'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력 시설의 정상운영중 섭식경로에 대한 입력변수의 민감도분석

Sensitivity Analysis of Input Parameters for Ingestion Pathways in Routine Releases of Radionuclides

황원태, 이근창, 서경석, 김은한, 최영길, 한문희, 최용호

한국원자력연구소
대전관역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력 시설의 정상 운영중 오염 음식물 섭취에 의한 피폭 평가모델 (미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109 모델)의 입력변수에 대한 민감도 분석을 3가지 음식물 (쌀, 엽채류, 우유)과 2가지 핵종 (^{137}Cs, ^{131}I)에 대해 수행하였다. 입력변수 값의 표본추출은 Monte Carlo 방법에 근거한 Latin hypercube sampling 기법을 사용하였다. 민감도지수는 partial rank correlation coefficient를 사용하여 정량적으로 나타냈다. 평가결과, 대부분 음식물과 핵종에 대해 농작물의 수율에 대한 차단계수의 비와 음식물의 소비율은 중요한 입력변수였다. 또한 우유의 경우 사료에서 우유로의 전달계수와 젖소의 사료 섭취율도 한 중요한 입력변수였다. 그외 ^{137}Cs 침적의 경우에는 기후에 의한 핵종의 제거 반감기가, ^{131}I 침적의 경우에는 생산에서 소비까지의 지연시간이 상대적으로 중요한 입력변수였다.

Abstract

The sensitivity analysis of input parameters was performed for an ingestion pathway model in routine releases of radionuclides (U. S. NRC's Regulatory Guide 1.109 model). In this study, three kinds of typical Korean foodstuffs (rice, leafy vegetables, milk) and two kinds of radionuclides (^{137}Cs, ^{131}I) were considered. The values of input parameters were sampled using a Latin hypercube sampling technique based on Monte Carlo approach. The sensitivity indices were quantitatively evaluated using the partial rank correlation coefficients. As the results, the ratio of the interception fraction to the yield of agricultural plants and the human consumption rate were sensitive input parameters for ingestion dose. Additionally, in case of milk, the transfer factor of radionuclides from animal intake to milk and the daily intake rate of feedstuffs were sensitive input parameters. The weathering removal half-life and the delay time from food production to human consumption were relatively sensitive for ^{137}Cs and ^{131}I depositions, respectively.

1. 서 론

원자력시설의 정상 운영중 대기로 방출된 방사성물질은 환경내 여러 경로를 거쳐 인체에로의 방사능 피해를 주게된다. 실제 환경에서 핵종이동은 물리적으로 매우 복잡하여 수학적으로 완전히 나타낼 수 없을 뿐 아니라 수학적 모델에서 요구되는 변수 값의 시간과 공간에 따른 다양한 변화로 피폭선량 평가모델의 예측결과는 불가피하게 많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 모델에 대한 입력변수의 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.

환경으로 방출된 방사성 물질로부터 받게되는 일반인에 대한 피폭선량 평가모델은 미국 원자력규제위원회 (U. S. NRC)의 규제지침 (Regulatory Guide) 1.109[1]에 잘 정립되어 있으며, 방사성물질은 농작물의 잎에 직접 침적되어 음식물을 오염시키거나 또는 지표에 침적되어 오염된 토양으로부터 뿌리흡수를 통해 음식물을 오염시킨다. 이러한 환경에서의 핵종이동을 신뢰성있게 모사하기 위해서는 많은 부지특성 입력자료가 요구되는데, 자료수집에 대한 실험적 한계로 이들 변수값과 예측 결과는 넓은 범위의 불확실성을 내포하고 있다.

본 연구에서 Monte Carlo 방법의 한 기법으로 Latin hypercube sampling (LHS) 기법[2]을 사용하여 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 원자력시설의 정상 운영중 오염 음식물에 의한 피폭경로 모델의 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 지수는 표본 추출된 각 입력변수 값의 크기 순위 (ranking)에 근거한 partial ranking correlation coefficient (PRCC)로 나타냈다.

