측치를 비교해 보는 모델 검증실험을 고려할 수 있다. 그러나 이러한 검증실험을 수행하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소모되므로 현실적으로 쉽지 않은 방법이다. 검증실험이 어려울 경우에는 모델구조가 대상환경을 적절히 설명하고 있다고 가정하고 파라미터의 불확실성과 민감도를 분석해 볼 수 밖에

*이 연구는 과기처에서 시행한 특정연구과제의 일환으로 수행하였다.

Table 1. Parameters of food chain model.

Parameter	Definition	Unit
B_{iv}	Soil-to plant concentration factor of radionuclide i	$\frac{\text{Bq/Kg of plant}}{\text{Bq/Kg of soil}}$
C_{iv}	Radioactivity concentration of radionuclide i in plant	Bq/Kg
d_i	Deposition rate of radionuclide i on the surface of crop field	$\text{Bq/m}^2\text{-d}$
D_i	Effective dose conversion factor for ingestion of radionuclide i	Sv/Bq
H_i	Annual effective dose equivalent	Sv/y
P	Effective soil surface density	Kg/m^2
R	Interception fraction (deposition retained on foliar)	
T_v	Translocation factor of externally deposited nuclide to edible part of plant	
t_e	Time of above ground exposure to contamination during growing season	d
t_b	Time for build up of radionuclide in soil	d
t_h	Hold up time between harvest and consumption	d
U_v	Consumption rate of plant food	Kg/y
V_{di}	Deposition velocity of radionuclide i	m/s
X_i	Annual average air concentration of radionuclide i	Bq/m^3
Y_v	Yield of plant	Kg/m^2
λ_i	Radiological decay constant of radionuclide i	1/d
λ_w	Wethering removal constant	1/d

없다.

발표된 거의 모든 먹이사슬에 의한 섭취경로 모델은 결정론적 모델로써 주어진 파라미터 값들에 대한 단일 값만을 도출하게 된다. 따라서 현실을 실제에 가깝게 예측하기 위해서 최선의 파라미터 값을 추출하려는 노력을 하게 되고 안전 한 보수적인 수치를 선택하게 된다. 이때는 입력 파라미터의 변화에 따른 결과치의 분포범위를 알아보고 모델예측치와 비교함으로써 인자의 불확실성과 민감도를 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

본 연구에서는 한국민에게 중요한 토양-쌀-사람 경로를 대상으로 당연구실에서 작성한 섭취 경로모델 KFOOD의 파라미터 불확실성과 민감도를 검토해 보고자 하였다. 이 KFOOD 모델에 대한 검증실험은 아직 수행된 바 없으나 한국 고유의 환경을 고려하여 작성되었으므로 한국의 섭취환경을 적절히 설명하고 있다고 가정하였다. 모델이 비선형이거나 입력분포의 형태

가 다양할 때에도 쉽게 사용할 수 있는 몬테칼로 방법을 사용하여 불확실성과 민감도를 분석하였다. 입력변수의 분포로부터 무작위 추출한 임의의 변수집합을 모델에 대입하여 대응하는 결과치의 분포를 구하고 모델예측치와 비교하였다. 또 입력파라미터와 예측치 사이의 상관관계로부터 변수의 민감도를 고찰하였다.

모 델 식

KFOOD 모델에서는 13종의 동·식물성 식품 경로를 대상으로 하고 대상핵종도 수십종에 이르고 있으나 한국인의 경우에는 쌀을 통한 섭취 경로가 가장 중요한 경로였다[5]. 본 연구에서는 주요핵종 Sr-90과 Cs-137이 토양-쌀-사람 경로를 통하여 인체에 섭취되는 내부피폭경로를 분석대상으로 하였다. 쌀중의 핵종농도를 계산하는 식과 섭취에 의한 선량계산식은 아래와 같다.

$$d_i = 86400 X_i V_{di} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_{iv} = d_i \left[\frac{R T_v (1 - e^{-(\lambda_w + \lambda_i) t_e})}{Y_v (\lambda_w + \lambda_i)} + \frac{B_{iv} (1 - e^{-\lambda_i t_b})}{p \lambda_i} \right] e^{-\lambda_i t_h} \dots\dots\dots(2)$$

$$H_i = D_i C_{iv} U_v \dots\dots\dots(3)$$

윗식들에서 사용된 파라미터에 대한 설명은 표 1에 정리하였다. 식 (1)은 공기중의 방사능이 토양에 침적하는 속도를 의미하고 식 (2)는 섭취되는 쌀중의 방사능 농도를 계산하는 식이다.

