

동적섭식경로모델의 불확실성 및 민감도분석

황원태 · 한문희 · 김은한 · 서경석
한국원자력연구소

조규성
한국과학기술원

요 약

동적섭식경로모델을 사용하여 "목초→우유→사람"의 핵종이동 경로에 대해 침적시점에 따른 입력변수의 민감도와 결과에 대한 불확실성분석을 수행하였다. Cs-137과 Sr-90의 경우 모든 침적시점에 대해 재부유인자가 가장 높은 중요도를 보였다. 두 핵종에 대해 침적시점에 따른 입력변수의 중요도의 변화는 비슷한 유형을 보였다. 목초의 성장기에서 전이율이 상대적으로 중요도가 높았고, Cs-137의 전이율은 Sr-90의 경우보다 높은 중요도를 나타냈다. 목초의 비성장기에서 Sr-90에 대한 농축인자의 중요도는 매우 높았다. Cs-137과 Sr-90에 의한 피폭선량의 95% 신뢰도구간은 약 1×10^1 , 5×10^1 범위를 나타냈다.

서 론

동적섭식경로모델은 침적시점에 따라 오염된 음식을 소비함으로써 받게 되는 내부피폭선량을 평가할 수 있다[1]. 이 모델을 이용하여 결과 (피폭선량 또는 음식물내 방사성 물질의 농도 등)을 예측하기 위해서는 많은 환경관련 자료의 입력이 요구되는데 이들 입력변수가 내포한 불확실성으로 결과에도 불확실성이 수반된다. 민감도와 불확실성분석의 공통된 목적은 중요도가 크고 불확실성이 넓은 범위를 갖는 입력변수에 대한 상세한 고찰과 아울러 더욱 주의깊게 입력변수의 선택함으로써 결과에 대한 예측의 정확도를 높이는 데 있다. 또한 민감도분석을 통해 모델을 단순화시킬 수 있으며 아울러 입력변수로써 사용되는 자료의 측정·수집에 대한 비용의 절감효과를 가져다 줄 수 있다.

본 연구에서는 원자력발전소의 사고시 음식물섭취에 의한 인체의 내부피폭에 중요하게 기여하는 "목초→우유→사람"의 핵종 이동경로에 대해 반감기가 긴 핵종인 Cs-137과

Sr-90에 대한 민감도 및 불확실성분석을 수행하였다.

본 론

1. 동적섭식경로모델

동적섭식경로모델은 환경구성요소를 구간으로 나누고 각 구간에서 시간에 따른 방사성물질의 농도변화 (Q'_h)는 식 (1)과 같이 물질수지에 근거한 미분방정식의 해를 구함으로써 평가된다[2].

$$Q'_h = \sum_{i=1}^n R_{inflow,i} - \sum_{j=1}^m R_{outflow,j} \quad (1)$$

여기서,

$R_{inflow,i}$: 핵종이동 i 메카니즘에 의해 구간 h 로 유입되는 율
[Bq/(m²·day) 또는 Bq/(kg·day)]

$R_{outflow,j}$: 핵종이동 j 메카니즘에 의해 구간 h 에서 유출되는 율
[Bq/(m²·day) 또는 Bq/(kg·day)]

동적섭식경로모델을 사용하여 젖소의 사료로 이용되는 목초의 성장기 (7월 15일)와 비성장기 (1월 15일)에 1 Bq/m²의 Cs-137이 침적하였을 때 침적후 시간에 따른 우유내 방사성물질의 농도변화를 그림 1에 나타냈다. 목초의 성장기에 방사성물질이 침적할 경우 침적후 첫해는 잎의 표면과 내부조직 (inner tissue)의 오염도가 상대적으로 높아 우유에서 방사성물질의 농도는 매우 높은 값을 보여준다. 그러나 침적후 두번째해 이후부터는 첫해와 비교하여 급격한 감소를 보여주는데 그 이유는 토양표면층에 침적된 방사성물질이 뿌리흡수층으로 이동함으로써 토양표면층에서의 농도는 감소하여 재부유에 의한 잎의 표면 오염정도는 상대적으로 낮아지며, 뿌리흡수층의 농도는 증가하나 뿌리흡수에 의한 오염은 상대적으로 비효과적인 오염 메카니즘으로 작용하기 때문이다. 목초의 비성장기에 침적할 경우 침적후 첫해는 오염도가 높은 토양 표면층의 재부유와 젖소의 토양 흡취등으로 우유에서 방사성물질의 농도는 상대적으로 높은 값을 보여준다. 그러나 침적후 두번째해 이후부터는 목초의 성장기에 침적하는 경우와 같은 이유로 인해 첫해와 비교하여 상대적으로 낮은 값을 보여준다. 두 경우 침적후 첫해와 두번째해에 대한 우유내 방사성물질의 최대 농도차이는 각각 약 1000배, 50배 정도로 음식물내 방사성물질의 농도는 뚜렷한 계절적 영향을 보여준다.

