

Sensitivity Analysis of Input Parameters for a Dynamic Food Chain Model DYNACON

Won-Tae Hwang, Geun-Chang Lee, Moon-Hee Han and Gyuseong Cho*
Korea Atomic Energy Research Institute
*Korea Advanced Institute of Science and Technology

동적섭식경로모델 DYNACON에 대한 입력변수의 민감도분석

황원태 · 이근창 · 한문희 · 조규성*

한국원자력연구소

*한국과학기술원

(1999년 12월 9일 접수, 2000년 5월 3일 채택)

Abstract - The sensitivity analysis of input parameters for a dynamic food chain model DYNACON was conducted as a function of deposition date for the long-lived radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr). Also, the influence of input parameters for the short and long-terms contamination of selected foodstuffs (cereals, leafy vegetables, milk) was investigated. The input parameters were sampled using the LHS technique, and their sensitivity indices represented as PRCC. The sensitivity index was strongly dependent on contamination period as well as deposition date. In case of deposition during the growing stages of plants, the input parameters associated with contamination by foliar absorption were relatively important in long-term contamination as well as short-term contamination. They were also important in short-term contamination in case of deposition during the non-growing stages. In long-term contamination, the influence of input parameters associated with foliar absorption decreased, while the influence of input parameters associated with root uptake increased. These phenomena were more remarkable in case of the deposition of non-growing stages than growing stages, and in case of ^{90}Sr deposition than ^{137}Cs deposition. In case of deposition during growing stages of pasture, the input parameters associated with the characteristics of cattle such as feed-milk transfer factor and daily intake rate of cattle were relatively important in contamination of milk.

Key Words : dynamic food chain model, sensitivity analysis, input parameter, sampling

요약 - 동적섭식경로모델 DYNACON에 대한 입력변수의 민감도 분석을 장반감기 핵종 (^{137}Cs , ^{90}Sr)에 대해 침적시점의 함수로 평가하였다. 또한 장, 단기간 음식물 (곡류, 엽채류, 우유) 오염에 대한 입력변수의 영향이 고찰되었다. 입력변수는 LHS 기법으로 표본 추출되었으며, 민감도 지수는 PRCC로 나타났다. 핵종과 음식물의 종류에 따른 민감도 지수는 침적시점 뿐 아니라 장, 단기간 오염에 있어서도 뚜렷이 다르게 나타났다. 작물의 성장기 침적의 경우 장, 단기간 오염 모두 잎흡수에 의한 오염 관련변수가 중요하였다. 또한 작물의 비성장기 침적의 경우 단기간 오염에 있어서도 잎흡수에 의한 오염 관련변수가 중요하였다. 장기간 오염의 경우 잎흡수에 의한 오염 관련변수의 영향은 줄고 뿌리흡수에 의한 오염 관련변수의 영향이 증가하였다. 특히 이러한 현상은 작물의 성장기 침적에 비해 비성장기 침적의 경우에, ^{137}Cs 침적에 비해 ^{90}Sr 침적의 경우에 보다 뚜렷하였다. 목초의 성장기 침적의 경우 우유로의 핵종 전달계수, 젖소의 일일 목초 섭취량과 같은 가축 특성 관련변수가 상대적으로 우유의 오염에 중요한 입력변수로 나타났다.

중심어 : 동적섭식경로모델, 민감도분석, 입력변수, 표본추출

서론

원자력시설의 사고시 환경으로 방출된 방사성물질에 의한 주민의 피해를 줄이기 위해서는 무엇보다 환경에서의 핵종이동을 실제적으로 모사하므로써 신뢰성있는 피폭선량의 예측이 중요하다. 환경에서 핵종이동은 물리적으로 매우 복잡하여 수학적으로 완전히 나타낼 수 없을 뿐 아니라 수학적 모델에서 요구되는 변수 값의 시간과 공간에 따른 다양한 변화로 불가피하게 예측 결과는 많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 모델에 대한 입력 변수의 민감도 분석 (sensitivity analysis)은 예측결과에 대한 불확실성을 줄임으로써 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 뿐 아니라 입력변수 자료수집에 소요되는 막대한 비용과 시간 절약을 위해서도 중요한 과정이다.

한국원자력연구소에서 개발된 동적섭식경로모델 DYNACON[1]은 우리나라의 농업, 환경적 특성을 고려하여 원자력시설의 사고시점 (또는 방사성물질의 침적시점)에 대해 사고후 시간에 따른 음식물내 방사성물질의 농도 변화를 해석하므로써 오염 음식물 섭취에 따른 비상대응행위를 지원하기 위한 결정론적 평가 모델이다. 이 모델은 환경 구성요소를 구간 (compartment)으로 나누고 구간간 핵종 이동변수를 사용하여 해석하는 구간모델로 작물에 의한 핵종의 차단, 기후와 작물 성장에 따른 핵종 농도의 희석, 오염 토양의 재부유, 토양 표면층에서 뿌리층으로의 이동, 작물 잎표면에서 가식부 (또는 내부조직)로의 이동, 뿌리 흡수층에서 심층으로의 이동, 토양 뿌리층에서 핵종의 흡착 및 탈착, 뿌리흡수에 의한 가식부의 오염, 가축의 오염사료 섭취 및 배설 등 여러 핵종의 이동과정이 고려된다. 이러한 복잡한 핵종의 환경내 이동을 모사하기 위해서는 많은 부지특성 입력 변수 값이 요구되며 자료수집에 대한 실험적 한계로 이들 변수값과 예측 결과는 넓은 범위의 불확실성을 내포하고 있다.