방 법

불확실성과 민감도 분석에는 몬테칼로법에 의한 수치분석법을 이용하였다. 이 방법은 모델구조가 복잡하고 비선형 일때 사용 가능하며 입력 변수들의 분포형태에 관계없이 이론적인 또는 실험적인 분포의 어느것에나 적용할 수 있다는 장점이 있다[7]. 본 연구에서는 입력변수의 분포로부터 임의의 표본을 추출하는 방법으로서 라틴하이퍼큐브 샘플링법을 사용하였다[8, 9]. 이것은 변수존재구간을 변수분포함수의 분포 확률에 따라 표본의 수 만큼의 구간으로 분할하여 각 구간에서 대응되는 변수값을 임의로 취하는 방법이다. 따라서 표본 수가 적더라도 변수분포 특성 전체를 표현할 수 있어서 반복 계산수가 줄어들게 되므로 효율적인 계산을 수행할 수 있다.

한편 입력변수가 출력에 미치는 영향을 알아보는 민감도 분석에 쓰이는 방법으로는 입력변수와 출력 사이의 상관관계를 알아보는 것이다 [8, 10]. 입력변수가 두개 이상일 때는 다른 입력변수의 영향을 제거한 두변수 사이의 partial correlation coefficient(PCC)를 계산할

필요가 있다. 그런데 모델식이 비선형일 때는 실변수 값들 사이의 PCC보다는 변수의 계급들 사이의 partial rank correlation coefficient (PRCC)가 상관관계를 더 잘 나타내는 것으로 알려졌다. 식 (2)의 모델식은 큰 비선형적인 특성은 없으나 λ_w 에 대해서는 비선형성을 보이고 있으므로 PRCC를 계산하였다. PRCC를 계산하기 위해서는 우선 변수들을 크기의 차례로 계급을 부여한 뒤 계급들 사이의 rank correlation coefficient(RCC)인 Spearman's rho(ρ)를 계산한다. 이때 변수들간의 RCC로 구성된 행렬의 역행렬로부터 PRCC를 쉽게 계산할 수 있다. 이때의 표본 수가 변수의 수의 4/3 이상이면 민감도 분석에 충분하다고 알려져 있다[11, 12].

본 연구에서 사용한 LHS와 PRCC를 계산하는 방법은 Iman과 Conover[8]가 제안한 방법을 따르고 Iman 등이 개발한 프로그램을 이용하였다. 각각의 주어진 변수분포로부터 LHS법에 의해 100개씩의 표본을 취하여 입력변수 벡터를 만든다. 이 입력벡터를 모델식에 대입하여 피폭선량을 계산하여 선량분포를 KFOOD모델 예측치와 비교하고 입력과 출력사이의 PRCC를 계산하였다.

입력 변수 분포

모델식(1)~식(3)에 나타난 각 변수에 대한 통계적 특성은 표 2에 정리하였다. 이들 자료중 작물 성장기간, 토양 밀도 및 식품 섭취량등은 한국실정에 맞도록 조사하여 결정하였다[5]. 이 표에서 벼의 식물 전이계수에 대한 KFOOD값은 실험치에 근거한 값이지만 분포특성은 곡류에 대한 문헌치를 참고하여 결정하였다. 지역 특이성 있는 자료가 없을 경우 문헌자료를 참고로 하여 분포를 정하였다. 조사 결과의 일부분은 자료의 부족으로 직관적인 판단에 의지하여 최선값(best estimated value)를 선택하였다. 변수들 중 차단계수(R)와 작물생산수율(Y_v)은

Table 2. Statistical properties of the input parameter for Sr-90 and Cs-137 transport via soil-rice-man pathway.