2. 재료 및 방법

2.1 섭식경로모델

미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 주민피폭선량 평가모델은 원자력시설의 정상운영에 따른 시설의 건전성과 주민의 방사능 피해를 평가하기 위해 가장 널리 사용되며, 농작물내 방사성물질의 농도는 다음 식으로 평가된다[1].

$$C = d \left[\frac{r\ [1 - \exp(-(\lambda_r + \lambda_w)\ t_e)]}{Y\ (\lambda_r + \lambda_w)} + \frac{B_v\ [1 - \exp(-\lambda_r\ t_b)]}{p\ \lambda_r} \right] \quad (1)$$

여기서,

C : 농작물내 방사성물질의 농도 [Bq/ dry-kg]

d : 평균 방사성물질의 침적율 [Bq/ (m^2 · d)]

r : 농작물의 가식부에 의해 차단되는 핵종의 분율

Y : 지상위 가식부의 수율 [dry-kg/ m^2]

λ_r : 방사능 붕괴상수 [1/ d]

λ_w : 농작물의 표면에서 환경적 요소에 의한 핵종의 제거율 [1/ d] (= $\ln 2 / T_w$)

T_w : 환경요소에 의한 핵종의 제거반감기 [d]

t_e : 오염된 공기로 농작물이 노출된 기간 [d]

B_v : 작물/ 토양 농도비 [(Bq/ kg-dry plant)/ (Bq/ kg-dry soil)]

p : 토양 뿌리층의 유효 표면밀도 [kg/ m^2]

t_b : 오염된 공기로 토양이 노출된 시간 [d]

식 (1)에서 첫 번째 항은 잎표면에 침적된 방사성물질에 의한 음식물의 오염을, 두 번째 항은 오염된 토양으로부터 농작물의 뿌리흡수에 의한 음식물의 오염을 나타낸다. 오염된 음식물을 소비함으로써 인체에로 받게되는 피폭선량은 다음 식으로 계산된다[1].

식물성 식품 : $D = C \times D_f \times V \times e^{-\lambda_r t_h}$ (2)

동물성 식품 : $D = C \times Q \times F_m \times D_f \times V \times e^{-\lambda_r t_h}$ (3)

여기서,

D : 피폭선량 [Sv/ yr]

D_f : 선량환산인자 [Sv/ Bq]

V : 음식물 소비율 [kg-dry/ yr]

Q : 젖소의 사료섭취율 [kg-dry/ d]

F_m : 사료에서 우유로의 핵종의 전이계수 [d/ L]

t_h : 생산에서 소비까지의 시간 [d]

2.2 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[3]. 각 변수에 대해 표본 추출된 값은 변

수의 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 X_1과 X_2 (해당 출력결과 Y)의 순위 r_x 간의 단순 상관관계를 나타내는 Spearman's rho (ρ)는 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

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

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[2].

$$R = \begin{array}{c} \begin{matrix} X_1 & X_2 & & Y \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1k} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2k} \\ \vdots & & & \\ \rho_{k1} & \rho_{k2} & \cdots & \rho_{kk} \end{bmatrix} \end{array} \tag{5}$$

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2k} \\ \vdots & & & \\ b_{k1} & b_{k2} & \cdots & b_{kk} \end{bmatrix} \tag{6}$$

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

PRCC는 -1과 1 사이의 값을 가지며, 절대값이 1에 가까울수록 입력변수 값의 변화에 대

한 결과의 영향이 높다는 것을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

미국 원자력 규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 오염 음식물 섭취에 의한 피폭평가 모델의 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 3 종류 (쌀, 엽채류, 우유)의 우리나라 대표적 음식물, 장·단감기의 대표적 핵종인 ^{137}Cs ($T_{1/2}$=30년)과 ^{131}I ($T_{1/2}$=8일)이 고려되었다. 표 1은 민감도 분석을 위해 선택된 입력변수와 해당 변수값의 분포형태 및 범위 등을 나타냈다[4,5,6]. 변수값의 분포형태와 범위는 실험을 통해 보고되고 있는 여러 문헌으로부터 선택되었으며, 그렇치 못한 변수에 대해서는 저자의 주관적 판단에 근거하였다. 여러 문헌에서 제시된 실험자료는 다양한 조건에 따른 결과로 입력변수간 상관관계는 무시하였다. 선택된 각 입력변수 값은 LHS 기법으로 500개씩 표본추출되었으며, 민감도 지수는 PRCC로 나타냈다.