본 연구에서 Monte Carlo 방법의 한 기법으로 Latin Hypercube Sampling (LHS) 기법을 사용하여 동적섭식경로모델 DYNACON의 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 지수는 표본 추출된 각 입력변수 값의 크기 순위 (ranking)에 근거한 Partial Ranking Correlation Coefficient (PRCC)로 나타냈으며, 1) 핵종 (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr), 2) 음식물 종류 (곡류, 엽채류, 우유), 3) 침적시점 (작물의 성장기 침적과 비성장기 침적), 4) 오염기간 (곡류와 엽채류의 경우 침적후 첫해와

50번째 해 동안 수확되는 음식물의 누적농도, 우유의 경우 침적시점부터 1년과 50년까지 생산되는 '우유의 누적농도'의 '합수로 그 영향이 고찰되었다.

재료 및 방법

동적섭식경로모델

DYNACON은 환경구성요소를 구간으로 나누고 구간간 핵종 이동을 해석하는 구간모델 (그림 1)로 구간 *i*에서의 방사성물질의 농도 X_i (Bq dry-kg⁻¹ 또는 Bq m⁻²)는 구간 *i*로 방사성물질의 유입율과 유출율의 차이로써 표현된다.

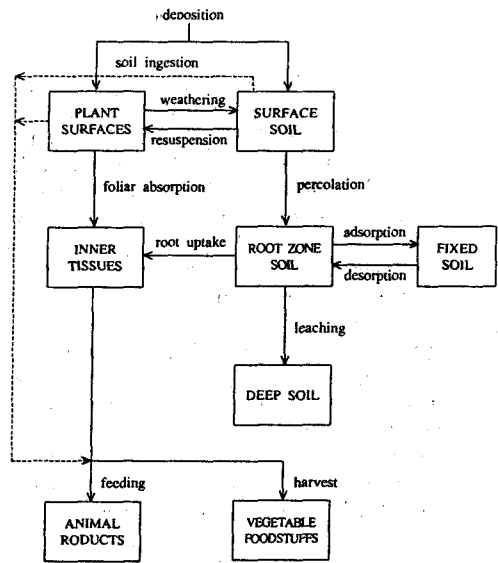


Fig. 1. The transfer processes of radionuclides between compartments considered in DYNACON.

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} X_j - X_i \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (1)$$

여기서,

λ_{ij} : 구간 *i*에서 구간 *j*로의 핵종 이동율 (d^{-1}),

n : 구간 *i*의 오염에 영향을 미치는 구간수.

위와 같이 각 구간에 대한 미분방정식이 수립되면 해당 구간에 대한 초기값과 함께 연립 미분방정식의 수치해로부터 각 구간에 대한 해를 얻는다. 이들 수치해로부터 식물성 식품 (C_{veg} , Bq

wet·kg⁻¹)과 동물성 식품 (C_{anim}, Bq fresh·kg⁻¹)에 대한 방사성물질의 농도는 다음 식으로 평가한다.

$$C_{veg} = \{(X_{A,h} \cdot f_w) + X_{B,h}\} e^{-\lambda_d t} \cdot f_d \quad (2)$$

$$C_{anim} = C_{anim,t-\Delta t} e^{-(\lambda_s+\lambda_d)\Delta t} + \sum_k \epsilon_k X_k(t) \quad (3)$$

여기서,

X_{A,h}: 작물의 수확시점에서 잎표면에서의 방사성물질 농도 (Bq·dry·kg⁻¹)

X_{B,h}: 작물 수확시점에서 가식부에서의 방사성물질 농도 (Bq·dry·kg⁻¹)