Parameter	Unit	Type of distribution	Percentile value		Deterministic value (KFOOD)
			X _{0.1}	X _{99.9}	
V _{dl}	m/s	L			
Sr-90			0.0001	0.1	0.01
Cs-137			0.0001	0.05	0.01
B _{lv}		L			
Sr-90			0.0050	3.36	0.17
Cs-137			0.00011	1.72	0.028
D _l	Sv/Bq	C			
Sr-90				3.5E-08	3.5E-08
Cs-137				1.4E-08	1.4E-08
λ _l	d ⁻¹	C			
Sr-90				2.73E-6	2.73E-6
Cs-137				3.63E-6	2.63E-6
R/Y _v	m ² kg-dry	N	1.51	1.78	1.68
λ _w	d ⁻¹	L	0.018	0.18	0.05
P	kg-dry/m ²	L	149.2	166.1	166
t _b	d	U	365	10958	10958
t _e	d	T	120	150 180	150
t _h	d	U	7	365	14
T _v		C		0.1	0.1
U _v	kg/y	L	80	200	122

L : lognormal, N : normal, U : uniform (low and upper limit),

T : triangular (minimum, apex and maximum points), C : constant input value.

서로 독립적이지 못하고 서로 상관관계를 갖고 있으므로 R/y_w값의 분포특성을 조사하였다. 그 외 다른 변수들은 서로 독립적이라고 가정하였다. 표 2에서는 변수분포가 정규이거나 대수정규인 경우는 99.9 percentile 값과 0.1 percentile 값을 표시하였다. 균일 분포의 경우는 상한값과 하한값을 또 삼각분포에 대해서는 상한값, 꼭지점값 및 하한값을 표시하였다.

표에서 선량 전환인자(D_l)는 고려 대상에서 제외하였다. 이는 선량 전환인자를 계산하는 선량평가모델 자체가 복잡하고 많은 불확실성을 포함하고 있으며 또 여기서는 환경에서의 핵종 이동에 관련된 섭취경로의 불확실성 문제만을 검토하고자 했기 때문이다.

결과 및 고찰

대기중의 방사능 농도가 1 Bq/m³일때(=X_l) 모델에 의해 계산된 유효선량의 빈도 분포를 그림 1에 표시하였다. 이들은 평균치가 왼쪽에 치우치고 오른쪽 꼬리가 긴 대수정규분포 형태를 갖고 있다. 이것은 보통의 환경 자료 특성에 나타나는 일반적인 경향과 일치함을 알 수 있다 [7]. 이 계산에서는 각 변수에 대해 100개의 표본을 취한 결과인데 표본 수를 증가시켜도 전체적인 분포형태에는 큰 영향을 주지 않았다. 분포곡선을 대수정규분포로 가정하고 기하평균과 기하표준편차를 계산하였다. 이들은 KFOOD 모델에측치와 비교한 결과는 그림 1 및 표 3에

Table 3. Variability in predicted effective dose equivalent for Sr-90 and Cs-137 ingested via soil-rice-man pathway.

Radionuclide	Geometric mean sievert	Geometric standard deviation	Deterministic value (KFOOD) sievert (percentile)
Sr-90	0.87E-02	3.84	0.042 (0.879)
Cs-137	0.13E-03	3.17	0.69E-02 (0.922)

나타낸 바와 같다. 이 결과를 보면 토양-쌀-사람 경로에서 KFOOD 예측치는 Sr-90의 경우 87.9 percentile이고 Cs-137의 경우는 92.2 percentile에 해당하는 아주 보수적인 결과를 보여 주고 있다. 이 결과는 표 2에 주어진 입력자료의 분포에 따라 결정되는 것이지만 지나친 보수적 결과를 피하기 위해서는 입력변수의 데이터 베이스에 대한 세밀한 검증이 필요할 것이다.