그림 2는 ^{137}Cs과 ^{131}I 침적으로 오염된 쌀의 소비로 받게되는 피폭선량에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. 농작물의 수율에 대한 차단분율의 비와 음식물의 소비율은 두 핵종 모두 중요한 입력변수 ($|PRCC| > 0.6$)로 나타났다. 그외 ^{137}Cs 침적의 경우에는 기후에 의한 핵종의 제거 반감기가, 그리고 ^{131}I 침적의 경우에는 짧은 반감기로 생산에서 소비까지의 지연시간이 중요한 입력변수로 나타났다.

그림 3은 ^{137}Cs과 ^{131}I 침적으로 오염된 엽채류의 소비로 받게되는 피폭선량에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. 전반적으로 쌀의 경우와 비슷한 경향을 보였다. 그러나 ^{137}Cs 침적의 경우 토양이 오염된 공기로 노출된 시간, 토양 뿌리층의 유효 표면밀도와 같은 뿌리흡수에 의한 오염 관련 변수의 영향이 쌀의 경우에 비해 상대적으로 높았으며, 특히 뿌리흡수에 의한 농축인자는 결과에 중요한 영향을 미치는 입력변수로 나타났다. 결과적으로 엽채류는 곡류에 비해 뿌리흡수에 의한 오염 영향이 강하다는 사실을 알 수 있다.

그림 3은 ^{137}Cs과 ^{131}I 침적으로 오염된 우유의 소비로 받게되는 피폭선량에 대한 입력변수의 PRCC를 보여준다. 농작물의 수율에 대한 차단분율의 비, 사료 (목초)에서 우유로의 핵종전이 계수, 젖소의 사료섭취율, 음식물 소비율은 두 핵종 모두 중요한 입력변수로 나타났다. 그외 ^{137}Cs 침적의 경우에는 기후에 의한 핵종의 제거 반감기가 중요한 입력변수로 나타났다. ^{131}I 침적의 경우 우유의 생산에서 소비까지의 상대적 짧은 시간으로 다른 음식물에 비해 민감도지수는 낮았다.

4. 결 론

미국 원자력 규제위원회의 규제지침 1.109에 제시된 오염 음식물 섭취에 의한 피폭평가

모델의 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 농작물의 수율에 대한 차단계수의 비와 음식물의 소비율은 두 핵종 모두 중요한 입력변수였다. 또한 우유의 경우 사료에서 우유로의 전달계수와 젖소의 사료 섭취율도 한 중요한 입력변수였다. 그외 ^{137}Cs 침적의 경우에는 기후에 의한 핵종의 반감기가, ^{131}I 침적의 경우에는 생산에서 소비까지의 지연시간이 상대적으로 중요한 변수였다.

본 연구의 결과는 예측결과에 대한 불확실성을 줄임으로써 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 뿐 아니라 입력변수 자료수집에 소요되는 비용 등을 위해 중요한 자료로 제공될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. U. S. Nuclear Regulatory Commission, "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", U. S. NRC Regulatory Guide 1.109 (1977).

2. R. L. Iman and W. J. Conover, "Sensitivity Analysis Techniques : Self-Teaching Curriculum", U. S. Nuclear Regulation Commission, NUREG/CR-2350, SAND81-1978 (1982).

3. 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).

4. 이정호 외, "섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭 선량평가 코드개발", 한국원자력연구소, KAERI/RR-998/90 (1990).

5. 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).

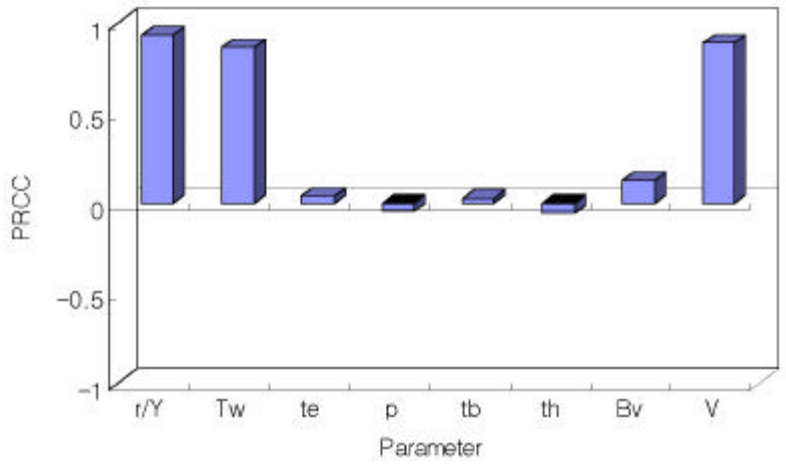
6. J. E. Till and H. R. Meyer, Radiological Assessment : A Textbook on Environmental Dose Analysis, U. S. Nuclear Regulation Commission, NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).