f_w: 잎표면 세척후 방사성물질의 잔류 분율

f_d: 수분함량을 고려한 무게에 대한 건조무게의 비

Δt: 계산시간간격 (d),

λ_b: 가축의 배설에 따른 핵종의 제거율

$$(\text{= ln}2/T_{1/2,b}, d^{-1}),$$

λ_d: 방사능 붕괴상수 (= ln2/T_{1/2,d}, d⁻¹),

T_{1/2,b}: 가축에 대한 핵종의 생물학적 반감기 (d),

T_{1/2,d}: 핵종의 물리적 반감기 (d),

ε_k: 가축의 섭취형태 k (사료, 토양 등)에 따른 동물성 식품의 오염과 관계되는 인자

모델 입력변수에 대한 민감도 분석

모델 입력변수에 대한 민감도 분석을 위해 먼저 입력변수 값의 분포형태, 값의 범위, 입력변수간 상관관계 등 각 변수의 특성을 고려하여 입력변수 값을 표본 추출한다. 이를 위해 Monte Carlo 방법의 한 기법인 LHS 기법은 적은 수의 표본 추출로도 모집단의 특성을 잘 반영할 수 있어 최근에 널리 이용되고 있다[2]. 각 변수에 대해 표본 추출된 값은 변수의 상관관계를 고려하여 순서대로 세트(set)를 구성하며 모델에 입력되어 해당 세트에 대한 결과를 얻는다. 입력변수 값의 세트와 해당 결과를 사용하여 모델결과에 대한 입력변수 값의 선형관계를 나타내는 민감도 지수를 구한다. 민감도 지수는 표본 추출된 입력변수와 결과를 가공하지 않은 값 (raw data)을 사용하여 구하는 방법과 값의 크기에 따른 순위를 사용하여 구할 수 있다. 전자에 근거한 민감도 지수를 Partial Correlation Coefficient (PCC)라 하며, 후자에 근거한 민감도 지수를 Partial Rank Correlation Coefficient (PRCC)라 한다. PRCC에 근거한 민감도 지수는

보다 최근에 개발된 방법으로 입력변수의 분포가 정규분포를 갖지 않을 경우와 입력변수에 대해 결과가 선형적 관계를 갖지 않는 경우에 결과에 대한 신뢰성이 보다 높으며 또한 이러한 방법은 입력변수의 극한값에 의한 결과의 영향을 줄이는데 보다 유용하다. 입력변수 X₁ 과 X₂ (해당 출력결과 Y)의 순위 r_x 간의 단순 상관관계를 나타내는 Spearman's rho (ρ)는 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\rho_{12} = \frac{\sum (r_{x_{1i}} - \frac{n+1}{2})(r_{x_{2i}} - \frac{n+1}{2})}{\sqrt{\sum (r_{x_{1i}} - \frac{n+1}{2})^2 \sum (r_{x_{2i}} - \frac{n+1}{2})^2}} \quad (4)$$

여기서 n 은 입력변수의 표본 추출 개수를 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[3].

$$R = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \dots & Y \\ \begin{matrix} \rho_{11} \\ \rho_{21} \\ \vdots \\ \rho_{k1} \end{matrix} & \begin{matrix} \rho_{12} \\ \rho_{22} \\ \dots \\ \rho_{k2} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} \rho_{1k} \\ \rho_{2k} \\ \dots \\ \rho_{kk} \end{matrix} \end{matrix} \quad (5)$$

$$R^{-1} = \begin{matrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kk} \end{matrix} \quad (6)$$

$$PRCC_{ij \cdot (all \ others)} = -\frac{b_{ij}}{\sqrt{b_{ii} b_{jj}}} \quad (7)$$

PRCC는 -1과 1 사이의 값을 가지며, 절대값이 1에 가까울수록 입력변수 값의 변화에 대한 결과의 영향이 높다는 것을 의미한다.

결과 및 고찰

동적섭식경로모델 DYNACON은 우리나라의 농업, 환경적 특성을 고려하여 방사성물질의 침적시점에 따른 음식물내 방사성물질의 농도 변화율에

Table 1. Characteristics of input parameters used in sensitivity analysis(4,5,6,7).

