

액체상 방류물에 의한 주민선량 평가모델 입력변수의 민감도 분석
Sensitivity Analysis for Input Parameters of a Radiological Dose Assessment
Model due to the Liquid Effluents

염정민, 황원태, 한문희, 정운관*

한국원자력연구소, 조선대학교*

대전광역시 유성구 덕진동 150, 광주광역시 동구 서석동 375*

요 약

내륙지역의 사회적, 환경적 특성을 고려한 원자력관련시설의 액체상 방류물에 의한 주민선량 평가모델 입력변수의 불확실성 및 민감도 분석을 2가지 핵종(^{234}U , ^{234}Th)과 5가지 피폭경로(농작물, 가축 생산물, 음용수, 수생식품, 강변침적물)에 대해 수행하였다. 이를 위해 환경 특성 입력변수 값의 선정 및 Monte Carlo 방법에 근거한 LHS(Latin Hypercube Sampling)를 이용한 입력변수의 Sampling을 수행하였다. 모델 평가결과에 대한 입력변수의 중요도를 나타내는 민감도 지수는 Partial Rank Correlation Coefficient(PRCC)에 의해 정량적으로 나타냈다. 분석 결과, 관계 농작물의 경우 농작물에 수율에 대한 핵종 차단분율의 비, 일관계분율, 평균 관계율, 기상제거 반감기, 음식물 섭취율 순으로 중요한 입력변수로 나타났고, 가축 생산물의 경우 육류로의 핵종 전이계수와 농작물에 수율에 대한 핵종 차단분율의 비, 일관계 분율 순으로 중요한 입력변수로 나타났다. 그리고, 음용수의 섭취의 경우는 음용수 섭취량, 수생식품의 섭취의 경우는 어류농축인자와 섭취량, 마지막으로 강변침적물에 의한 외부피폭선량 평가의 경우는 강변활동시간과 하천변 넓이인자가 중요한 입력변수로 나타났다.

Abstract

A model for off-site radiological dose evaluation due to liquid effluents generated from the operation of nuclear facilities, which are located in inland area, was developed in consideration of Korean agricultural and environmental conditions. In addition, sensitivity analysis was performed for the improvement of the model. Using the developed model, test runs for nuclear fuel fabrication facilities were conducted. Five kinds of exposure pathways (vegetation, animal products, drinking water, fresh-water-fish, shoreline deposits) and two kinds of radionuclides(^{234}U , ^{234}Th) were considered. Sensitivity analysis for input parameters of the model was conducted by applying a Monte Carlo method with Latin Hypercube Sampling

(LHS) technique. As the results, the ingestion of irrigated agricultural products was the highest contributor among the considered exposure pathways. Major sensitive input parameters for the results were the ratio of the interception fraction to the yield of agricultural plants and the human consumption rate.

1. 서 론

원자력시설의 운영에 따른 환경평가를 위해 사용되는 수학적 모델은 복잡한 환경을 모델링하는 과정에서 현실과의 차이에서 발생하는 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성의 발생요인은 선정된 모델 구조가 일정한 환경 자체를 정확히 표현하지 못함으로써 일어나는 것과 모델 입력변수의 변화이다[1,2]. 따라서 환경 평가를 위한 모델에 대한 입력변수의 민감도 분석은 예측결과에 대한 불확실성을 줄임으로써 결과의 신뢰도를 향상시킬 뿐 아니라 환경변수 설정 연구에 소요되는 비용과 시간 절약을 위해 중요한 과정으로 볼 수 있다.

현재까지 액체상 방류물에 의한 주민선량 평가는 해안지역에 위치한 원자력발전소에 국한하여 이루어져 오고 있으며, 이에 대한 모델 및 관련 변수는 매우 잘 정립되어 있다. 그러나 내륙지역에 위치한 원자력 관련시설의 운영으로 인한 액체상 방류물에 의한 피폭영향 평가모델은 최근에 개발[3]하여 대덕 부지내에 위치한 원자력 관련시설의 운영중 환경평가에 이용해 오고 있다. 그러나 개발된 모델에 사용된 입력변수의 값은 아직까지 자료의 부족으로 대부분 해안지역 주민을 대상으로 한 자료를 사용해 오고 있다. 따라서 모델에 대한 신뢰성있는 결과를 도출하기 위해서는 입력변수에 대한 상세한 부지특성 자료의 고찰이 요구된다.

본 연구에서는 Monte Carlo 방법에 근거한 LHS(Latin Hypercube Sampling) 기법[4]을 사용하여 내륙지역 원자력관련시설의 액체상 방류물에 의한 주민선량 평가모델의 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 지수는 표본 추출된 각 입력변수의 순위에 근거한 Partial Rank Correlation Coefficient(PRCC)에 의해 정량적으로 나타냈다.