2. 민감도분석 및 불확실성분석

민감도분석과 불확실성분석은 그림 2와 같은 과정을 통해 동시에 수행될 수 있다.

먼저 입력변수값의 범위, 분포형태가 주어지면 주어진 범위내에서 입력변수값을 샘플링한다. 현재까지 가장 널리 이용되는 샘플링방법은 Monte-Carlo 방법인데 샘플링 방법에 따라 random sampling 방법과 Latin Hypercube sampling (LHS) 방법으로 대별된다. Random sampling 방법은 분포의 전구간에 걸쳐 무작위로 샘플링하는데 반해 LHS 방법은 발현빈도가 높은 범위에서는 상대적으로 많이 샘플링하고 발현빈도가 낮은 범위에서는 적게 샘플링함으로써 입력변수의 분포특성을 보다 더 잘 나타낼 수 있어 최근에 가장 널리 이용되고 있다[3]. 각 변수에 대해 샘플링된 값은 각각의 입력 sets을 형성하며 각 set을 모델에 입력함으로써 결과를 얻게 된다. 이들 입력 sets과 해당 결과를 사용하여 민감도분석과 불확실성분석을 수행한다. 결과에 대한 입력변수의 민감도는 입력변수와 결과의 상관관계를 나타내는 partial correlation coefficient (PCC) 또는 partial rank correlation coefficient (PRCC)을 구함으로써 해석되는데, PCC는 식 (2) - 식 (5)를 통해 계산한다[3].

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

$$R = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & & Y \\ \begin{matrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & & & \\ r_{k1} & r_{k2} & \cdots & r_{kk} \end{matrix} & & & & \end{matrix} \quad (3)$$

$$R^{-1} = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & & Y \\ \begin{matrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2k} \\ \vdots & & & \\ b_{k1} & b_{k2} & \cdots & b_{kk} \end{matrix} & & & & \end{matrix} \quad (4)$$

$$r_{ij \cdot (all \ others)} = -\frac{b_{ij}}{\sqrt{b_{ij} b_{jj}}} \quad (5)$$

여기서,

r : Pearson's product moment correlation coefficient (PCC)

X : 샘플링된 입력변수치

Y : 입력변수에 대한 결과치

환경내 핵종의 이동을 나타내는 입력변수는 대부분 lognormal, normal 분포를 가지므로 모델의 결과는 일반적으로 lognormal 분포를 따른다. Lognormal 분포의 평균 (\bar{X})과 95% 신뢰도 구간은 평균값의 평가자 ($\hat{\mu}$)와 표준편차의 평가자 ($\hat{\sigma}$)에 의해 나타낼 수

있다[4].

$$\bar{X} = \exp\left(\hat{\mu} + \frac{\hat{\sigma}^2}{2}\right) \quad (6)$$

$$95\% \text{ 신뢰도구간} = \exp(\hat{\mu} + 1.65\hat{\sigma}) \quad (7)$$

여기서,

$$\hat{\mu} = \sum_i \frac{\ln X_i}{n}$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (\ln X_i - \hat{\mu})^2}{n-1}}$$