한편 각 핵종에 대한 입력변수와 결과치 사이의 PRCC 계산 결과는 표 4에 나타내었다. 95%의 신뢰도($\alpha=0.05$)로써 입력 변수와 결과치가 상관관계가 있음을 나타내는 PRCC값은 약 0.21 정도이다[11]. PRCC가 0.21 이상일 때는 이들의 상관관계가 우연에 의한 것(white noise)이 아님을 95%의 신뢰도로써 주장할 수 있음을 의미한다. 따라서 표 4에서 PRCC 값이 0.21보다 큰 입력 변수는 출력에 영향을 주는 변수라 할 수 있다. 표 4의 상관관계 계수로 볼 때 가장 민감도가 큰 입력변수는 침적속도(V_{dl})와 식물 전이계수(B_{lv})였다. 이 변수들은 변화 범위가 3자리에 걸쳐 있어서 변화 범위가 크기 때문인 것으로 사료된다. 또 풍화제거상수(λ_w), 축적시간(t_b)과 식품섭취량(U_v)등이 상관관계가 큰 변수로 나타났다. 그러나 λ_w 는 Sr-90의 경우 토양-엽채/근채-사람 경로에서 그 영향이 미미한 것으로 나타났는데 이것은 B_{lv} 의 상관관계 크기와 관련이 있는 것으로 보인다.

Table 4. Partial rank correlation coefficient (PRCC) in soil-rice-man pathway model for Sr-90 and Cs-137 transport.

Input parameter	PRCC	
	Sr-90	Cs-137
V_{dl}	0.9566	0.9463
B_{lv}	0.8669	0.6890
R/Y_v	0.0640	0.0389
λ_w	-0.3979	-0.6157
P	0.0052	0.1254
t_b	0.6881	0.3588
t_e	0.0193	-0.0582
t_h	-0.0895	-0.1498
U_v	0.3534	0.3336

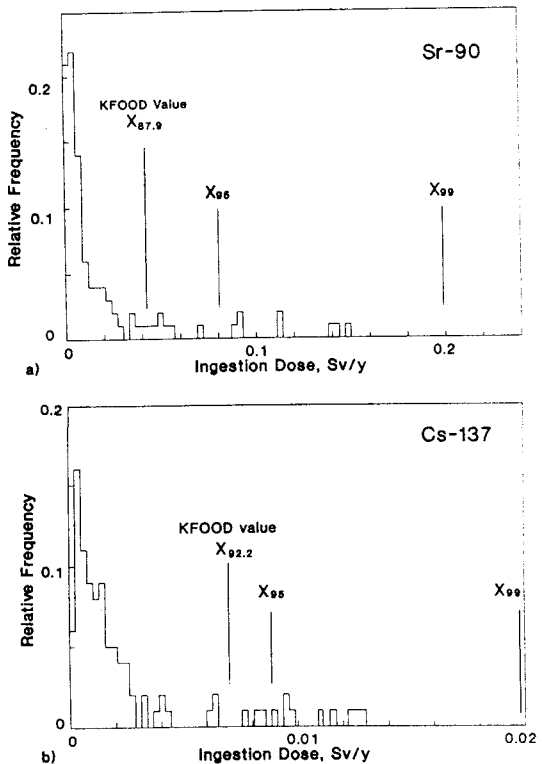


Fig. 1. A frequency distribution of the predicted effective effective dose equivalent from ingestion of a) Sr-90 and b) Cs-137 via soil-rice-man pathway model.

식(2)에서 보면 λ_w 와 B_{iv} 는 각각 엽면 침적 경로와 뿌리 흡수경로에 관련된 서로 다른 항에 포함되어 있음을 알 수 있다. 이로부터 표 4의 결과로 보면 B_{iv} 에 대한 상관관계 계수가 클 때는 λ_w 에 대한 상관관계수가 작아지는 것으로 사료된다. 여기서 PRCC가 음수인 경우는 입력변수와 결과치가 역상관관계에 있음을 나타내는 것으로서 변수값이 증가할 때 결과치가 감소함을 의미한다.

축적시간(t_b) 역시 영향력이 있는 변수로 나타났는데 Sr-90의 경우 특히 큰 상관관계가 있음을 알 수 있다. t_b 는 방사능이 토양에 축적되는 기간을 의미하는데 KFOOD에서는 원자력 발전소의 가동 기간을 30년으로 보고 이값을 취하였다. 그러나 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 실제 가동기간을 취하는 것도 고려해 봐야 할 것이다. 식품 섭취량(U_v)의 영향은 선량계산식 식(3)으로 보와 선량계산에 직접 관계하므로 보다 정확한 자료가 필요하다. KFOOD 모델은 결정론적 모델이므로 민감도가 큰 입력변수의 선정시에는 신중한 선택이 필요하다. 이를 위해서는 가용한 관련 자료의 수집 정리 및 통계 처리 등을 위한 장기간의 작업이 요구되며 필요에 따라서는 국내 특성치를 광범위하게 조사하기 위한 기초 실험이 많이 수행되어야 할 것으로 본다.