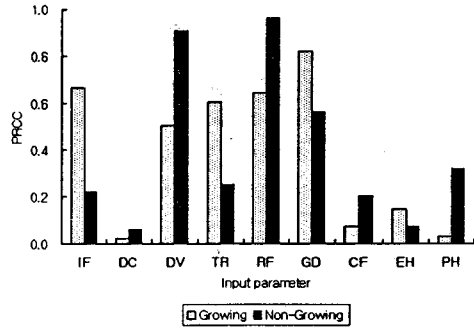
Symbol	Description	Units	Range of value			Distribution type
			Cereals	L. vegetables	Milk	
TF	Transfer factor of ^{137}Cs from feed to milk	d L^{-1}	-	-	$2.5\text{E}-3 - 1.6\text{E}-2$	LN
FI	Transfer factor of ^{90}Sr from feed to milk	d L^{-1}	-	-	$6.4\text{E}-4 - 4.5\text{E}-3$	LN
FL	Feed intake rate of a daily cow	dry-kg d^{-1}	-	-	$3.6 - 15.0$	NR
IF	Foliar interception factor	$\text{m}^2 \text{dry-kg}^{-1}$	$1.0 - 4.0$	$1.0 - 4.0$	$1.0 - 4.0$	LN
DC	Distribution coefficient of ^{137}Cs in soil	mL g^{-1}	$36.5 - 30,000$	$36.5 - 30,000$	$36.5 - 30,000$	LN
DV	Distribution coefficient of ^{90}Sr in soil	mL g^{-1}	$2.0 - 1,000$	$2.0 - 1,000$	$2.0 - 1,000$	LN
DV	Deposition velocity of resuspended radionuclide	m s^{-1}	$2.6 - 4,900$	$2.6 - 4,900$	$2.6 - 4,900$	LN
TR	Foliar absorption rate for ^{137}Cs	d^{-1}	$3.9\text{E}-3 - 5.5\text{E}-3$	$3.9\text{E}-3 - 5.5\text{E}-3$	$3.9\text{E}-3 - 5.5\text{E}-3$	TA
RF	Foliar absorption rate for ^{90}Sr	d^{-1}	$7.8\text{E}-4 - 1.0\text{E}-3$	$7.8\text{E}-4 - 1.0\text{E}-3$	$7.8\text{E}-4 - 1.0\text{E}-3$	TA
RF	Resuspension factor	m^{-1}	$3.0\text{E}-8 - 3.4\text{E}-3$	$3.0\text{E}-8 - 3.4\text{E}-3$	$3.0\text{E}-8 - 3.4\text{E}-3$	LN
GD	Half-life of radionuclide due to plant growth	d	$13.0 - 29.0$	$13.0 - 29.0$	$13.0 - 29.0$	NR
SC	Soil intake rate of a daily cow	kg d^{-1}	-	-	$0.1 - 1.0$	UF
CF	Plant/soil concentration ratio for ^{137}Cs	unitless	$1.0\text{E}-3 - 1.0\text{E}-1$	$1.9\text{E}-2 - 1.7$	$1.1\text{E}-2 - 1.1$	LN
CF	Plant/soil concentration ratio for ^{90}Sr	unitless	$2.2\text{E}-2 - 6.6\text{E}-1$	$7.4\text{E}-1 - 10.0$	$4.0\text{E}-2 - 2.9$	LN
EH	Half-life of radionuclide due to weathering	d	$20.0 - 30.0$	$20.0 - 30.0$	$20.0 - 30.0$	NR
FX	Adsorption rate of ^{137}Cs in soil	d^{-1}	-	-	$1.9\text{E}-4 - 1.9\text{E}-2$	LN
DS	Desorption rate of ^{137}Cs in soil	d^{-1}	$2.1\text{E}-5 - 2.1\text{E}-3$	$2.1\text{E}-5 - 2.1\text{E}-3$	$2.1\text{E}-5 - 2.1\text{E}-3$	LN
PH	Percolation rate from soil surface into root zone	d^{-1}	$1.73\text{E}-2 - 2.31\text{E}-2$	$1.73\text{E}-2 - 2.31\text{E}-2$	$1.73\text{E}-2 - 2.31\text{E}-2$	NR
FP	Fraction of radionuclide remaining after washing	unitless	-	$0.3 - 0.7$	-	UF
BH	Biological half-life of ^{137}Cs for milk	d	-	-	$1.0 - 3.0$	NR
BH	Biological half-life of ^{90}Sr for milk	d	-	-	$2.5 - 4.5$	NR

(Note) The values in triangular distribution (TA) represent minimum, most probable and maximum values, respectively. (LN : lognormal distribution, NR : normal distribution, TA : triangular distribution, UF : uniform distribution)

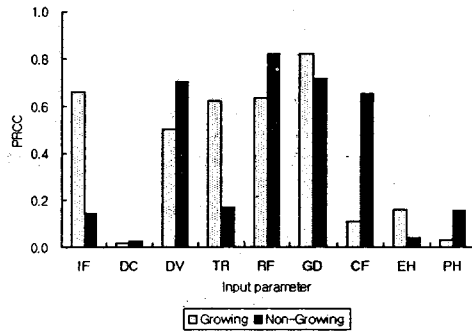
측한다. 현재 모델에서는 13 종류 (쌀, 곡류, 콩류, 엽채류, 근채류, 과채류, 감자류, 과일류, 우유, 쇠고기, 돼지고기, 닭고기, 난류)의 우리나라 대표적 음식물과 원자력발전소 사고시 오염 음식물에 의한 피폭영향에 중요하게 기여하는 3 종류의 핵종 (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I)이 고려된다. 본 연구에서는 작물의 일부분을 섭취하는 음식물로 곡류를, 전체 부위를 섭취하는 음식물로 엽채류를, 육류성 식품으로 우유를 대표적 음식물로 선택하여 장반감기 핵종인 ^{137}Cs ($T_{1/2}=30\text{년}$)과 ^{90}Sr ($T_{1/2}=29\text{년}$)에 대해 모델의 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 우리나라의 경우 작물의 일부분을 섭취하는 대표적 음식물로 쌀을 꼽을 수 있으나 실험자료가 극히 적어 비교적 유사한 특성을 갖는 곡류를 선택하였다. 표 1은 민감도 분석을 위해 선택된 입력변수와 해당 변수값의 분포형태 및 범위 등을 나타냈다[4,5,6,7]. 변수값의 분포형태와 범위는 실험을 통해 보고되고 있는 여러 문헌으로부터 선택되었으며, 그렇지 못한 변수에 대해서는 저자의 주관적 판단에 근거하였다. 작물의 파종기, 수확기, 수율, 토양의 밀도 등 자연생태 관련 입력변수의 불확실성은 고려하지 않았다. 여러 문헌에서 제시된 실험자료는 다양한 조건에 따른 결과로 입력변수간 상관관계는 무시하였다. 선택된 각 입력변수 값은 LHS 기법으로 500개씩 표본추출되었으며, 민감도 지수는 PRCC로 나타났다. 장, 단기간 음식물의 오염에 대한 입력변수의 영향을 고찰하기 위해 곡류와 엽채류는 침적후 첫해와 50번째 해 동안 수확되는 음식물의 누적농도 (Bq d kg^{-1} per Bq m^2)를, 연속적으로 생산되는 우유는 침적시점으로부터 1년과 50년 동안 생산되는 우유의 누적 농도 (Bq d L^{-1} per Bq m^2)를 최종결과 값으로 사용하였다.