n : 샘플의 갯수

3. 결과 및 고찰

3.1 민감도분석의 결과 및 고찰

동적섭식경로모델을 사용하여 "목초→우유→사람"의 핵종 이동경로에 대해 침적시점에 따른 입력변수의 민감도분석을 수행하였다. 표 1은 민감도분석에 사용된 입력변수, 변수값의 범위 및 분포형태를 보여준다. 입력변수는 LHS 방법을 사용하여 100개를 샘플링하였다. 각각 1 Bq/m²의 Cs-137과 Sr-90의 침적후 1년동안 우유를 소비함으로써 받게되는 피폭선량을 사용하여 PCC를 계산한 결과를 각각 그림 3과 4에 나타냈다. 두 핵종에 대해 PCC가 가장 큰 변수는 모든 침적시점에 대해 목초의 잎표면을 직접 오염시키는 재부유인자였다. 목초의 성장기 (5월 1일 - 9월 30일)에 침적되면 재부유인자에 대한 PCC는 상대적으로 감소하는데, 이는 목초의 잎표면에서 내부조직으로 전이율 등의 PCC가 상대적으로 증가하기 때문이다. 침적시점에 따른 PCC 변화는 두 핵종에 대해 비슷한 경향을 보였다. 목초의 성장기에서 목초의 내부조직의 오염과 관련된 전이율의 PCC가 상대적으로 높았다. 또한 Cs-137은 Sr-90보다 전이율이 빨라 상대적으로 높은 PCC를 나타냈다. 목초의 비성장기에서는 Sr-90에 대한 뿌리흡수와 관련된 농축인자의 PCC가 매우 높은 값을 나타냈다. 기후에 의한 제거 반감기는 9월에 침적할 경우 높은 PCC를 보여주는데, 그 이유는 침적시점과 목초의 수확기간이 짧아 잎의 표면에 침적된 방사성물질의 제거분율이 상대적으로 낮기 때문이었다.

3.2 불확실성분석의 결과 및 고찰

위와 같은 결과를 이용하여 불확실성분석을 수행하였다. Cs-137과 Sr-90에 대해 불확실성분석을 수행한 결과를 각각 그림 5와 6에 나타냈다. Cs-137과 Sr-90의 경우 95% 신뢰도구간은 각각 1×10^1 , 5×10^1 의 범위를 보였다. 목초의 비성장기에 침적할수

록 불확실성구간은 더욱 넓은 범위를 나타내는데, 그 이유는 재부유인자의 분포범위가 넓고 또한 중요도가 크기 때문이다.

4. 결 론

동적섭식경로모델을 사용하여 "목초→우유→사람"의 핵종 이동경로에 대해 침적시점에 따라 입력변수의 민감도분석과 결과에 대한 불확실성분석을 수행하였다. 입력변수의 민감도 및 결과에 대한 불확실성은 침적시점에 따른 뚜렷한 계절적 영향을 보였다. Cs-137과 Sr-90의 경우 모든 침적시점에 대해 재부유인자의 중요도가 가장 높았다. 두 핵종에 대해 침적시점에 따른 중요도의 변화는 비슷한 유형을 보였다. 목초의 성장기에서 전이율이 상대적으로 중요도가 높았으며, Cs-137의 전이율은 Sr-90의 경우보다 상대적으로 높았다. 목초의 비성장기에서 Sr-90에 대한 농축인자의 중요도는 매우 높았다. Cs-137과 Sr-90에 대한 95% 신뢰도구간은 약 1×10^1 , 5×10^1 범위를 가졌다. 따라서 모델의 입력변수 선택에 있어 무엇보다도 재부유인자에 대한 상세한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. W. T. Hwang, et. al., "Development of a Dynamic Ingestion Pathway Model (KORFOOD), Applicable to Korean Environment", *The Journal of the Korean Association for Radiation Protection* **18**(1), 9-24, (1993).
2. F. W. Whicker, et. al., "PATHWAY : A Dynamic Food Chain Model to Predict Radionuclides Ingestion after Fallout Deposition", *Health Physics* **52**, 717-737 (1987).
3. R. L. Iman and W. J. Conover, Sensitivity Analysis Technique : Self-Teaching Curriculum, NUREG/CR-2350, SAND81-1978, Sandia National Laboratories, USNRC, U.S.A., (1978).
4. J. E. Till and H. R. Meyer, Radiological Assessment, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, USNRC, (1983).
5. USNRC, A Statistical Analysis of Selected Parameters for Predicting Food Chain Transport and Internal Dose of Radionuclides, NUREG/CR-1004, Oak Ridge National Lab., (1979).
6. IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transport in Temperate Environment, IAEA Technical Reports Series No. 364, Vienna, (1994).