결 론

육상 섭취경로에 의한 선량 계산모델 KFOOD의 입력변수 분포에 대응하는 선량계산치는 대수정규 분포를 나타내었고 이 KFOOD 코드에 의한 선량예측치는 아주 보수적 값을 알 수 있다. 이 모델에서 민감도가 큰 입력변수는 방사능의 침적속도와 식물 전이계수였다. 이 두 변수는 분포범위가 넓어서 불확실성이 크므로 입력변수 선정시 신중을 기해야 하며 충분한 기초실험이 뒷받침 되어야 할 것이다.

참고문헌

1. D.A. Baker, G.R. Hoenes, and J.K. Soldat, *FOOD : An Interactive Code to Calculate Internal Radiation Doses from Contaminated Food Products*, Battelle Pacific Northwest Laboratory Report, BNWL-SA-5523(1976).
2. USNRC, Regulatory Guide 1.109, *Calculation of Annual Doses to man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Appendix I (revision)*, Washington, 1977.
3. R. Zach, *FOOD II : An Interactive Code for Calculating Concentrations of Radionuclides in Food Products*, Atomic Energy of Canada Limited, Whiteshell Nuclear Research Establishment Report, AECL-6305(1978).
4. 최용호, 정규희, 김진규, 이정호, "FOOD III 코드를 이용한 섭취경로 내부피폭 비교 해석," 대한 방사선 방어학회지, 13(2), 41-51(1988).
5. 이정호, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭선량 계산 코드 개발, 한국 원자력 연구소, KAERI/RR-820/90, 1991.
6. M.D. Otis, *Sensitivity and Uncertainty Analysis of the PATHWAY Radionuclide Transport Model*, Ph.D. Thesis, Colorado State University, 1983.
7. F.O. Hoffman, R.H. Gardner and K. F. Eckerman, *Variability in Dose Estimates Associated with the Food-Chain Transport and Ingestion of Selected Radionuclides*, Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/TM-8099, NUREG/CR-2613(1982).

8. R.L. Iman and W.J. Conover, *Sensitivity Analysis Techniques : Self-Teaching Curriculum*, Sandia National Laboratory, SAND 81-1978, NUREG/CR-2350(1980).
9. R.L. Iman and M.J. Shortencarier, *A Fortran 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use with Computer Models*, Sandia National Laboratories Report, SAND83-2365, NUREG/CR-3624(1984).
10. R.L. Iman, M.J. Shortencarier and J. D. Johnson, *A Fortran 77 Program and User's Guide for the Calculation of Partial Correlation and Standardized Regression Coefficients*, Sandia National Laboratories Report, SAND85-0044, NUREG/CR-4122(1985).
11. F. Fischer, J. Raicevic and J. Paesler-Sauer, *Uncertainty Analysis for the Atmospheric Dispersion Submodule of UFOMOD with Emphasis on Parameter Correlation*, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany Report KfK-4447(1989).
12. R.L. Iman and J.C. Helton, *An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models*, Risk Analysis, 71-90(1988).

Parameter Uncertainty and Sensitivity Analysis on a Dose Calculation Model for Terrestrial Food-Chain Pathway

Chang-Woo Lee, Yong-Ho Choi, Ki-Jung Chun and Jeong-Ho Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

Parameter uncertainty and sensitivity of KFOOD model for calculating the ingestion dose via terrestrial food-chain pathway was analyzed with using Monte-Carlo approach. For the rice ingestion pathway, estimated values from KFOOD code were very conservative. Most sensitive input parameters in model were deposition velocities and soil-to-plant transfer coefficient of radionuclides.

Key words : Terrestrial food-chain model, uncertainty, sensitivity