그림 2는 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 의 침적후 첫해 동안에 수확되는 곡류의 누적농도 (단기간 오염)에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. 곡류의 성장기 (성장기간 : 1월 1일 ~ 5월 31일, PRCC는 1, 3, 5월 침적에 대한 PRCC 절대값의 평균) ^{137}Cs 침적에 대한 중요 입력변수로는 성장에 따른 희석율 (PRCC=0.82), 잎의 차단계수 (0.66), 재부유인자 (0.64), 잎표면에서 가식부로의 흡수율(0.60)이, 비성장기 (PRCC는 7, 9, 11월 침적에 대한 PRCC 절대값의 평균)의 경우에는 재부유인자 (0.96)와 재부유된 핵종의 침적속도 (0.91)로 나타났다. 곡류의 성장기 ^{90}Sr 침적의 경우는 ^{137}Cs 침적의 경우와 유사한 결과를 나타내나, 비성장기 침적의 경우에는 재부유인자 (0.82)와 재부유된 핵종의 침

적속도 (0.70) 뿐 아니라 성장에 따른 희석율 (0.72), 뿌리흡수에 의한 농축인자 (0.65)도 중요한 입력변수로 나타났다.



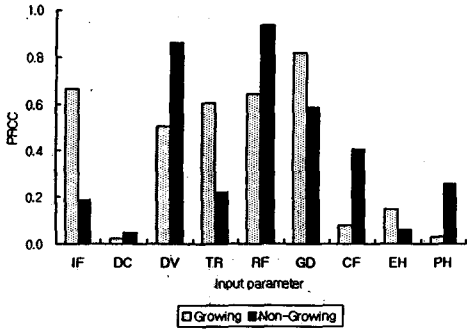
(a) ^{137}Cs deposition



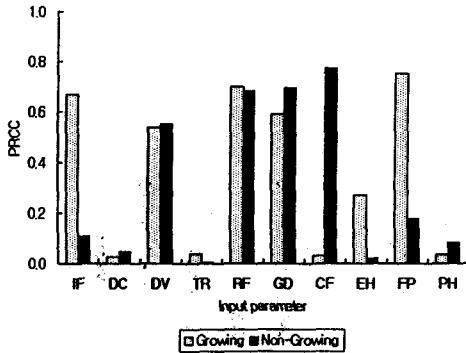
(b) ^{90}Sr deposition

Fig. 2. Partial Ranking Correlation Coefficient (PRCC) of input parameters for short-term contamination in cereals.

그림 3은 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 침적후 50번째 해 동안 수확되는 곡류의 누적농도 (장기간 오염)에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. ^{137}Cs 침적의 경우 장기간 오염에 대한 입력변수의 영향은 곡류의 성장기와 비성장기 모두 단기간 오염의 경우와 유사하다. 곡류의 성장기 ^{90}Sr 침적의 경우에도 장기간 오염에 대한 입력변수의 중요도는 단기간 오염의 경우와 유사하나, 비성장기 침적의 경우에는 단기간 오염의 경우와 달리 뿌리흡수에 의한 농축인자 (0.85), 성장에 따른 희석율 (0.85), 토양내 핵종의 분배계수 (0.76)가 중요한 입력변수로 작용하였다.



(a) ¹³⁷Cs deposition



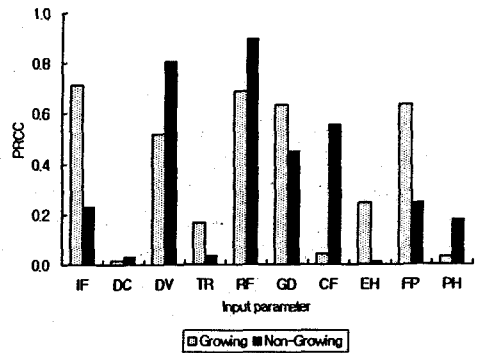
(b) ⁹⁰Sr deposition

Fig. 3. Partial Ranking Correlation Coefficient (PRCC) of input parameters for long-term contamination in cereals.