2. 재료 및 방법

2.1 액체상 방류물에 의한 주민선량 평가모델

내륙지역 원자력관련시설의 액체상 방류물에 의한 주민선량 평가모델은 미국 원자력위원회의 규제지침 1.109에 제시된 방법론[5]에 근거하며, 우리 나라의 사회, 환경적 요소를 고려하여 일부 수정하였다. 각 경로에 대한 기본 모델식[3]은 다음과 같다.

① 관개 농작물 섭취에 따른 내부피폭

- 농작물

$$D_j = U \sum_i d_i \exp(-\lambda_i t_h) DF_{ij} \times \left[\frac{r f_w [1 - \exp(-\lambda_{Ei} t_e)]}{Y_v \lambda_{Ei}} + \frac{f_I B_{v,i} [1 - \exp(-\lambda_i t_b)]}{p \lambda_i} \right] \quad (1)$$

• 가축

$$D_j = U \sum_i F_{A,i} DF_{ij} \left\{ q_F d_i \exp(-\lambda_i t_h) \left[\frac{r f_w [1 - \exp(-\lambda_{Ei} t_e)]}{Y_v \lambda_{Ei}} + \frac{f_I B_{v,i} [1 - \exp(-\lambda_i t_b)]}{p \lambda_i} \right] + C_{w,i} q_{Aw} \right\} \quad (2)$$

② 음용수 섭취에 따른 내부피폭

$$D_j = U \sum_i C_{w,i} DF_{ij} \exp(-\lambda_i t_h) \quad (3)$$

③ 수생식품 섭취에 따른 내부피폭

$$D_j = U \sum_i C_{w,i} B_{f,i} DF_{ij} \exp(-\lambda_i t_h) \quad (4)$$

④ 강변 침적물에 의한 외부피폭

$$D_j = F_R \sum_i S_i DF_{ij} \quad (5)$$

2. 2 입력변수의 민감도 분석

환경평가를 위해 사용되는 수학적 모델은 복잡한 환경을 모델링하는 과정에서 현실과의 차이에서 발생하는 불확실성을 내포하고 있다. 민감도 분석하는 과정은 먼저 입력변수의 분포를 예측하고 입력분포를 모델에 대입하여 결과 예측치를 계산한다. 모델의 입력분포는 lognormal, normal, uniform, triangular 등의 여러 가지 형태를 가질 수 있다.

모델식이 비선형일 때는 실변수 값들 사이의 partial correlation coefficient 보다는 변수의 rank 들 사이의 partial rank correlation coefficient가 상관관계를 더 잘 나타내 주는 것으로 알려졌다 [6]. 여기서 rank라 함은 n개의 변수에 대한 크기 서열을 의미한다. 즉 변수의 sample n 개중 가장 작은 값을 1로 하고 그 다음 큰 값을 2로 하는 방식으로 하여 가장 큰 값을 n으로 값을 부여한다. 이 rank들 사이의 partial correlation을 구하는 것이다.

- Partial Rank Correlation Coefficient(PRCC)계산

우선 n개의 sample을 가진 변수들을 rank화 시킨 다음 두 변수의 rank 사이의 rank correlation coefficient를 계산한다. 입력변수 X_1 과 X_2 (해당 출력결과 Y)의 순위 r_x 간의 단순 상관관계를 나타내는 Spearman's rho (ρ)는 다음과 같이 나타낼 수 있다[4,7].

$$\rho_{12} = \frac{\sum \left(r_{x_{1i}} - \frac{n+1}{2} \right) \left(r_{x_{2i}} - \frac{n+1}{2} \right)}{\sqrt{\sum \left(r_{x_{1i}} - \frac{n+1}{2} \right)^2 \sum \left(r_{x_{2i}} - \frac{n+1}{2} \right)^2}} \quad (6)$$

여기서 n 은 입력변수의 표본 추출개수를 나타낸다. 여러 입력변수가 있는 경우 다른 모든 입력변수의 영향을 배제하고 어떤 한 특정한 입력변수에 대한 결과의 상관관계를 나타내는 PRCC는 다음과 같이 상관 행렬(R)과 역상관 행렬(R^{-1})을 통해 얻을 수 있다.

$$\begin{array}{c}
 X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad Y \\
 R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1k} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{k1} & \rho_{k2} & \dots & \rho_{kk} \end{bmatrix}
 \end{array} \quad (7)$$

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kk} \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식으로부터 변수 X_i 와 X_j 사이의 Partial Rank Correlation Coefficient는 아래와 같은 식으로 계산된다.

$$PRCC_{ij \cdot (all \ others)} = -\frac{b_{ij}}{\sqrt{b_{ii} b_{jj}}} \quad (9)$$

PRCC는 -1과 1사이의 값을 가지며, 절대값이 1에 가까울수록 입력변수 값의 변화에 대한 결과의 영향이 높다는 것을 의미한다. 예측결과에 대한 입력변수의 불확실성 기여는 각 입력변수에 대한 PRCC를 제공하고 100%로 정규화(normalizing)함으로써 평가될 수 있다[4].