Table 1. Characteristics of input parameters considering in this study.

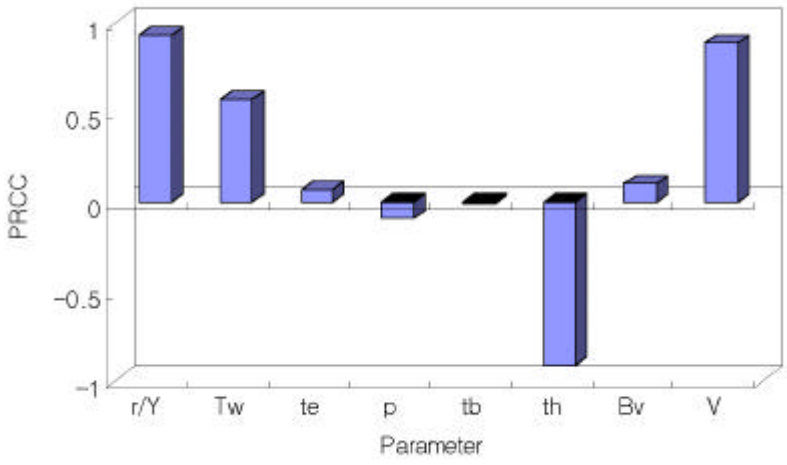
PM	Units	DT	Rice		Leafy vegetables		Milk (pasture)	
			^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I	^{137}Cs	^{131}I
r/Y	m^2/dry-kg	LN	1.0 - 4.0	1.0 - 4.0	1.0 - 4.0	1.0 - 4.0	1.0 - 4.0	1.0 - 4.0
T_w	d	LN	10.5 - 27.0	6.5 - 13.0	10.5 - 27.0	6.5 - 13.0	10.5 - 27.0	6.5 - 13.0
t_e	d	N	135 - 170	135 - 170	70 - 100	70 - 100	135 - 170	135 - 170
p	kg/m^2	N	230 - 290	230 - 290	260 - 320	260 - 320	150 - 200	150 - 200
t_b	d	N	5500-18000	5500-18000	5500-18000	5500-18000	5500-18000	5500-18000
t_h	d	N	7 - 21	7 - 21	0 - 3	0 - 3	0 - 4	0 - 4
B_v	unitless	LN	1.0E-3-1.0E-1	2.0E-4-2.0E-3	1.9E-2-1.7	2.0E-4-2.0E-3	1.1E-2-1.1	3.4E-4-3.4E-2
F_m	d/L	LN	-	-	-	-	2.5E-3-1.6E-2	2.7E-3-3.5E-2
Q	dry-kg/d	N	-	-	-	-	6 - 25	6 - 25
V	dry-kg/yr	N	60 - 200	60 - 200	2 - 5	2 - 5	10 - 40	10 - 40