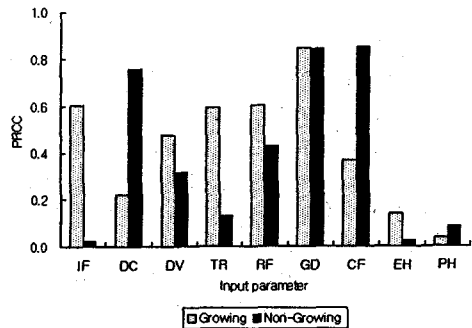
이러한 결과로부터 곡류의 경우 같은 방사성물질의 침적량에 대해 잎흡수에 의한 오염은 뿌리흡수에 의한 오염보다 훨씬 강하며 심지어 곡류의 비성장기 ¹³⁷Cs 침적의 경우에도 재부유인자, 재부유된 핵종의 침적속도와 같이 잎흡수 관련 변수가 지배적으로 오염에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 또한 곡류의 비성장기 ⁹⁰Sr 침적의 경우에서도 장기간 오염을 제외하고 잎흡수 관련 변수가 오염 영향에 지배적이었다. 그러나 ⁹⁰Sr은 ¹³⁷Cs보다 상대적으로 뿌리흡수력이 강해 곡류의 비성장기 ⁹⁰Sr 침적의 장기간 오염 영향에 있어서는 뿌리흡수에 의한 오염 관련변수의 영향이 높았다.

그림 4는 ¹³⁷Cs과 ⁹⁰Sr의 침적후 첫해 동안에 수확되는 엽채류의 누적농도 (단기간 오염)에 대한

입력변수의 PRCC를 보여준다. 엽채류의 성장기 (성장기간 : 8월 20일 ~ 11월 15일, PRCC는 9, 11월 침적에 대한 PRCC 절대값의 평균) ¹³⁷Cs 침적의 경우 잎의 차단계수 (PRCC=0.71), 재부유인자 (0.69), 잎표면 세척인자 (0.63), 성장에 따른 농도의 회석률 (0.63)이 중요한 입력변수로 나타났다. 엽채류의 비성장기 ¹³⁷Cs 침적의 경우 (PRCC는 1, 3, 5, 7월 침적에 대한 PRCC 절대값의 평균) 재부유인자 (0.89)와 재부유된 핵종의 침적속도 (0.81)가 중요한 입력변수였다. 엽채류의 성장기 ⁹⁰Sr 침적의 경우 중요한 입력변수는 ¹³⁷Cs 침적의 경우와 유사하지만 비성장기 침적의 경우에는 ¹³⁷Cs 침적의 경우와 달리 잎표면 오염 관련변수의 영향은 줄고 뿌리흡수에 의한 농축인자 (0.78)가 가장 중요한 입력변수로 나타났다.



(a) ¹³⁷Cs deposition



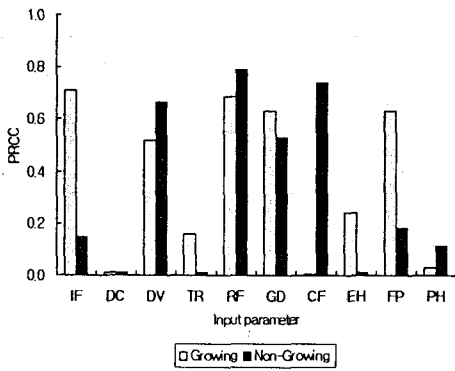
(b) ⁹⁰Sr deposition

Fig. 4. Partial Ranking Correlation Coefficient (PRCC) of input parameters for short-term contamination in leafy vegetables.

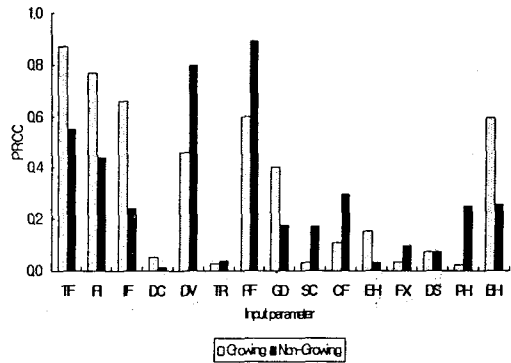
그림 5는 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 의 침적후 50번째 해 동안 수확되는 엽채류의 누적농도 (장기간 오염)에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. 엽채류의 성장기 ^{137}Cs 침적의 경우 입력변수의 오염에 대한 영향은 단기간 오염의 경우와 유사하나, 비성장기 침적의 경우에는 재부유인자 (0.79)와 재부유된 핵종의 침적속도 (0.67) 이외에 뿌리흡수에 의한 농축인자 (0.74)가 오염에 중요한 입력변수로 나타났다. 엽채류의 성장기 ^{90}Sr 침적의 경우 성장에 따른 핵종 농도의 희석율 (0.67), 잎표면 세척인자 (0.62), 재부유인자 (0.61)가, 비성장기 침적의 경우에는 뿌리흡수에 의한 농축인자 (0.86), 토양내 핵종의 분배계수 (0.83), 성장에 따른 핵종 농도의 희석율 (0.76)이 중요한 입력변수로 나타났다.