3. 결과 및 고찰

내륙지역 원자력관련시설의 운영으로 인한 액체상 방류물에 의한 주민선량 평가모델의 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 5개의 피폭경로에서 내륙지역 원자력시설의 액체상 방류물의 주핵종인 U-234($T_{1/2}=2.44 \times 10^5$ years)와 U-238의 자핵종인 Th-234($T_{1/2}=24$ days)에 대해 고려하였다. 본 평가모델에서 하천의 특정위치에서 수중농도의 지형 및 지질학

적 요소의 다양성으로 예측이 쉽지 않으며, 보수적 관점에서 단지 하천수의 유량에 반비례 관계로부터 추산하였다. 따라서 본 민감도 분석에서는 하천수의 농도로부터 환경에서 핵종이동을 거쳐 최종적으로 인체에 피폭 영향을 주기까지 모사하는 모델의 여러 입력변수를 그 대상으로 선정하였다. 표 1과 표 2는 민감도 분석을 위해 선택된 입력변수와 해당 변수값의 분포형태 및 범위 등을 나타냈다[4.8.9].

민감도 분석을 위해 선택된 각 입력변수 값의 분포형태와 범위는 실험을 통해 보고된 여러 문헌을 참고로 하였으며, 이 밖의 입력변수에 대해서는 결정론적인 모델의 입력변수 값에 $\pm 50\%$ 의 편차를 두어 이를 해당 변수의 범위로 적용하여 분석하였다. 각 입력변수 값은 Latin Hypercube Sampling 기법으로 k값이 많은 농작물 섭취와 가축 생산물 섭취는 200개, k값이 적은 음용수 섭취, 수생식품 섭취, 강변 침적물은 100개씩 표본 추출하여 이를 PRCC에 적용하여 분석하였다.

민감도 분석 결과, 관개 농작물의 경우 농작물 수율에 대한 핵종 차단분율 비가 가장 높았으며, 잎관개 분율, 농작물 성장기동안의 평균 관개율, 음식물 섭취율, 기상제거 반감기가 모두 중요한 입력변수로 나타났으며, 가축 생산물의 경우 육류로의 핵종 전이계수와 농작물수율에 대한 핵종 차단분율 비, 잎관개 분율이 중요 입력변수로 나타났다. 음용수 섭취의 경우 음식물 섭취율, 수생식품 섭취의 경우 어류 농축인자, 강변 침적물의 경우 강변 활동 시간분율, 하천변의 넓이인자, 핵종의 축적시간, 강물과 하천변과의 전달계수 모두 중요한 입력변수로 나타났다. 그리고, 각 핵종별 분석 결과는 핵종의 축적시간에 따른 약간의 차이를 나타낼 뿐 큰 영향을 미치지 않았다.

4. 결 론

내륙지역 원자력관련시설의 액체상 방류물에 의한 주민선량 평가모델의 입력변수에 대한 불확실성 및 민감도 분석을 수행하였다. 분석 결과, 관개 농작물의 경우 농작물 수율에 대한 핵종 차단분율의 비, 잎관개분율, 평균 관개율, 기상제거 반감기, 음식물 섭취율 순으로 중요한 입력변수로 나타났고, 가축 생산물의 경우 육류로의 핵종 전이계수와 농작물 수율에 대한 핵종 차단분율의 비, 잎관개 분율 순으로 중요한 입력변수로 나타났다. 그리고, 음용수의 섭취의 경우는 음용수 섭취량, 수생식품의 섭취의 경우는 어류농축인자와 섭취량, 마지막으로 강변침적물에 의한 외부피폭선량 평가의 경우는 강변활동시간과 하천변 넓이인자가 중요한 입력변수로 나타났다.

본 연구에서 수행한 입력변수에 대한 민감도 분석은 모델 예측결과에 중요도가 높은 입력변수에 대해 우선적으로 불확실성을 줄임으로써 시간과 비용의 절감 뿐 아니라 모델 예측결과의 신뢰도 향상에 기여할 것으로 판단된다.