PM : parameter, DT : distribution type

LN : lognormal distribution N : normal distribution

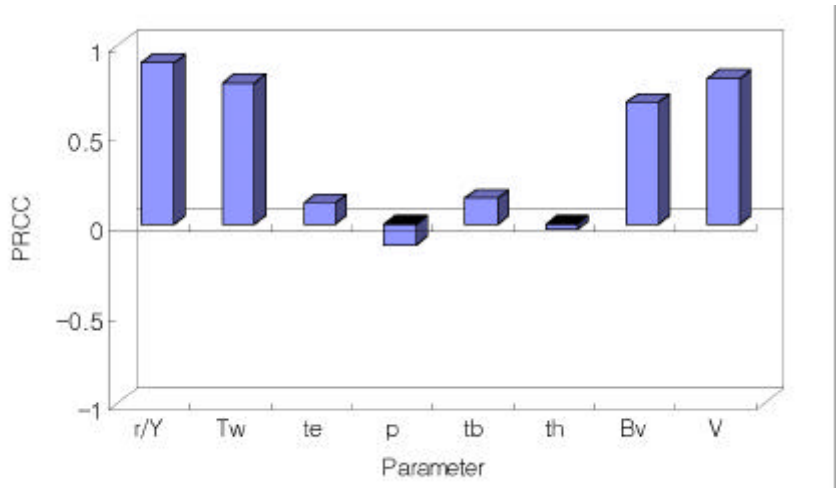


(a) ^{137}Cs deposition

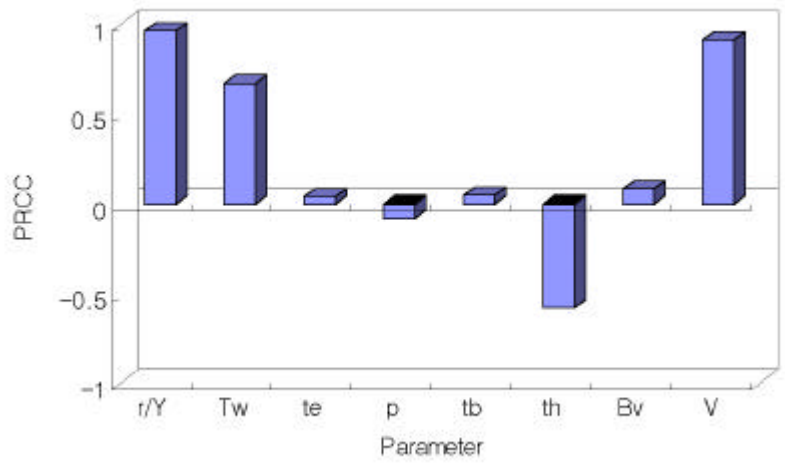


(b) ^{131}I deposition

Fig. 1. PRCC of input parameters for rice pathways

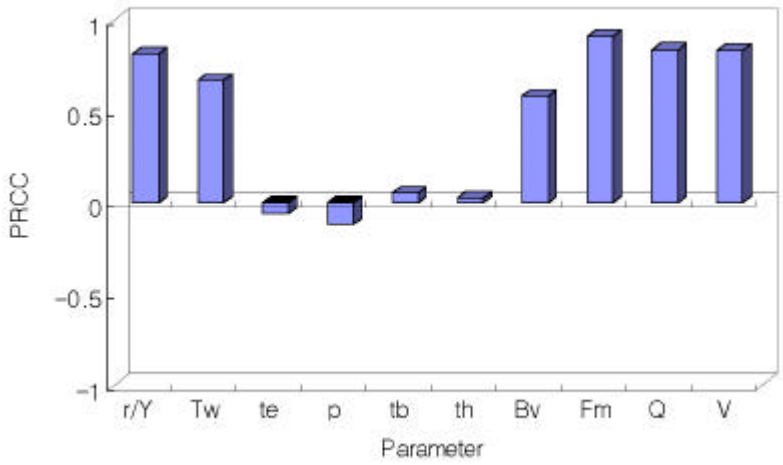


(a) ^{137}Cs deposition

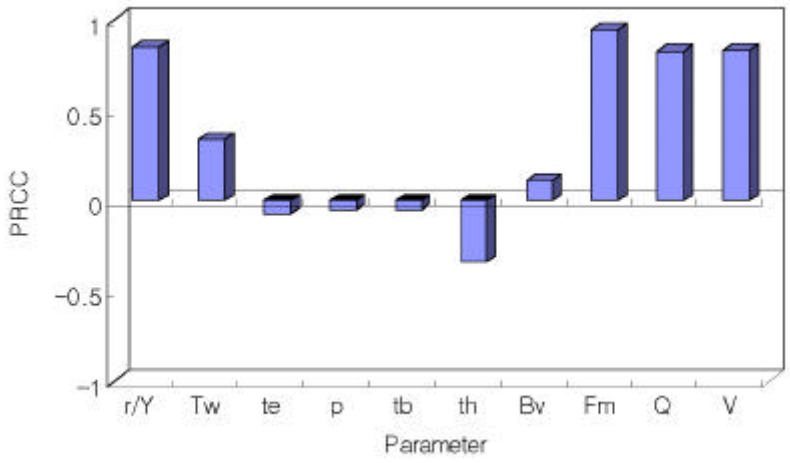


(b) ^{131}I deposition

Fig. 2. PRCC of input parameters for leafy vegetable pathways



(a) ^{137}Cs deposition



(b) ^{131}I deposition

Fig. 3. PRCC of input parameters for milk pathways