엽채류도 전반적으로 곡류의 경우와 유사한 결과를 나타내나 곡류에 비해 엽채류의 강한 뿌리흡수력으로 ^{90}Sr 침적의 경우 장기간 오염은 물론 엽채류의 비성장기 침적시 단기간 오염에 있어서도 뿌리흡수에 의한 농축인자가 중요한 입력변수로 작용하였다. 곡류에서는 고려되지 않는 잎표면 세척인자는 엽채류의 성장기 침적의 경우 장, 단기간 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 오염에 있어서 모두 중요한 입력변수였다.

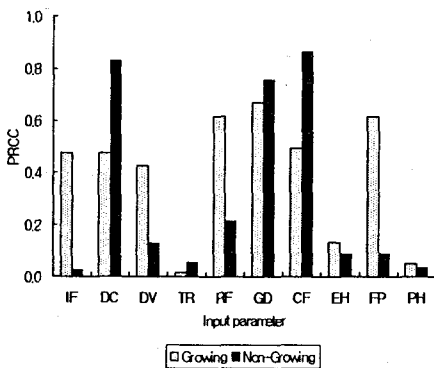
그림 6은 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 의 침적시점으로부터 1년 동안 생산되는 우유의 누적농도 (단기간 오염)에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. 목초의 성장기 (성장기간 : 5월 1일 ~ 9월 30일, PRCC는 5, 7, 9월 침적에 대한 PRCC 절대값의 평균)



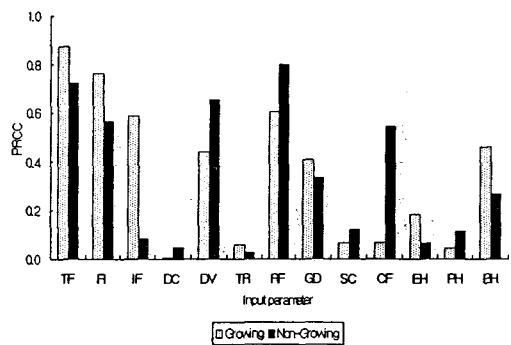
(a) ^{137}Cs deposition



(a) ^{137}Cs deposition



(b) ^{90}Sr deposition



(b) ^{90}Sr deposition

Fig. 5. Partial Ranking Correlation Coefficient (PRCC) of input parameters for long-term contamination in leafy vegetables.

Fig. 6. Partial Ranking Correlation Coefficient (PRCC) of input parameters for short-term contamination in milk.

¹³⁷Cs 침적의 경우 중요한 입력변수는 오염 목초에서 우유로의 핵종 전이계수 (PRCC=0.87), 가축의 일일 목초 섭취량 (0.77), 잎의 차단계수 (0.66), 재부유인자 (0.60), 생물학적 반감기 (0.60)였다. 목초의 비성장기 ¹³⁷Cs 침적의 경우 (PRCC는 1, 3, 11월 침적에 대한 PRCC 절대값의 평균) 중요한 입력변수는 재부유인자 (0.89), 재부유된 핵종의 침적속도 (0.80)였다. 목초의 성장기 ⁹⁰Sr 침적의 경우 오염 목초에서 우유로의 핵종 전이계수 (0.87), 가축의 일일 목초 섭취량 (0.76), 재부유인자 (0.61)가, 비성장기 침적의 경우는 ¹³⁷Cs 침적시 중요한 입력변수 이외에 오염 목초에서 우유로의 핵종 전달계수 (0.72)도 중요한 입력변수로 작용하였다.

그림 7은 ¹³⁷Cs과 ⁹⁰Sr의 침적시점으로부터 50년 동안 생산되는 우유의 누적농도 (장기간 오염)에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. 목초의 성장

기와 비성장기 ¹³⁷Cs 침적의 경우 장기간 오염에 대한 입력변수의 영향은 단기간 오염의 경우와 유사하다. 또한 목초의 성장기 ⁹⁰Sr 침적의 경우도 장기간 오염에 대한 입력변수의 영향은 단기간 오염의 경우와 유사한 결과를 나타내나, 비성장기 침적의 경우에는 재부유인자, 재부유된 핵종의 침적속도와 같은 지표면 오염 관련변수의 영향은 줄고 대신 뿌리흡수에 의한 오염 관련변수인 뿌리흡수에 의한 농축인자 (0.72), 토양내 핵종의 분배계수 (0.63)의 영향은 증가하였다.