5. 참 고 문 헌

1. M. D. Otis, "Sensitivity and Uncertainty Analysis of the pathway Radionuclide Transport Model", PhD thesis, Colorado State University. (1983)
2. J. E. Till, and H. R. Mayer(eds), "Radiological Assessment, A Textbook on Environmental Dose

Analysis, "NUREG/CR-3332, ORNL-5968. (1983)

3. 염정민 외 3인, "내륙지역 원자력시설의 운영으로 액체상 방류물에 의한 주민선량평가 프로그램 개발", 대한방사선방어학회. (2002)

4. R. L. Iman and W. J. Conover, "Sensitivity Analysis Techniques : Self-teaching Curriculum," NUREG/CR-2350, SAND 81-1978, Sandia National Laboratories. (1982)

5. U. S. NRC, "Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10CFR Part 50, Appendix I", Regulatory Guide 1.109. (1977)

6. R. L. Iman and 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," NUREG/CR-4122, SAND 85-0044, Sandia National Laboratories. (1985)

7. 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," NUREG/CR-3624, SAND 83-2365, Sandia National Laboratories. (1984)

8. 이정호 외, "섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭선량 평가 코드개발", 한국원자력연구소, KAERI/RR-998/90. (1990)

9. F. O. Hoffman and C. F. Baes III, "A Statistical Analysis of Selected Parameters for Predicting Food Chain Transport and Internal Dose of Radionuclides", U. S. NRC, NUREG/CR-1004, ORNL/NUREG/TM-282. (1983)

표 1. Characteristics of input parameters considering in this study

입력변수	Unit	분포 형태	Vegetation				Animal Products			
			곡식, 과일류		엽채류		우유(분유)		육류	
			U-234	Th-234	U-234	Th-234	U-234	Th-234	U-234	Th-234
U	kg/yr	normal	94~200	94~200	94~200	94~200	30~66	30~66	19~56	19~56
r/Y_v	m ² /kg	lognormal	1~4	1~4	1~4	1~4	1~4	1~4	1~4	1~4
$B_{v,i}$	dimensionless	lognormal	2.5E-4~ 2.5E-2	4.2E-4~ 4.2E-2	2.5E-4~ 2.5E-2	4.2E-4~ 4.2E-2	2.5E-4~ 2.5E-2	4.2E-4~ 4.2E-2	2.5E-4~ 2.5E-2	4.2E-4~ 4.2E-2
f_w	dimensionless	normal	0.05~ 0.15	0.05~ 0.15	0.15~ 0.45	0.15~ 0.45	0.05~ 0.15	0.05~ 0.15	0.15~ 0.45	0.15~ 0.45
f_I	dimensionless	normal	0.08~ 0.24	0.08~ 0.24	0.08~ 0.24	0.08~ 0.24	0.08~ 0.24	0.08~ 0.24	0.08~ 0.24	0.08~ 0.24
t_h	hr	normal	168~504	168~504	12~36	12~36	84~252	84~252	12~36	12~36
T_w	day	lognormal	10.5~27	10.5~27	10.5~27	10.5~27	252~648	252~648	252~648	252~648
$C_{w,i}I$	L/m ² ·hr	normal	5.33~ 15.98	5.33~ 15.98	0.53~1.6	0.53~1.6	0.53~1.6	0.53~1.6	0.53~1.6	0.53~1.6
t_e	hr	normal	3240~ 4080	3240~ 4080	1680~ 2400	1680~ 2400	3240~ 4080	3240~ 4080	3240~ 4080	3240~ 4080
t_b	day	normal	7300~ 14600	7300~ 14600	7300~ 14600	7300~ 14600	7300~ 14600	7300~ 14600	7300~ 14600	7300~ 14600
p	kg/m ²	normal	230~290	230~290	260~320	260~320	150~200	150~200	150~200	150~200
$F_{A,i}$	day/kg day/liter	lognormal	-	-	-	-	5.0E-5~ 5.0E-3	5.0E-7~ 5.0E-5	5.0E-4~ 5.0E-2	2.0E-5~ 2.0E-3
q_F	kg/day	normal	-	-	-	-	40~70	40~70	51~85	51~85
q_{Aw}	liter/day	normal	-	-	-	-	50~70	50~70	40~60	40~60

표 2. Characteristics of input parameters considering in this study

입력 변수	Unit	분포 형태	Drinking Water		Fresh-water-fish		Shoreline Deposit	
			U-234	Th-234	U-234	Th-234	U-234	Th-234
U	kg/yr	normal	190~220	190~220	63~103	63~103	-	-
t_h	hr	normal	10~15	10~15	20~30	20~30	-	-
$B_{f,i}$	L/kg	lognormal	-	-	0.2~20	3~300	-	-
F_R	sec/yr	normal	-	-	-	-	126000~ 360000	126000~ 360000
W	dimensionless	normal	-	-	-	-	0.1~1.0	0.1~1.0
t_b	day	normal	-	-	-	-	7300~14600	7300~14600
S_w	L/m ² ·day	normal	-	-	-	-	50~150	50~150

그림 1. Results of Sensitivity Analysis for the Pathways