표 1. 민감도분석에 사용된 입력변수, 변수값의 범위, 분포형태[5,6]

항목 입력변수	기호	단위	변수값의 범위		분포 형태
			Cs-137	Sr-90	
목초/토양 농축비	CR	-	0.011 - 1.1	0.4 - 2.9	LN
토양의 분배계수	KD	mL/g	330 - 6400	0.67 - 600	LN
잎표면을 통한 핵종전이율	TR	l/day	3.9E-3 - 7.2E-3	7.09E-4 - 1.31E-3	TRA
재부유인자	RF	l/m	1.0E-10 - 1.0E-2	1.0E-10 - 1.0E-2	LN
기후에 의한 제거반감기	WR	day	10.5 - 27.0	10.5 - 27.0	N
차단계수	IC	m ² /kg	2.3 - 3.3	2.3 - 3.3	N

<주> LN : Lognormal, TRA : Triangular, N : Normal

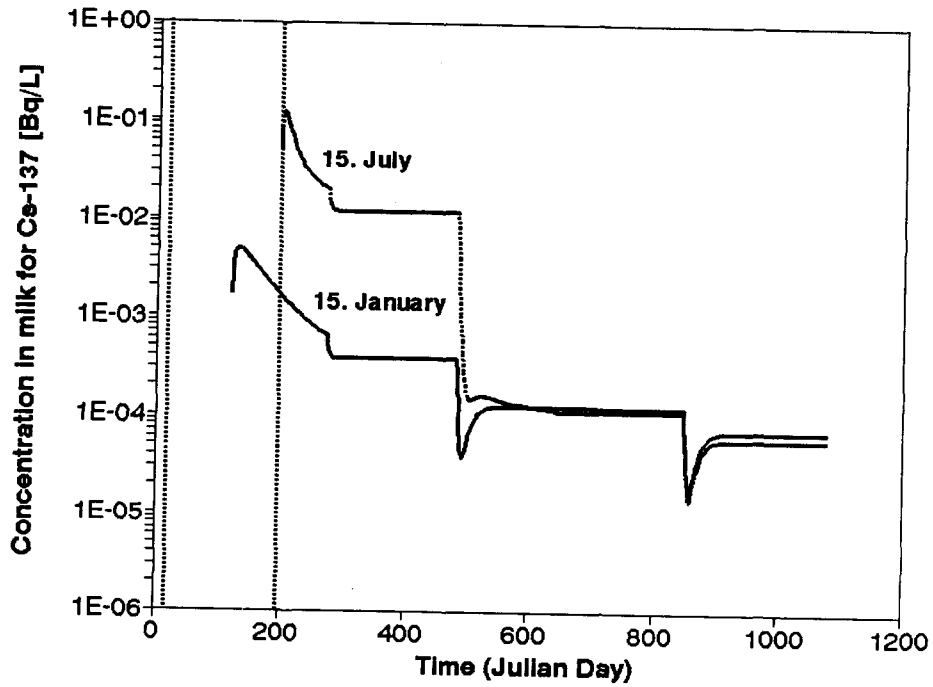


그림 1. 침적시점에 따른 우유내 방사성물질의 농도변화

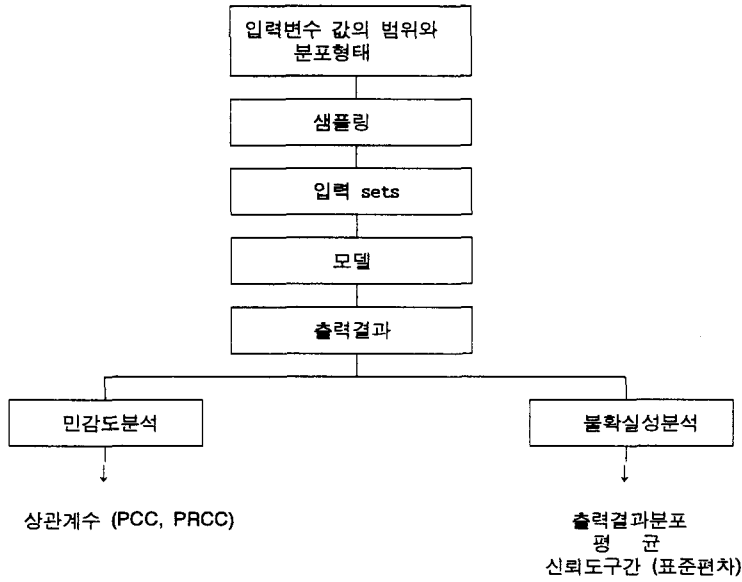


그림 2. 민감도분석 및 불확실성분석을 위한 과정

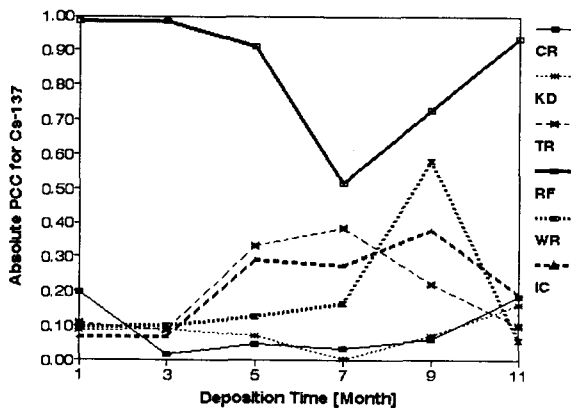


그림 3. Cs-137의 침적시점에 따른 PCC의 변화

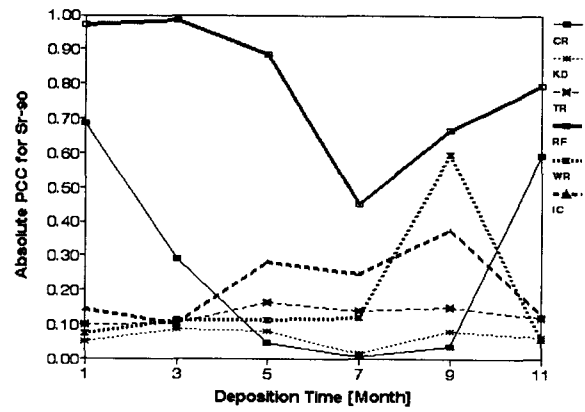


그림 4. Sr-90의 침적시점에 따른 PCC의 변화

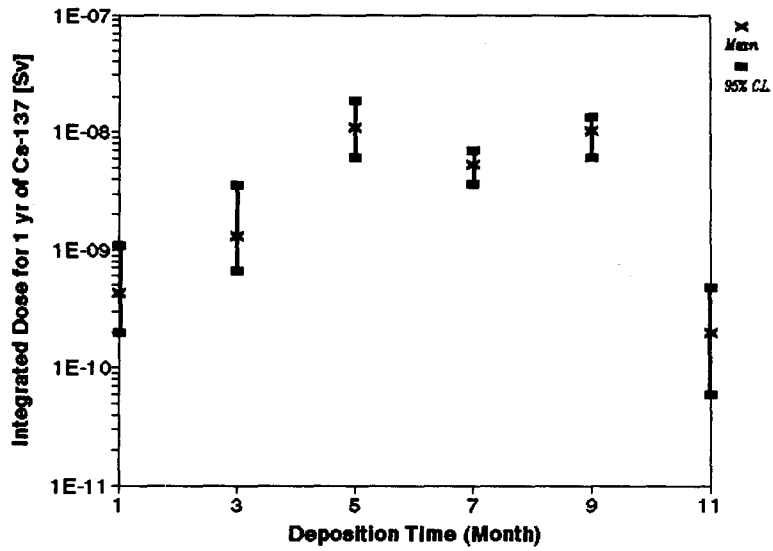


그림 5. 침적시점에 따른 Cs-137의 95% 신뢰도 구간

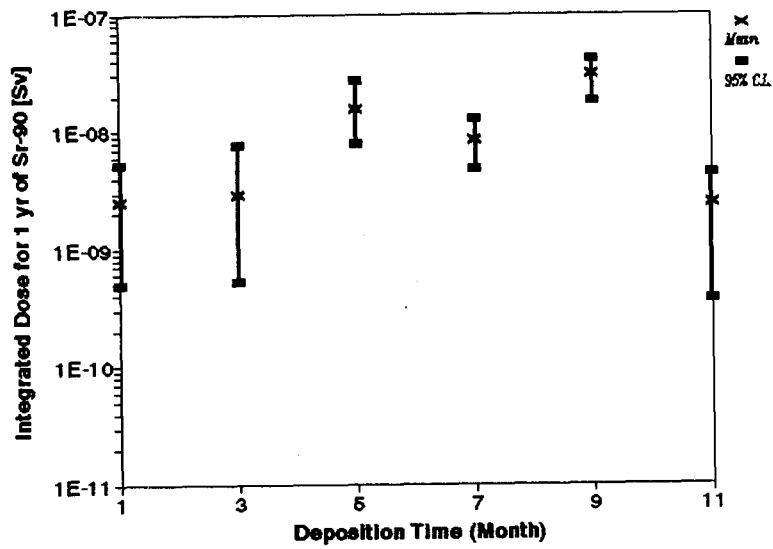


그림 6. 침적시점에 따른 Sr-90의 95% 신뢰도 구간