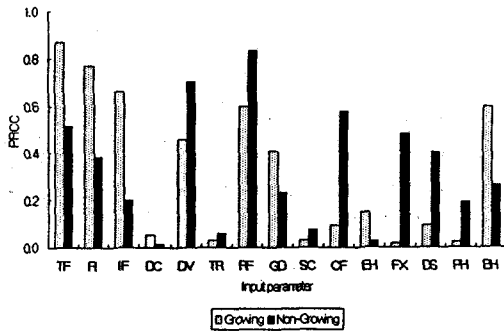
목초의 비성장기 ¹³⁷Cs의 침적에 따른 우유의 오염의 경우를 제외하고 전반적으로 가축 특성 관련변수인 우유로의 핵종 전달계수, 가축의 일일 목초 섭취량이 중요한 입력변수로 나타났다. 목초의 오염 관련 변수중에서 목초의 비성장기 ⁹⁰Sr의 침적에 대한 장기간 오염의 경우를 제외하고 뿌리흡수에 의한 오염 관련변수보다 지표면에 의한 오염 관련변수의 영향이 지배적이었다.

이와 같이 방사성물질의 침적시점과 음식물 오염기간에 따른 입력변수의 중요도 차이는 작물의 성장특성, 환경내 핵종의 이동 특성, 가축의 신진 대사 등에 기인한다.

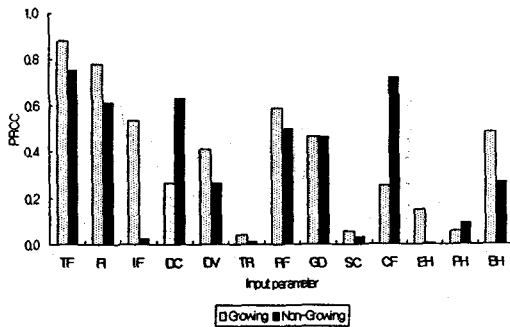
결론

동적섭식경로모델 DYNACON에 대한 입력변수의 민감도 분석을 방사성물질의 침적시점에 따라 수행하였다. 또한 장, 단기간 음식물 오염에 대한 입력변수의 영향이 고찰되었다. 입력변수에 대한 민감도 지수는 핵종, 음식물 종류, 침적시점 뿐 아니라 오염기간에 있어서도 뚜렷이 다르게 나타났다. 일반적으로 같은 방사성물질의 침적량에 대해 잎흡수에 의한 음식물의 오염영향은 뿌리흡수에 의한 영향보다 훨씬 높아 작물의 성장기 침적의 경우는 물론 비성장기 침적의 경우 단기간 오염에 있어서도 잎흡수에 의한 오염 관련변수가 중요하였다. 그러나 장기간 음식물 오염의 경우에는 잎흡수에 의한 오염 관련변수의 영향은 줄고 대신 뿌리흡수에 의한 오염 관련변수의 영향이 증가하였다. 특히 이러한 현상은 상대적으로 뿌리흡수력이 강한 ⁹⁰Sr의 경우에 보다 뚜렷하였다. 목초의 성장기 경우 우유로의 핵종 전달계수, 젖소의 일일 목초 섭취량과 같은 가축 특성관련 변수가 상대적으로 우유의 오염에 중요한 입력변수로 나타났다.

본 연구의 결과는 예측결과에 대한 불확실성을



(a) ¹³⁷Cs deposition



(b) ⁹⁰Sr deposition

Fig. 7. Partial Ranking Correlation Coefficient (PRCC) of input parameters for long-term contamination in milk.

줄임으로써 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 뿐 아니라 입력변수 자료수집에 소요되는 막대한 비용과 시간 절약을 위해 중요한 자료로 제공될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. W. T. Hwang, G. S. Cho and M. H. Han, "Development of a Dynamic Food Chain Model DYNACON and Its Application to Korean Agricultural Conditions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 35(6), 454-461 (1998).
2. R. L. Iman and J. C. Helton, "An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models", *Risk Analysis*, 8(1), 71-90 (1988).
3. R. L. Iman and W. J. Conover, *Sensitivity Analysis Techniques : Self-Teaching Curriculum*, U. S. Nuclear Regulation Commission, NUREG/CR-2350, SAND81-1978 (1982).
4. 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. Nuclear Regulation Commission, NUREG/CR-1004, ORNL/NUREG/TM-282 (1979).
5. M. D. Otis, *Sensitivity and Uncertainty Analysis of the PATHWAY Radionuclide Transport Model*, Ph. D. Thesis, Colorado State University (1983).
6. J. E. Till and H. R. Meyer, *Radiological Assessment : A Textbook on Environmental Dose Analysis*, U. S. Nuclear Regulation Commission, NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).
7. J. A. Jones, P. A. Mansfield and M. J. Crick, *Uncertainty Analysis of the Predicted Consequences of Nuclear Accidents Using the NRPB Code MARC-2A*, National Radiological Protection Board, NRPB-R274 (1995).