

## Predictive Contamination of Animal Products Due to the Inhalation of Air and the Ingestion of Soil of Cattle in an Accidental Release of Radioactive Materials - Focusing on Contaminative Influence for Milk

Won Tae Hwang · Eun Han Kim · Kyung Suk Suh ·  
Hyo Joon Jeong · Moon Hee Han and Chang Woo Lee  
Korea Atomic Energy Research Institute

원자력 사고시 가축의 공기 흡입과 토양 섭취에 의한  
축산물의 오염 - 우유에 대한 오염 영향을 중심으로

황원태 · 김은한 · 서경석 · 정효준 · 한문희 · 이창우  
한국원자력연구소

(2003년 7월 9일 접수, 2003년 11월 3일 채택)

**Abstract** - In an accidental release of radioactive materials to the environment, the contaminative influence of animal products due to the inhalation of air and the ingestion of soil of livestock, both of which are dealt with as minor contaminative pathways in most radioecological models but may not be neglected, was investigated with the improvement of the Korean dynamic food chain model DYNACON. Although mathematical models for both contaminative pathways have been established for considering all animal products and incorporated into the model, investigation was limited to milk. As a result, it was found that both pathways are influential in the contamination of milk in the case of an accidental release during the non-grazing period of dairy cows. In the case of an accidental release during the non-grazing period, the inhalation of air was more influential than the ingestion of soil in the early days following an accidental release. While, it was the opposite with the lapse of time. If precipitation is encountered during an accidental release, contaminative influence due to the ingestion of soil was greater compared with the cases of no precipitation, in general, because of a greater deposition of radionuclides onto the ground. Precipitation during an accidental release was a less influential factor in  $^{131}\text{I}$  (elemental iodine) contamination compared with the  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  contaminations. In the case of an accidental release during the grazing period of dairy cows, the contaminative influence due to the inhalation of air was negligible.

**Key words** : Korean dynamic food chain model, milk, inhalation of air, ingestion of soil, contaminative influence

**요약** - 동적 섭식경로모델 DYNACON을 개선하여 원자력시설의 사고시 환경으로 누출된 방사성물질에 의한 가축의 공기 흡입과 토양 섭취에 따른 축산물의 오염 영향을 고찰하였다. 이들 두 오염경로에 대한 수학적 모델은 고려되는 모든 축산물에 대해 수립되었지만 결과에 대한 상세 고찰은 우유에 국한하였다. 젖소의 공기 흡입과 토양 섭취는 방사성물질의 환경 누출이 목초

가 성장하지 않는 비방목 기간에 일어나는 경우에 우유의 중요한 오염경로가 될 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 비방목 기간동안 방사성물질이 환경으로 누출되는 경우 초기에는 공기 흡입이 토양 섭취에 의한 영향보다 높으나, 시간이 경과할수록 토양 섭취가 우유의 오염에 있어서 지배적 영향을 미쳤다. 이러한 현상은 전반적으로 지상으로 상대적으로 많은 침적을 일어나게 하는 누출기간 중 강우가 있는 경우에 보다 뚜렷하였다.  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우와 달리  $^{131}\text{I}$ 은 누출기간 중 강우에 거의 영향을 받지 않았다. 방목기간에 방사성물질이 환경으로 누출되는 경우 누출기간 중 강우의 유무에 관계없이 공기 흡입에 의한 우유의 오염 영향은 무시 가능한 수준이었다.

중심어 : 동적 섭식경로모델, 우유, 공기 흡입, 토양 섭취, 오염 영향

## 서 론

원자력시설의 정상 운영 뿐 아니라 사고를 통해 환경으로 누출된 방사성물질에 의한 농작물의 오염은 인체에 중요한 영향을 끼치는 피폭경로이다. 사고와 같이 단기간에 다량의 방사성물질이 농경지에 침적되는 경우 농작물내 농도는 누출이 일어난 시점에서 농작물의 성장상태 등과 같은 환경적 특성에 따라 다양한 변화를 나타낸다. 결과적으로 사고해석에서 고려되는 다양한 인체로의 피폭경로 중에서 오염된 농작물 섭취에 의한 피폭영향은 방사성물질의 환경으로 누출시점에 따라 뚜렷이 다른 계절적 특성을 나타낸다[1]. 이와 같이 방사성물질의 누출이 일어난 시점에 따라 농작물의 농도변화를 해석할 수 있는 모델을 동적 섭식경로모델 (dynamic food chain model ; 이하 동적모델)이라 하며, 체르노빌 사고 이후 이에 대한 관심이 한층 고조되었다. 국내에서는 한국원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석시스템 (FADAS : Following Accident Dose Assessment System[2])에서 고려되는 여러 피폭 경로중 농작물 섭취에 의한 내부피폭을 평가하기 위한 모델로서 동적모델 DYNACON[3]을 개발한 바 있다. 개발 초기의 모델에서는 지상으로 침적된 방사성 핵종량으로부터 농작물내 농도를 예측하였으나, 그 후 방사성물질의 환경누출 기간동안 발생할지 모르는 강우에 의한 핵종의 거동현상의 고려와 함께 환경에서 쉽게 측정할 수 있는 공기 중 농도 또는 지상으로 침적량으로부터 농작물 오염 예측이 가능하도록 개선하였다[4].

축산물은 가축의 사료섭취 뿐 아니라 공기 흡입과 토양 섭취 등으로 오염될 수 있다. 많은 경우 공기 흡입과 토양 섭취는 사료 섭취에 비해 상대적으로 사소한 오염경로로 분류되어 무시되거나 또는 특정기간에만 부분적으로 고려되고 있으며, DYNACON에서도 우유를 생산하는 젖소

와 육류를 생산하는 육우의 방목기간에만 토양 섭취로 인한 오염 영향만을 고려하고 있다. 그러나 실제로는 가축은 방목기간 뿐 아니라 비방목기간에도 질병 예방과 육질 개선 등을 위해 야외에서 활동시키기 때문에 비방목기간에 방사성물질의 환경누출이 있는 경우 공기 흡입과 토양 섭취는 축산물의 주요 오염경로가 될 수 있다. 결과적으로 이러한 오염 경로의 고려는 방사성물질의 환경 누출에 따른 축산물에 대한 비상대응책 결정에 중요한 요소로써 작용할 수 있을지 모른다.

본 연구에서 DYNACON을 개선하여 원자력시설의 사고시 환경으로 누출된 방사성물질로부터 가축의 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 축산물의 오염 영향을 고찰하였다. 이를 위해 가축의 활동 및 사육형태 등에 대한 고찰로부터 기존 DYNACON에 대한 수학적 모델을 개선하였다. 개선된 모델을 사용하여 방사성물질의 환경 누출 시점, 누출 기간동안 강우의 유무에 따라 젖소의 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 우유내 핵종별 오염영향을 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 방사성물질의 환경내 거동

원자력시설로부터 환경으로 누출된 방사성물질은 주변의 지형 및 기상조건 등에 따라 이동 및 확산된다. 공기 중 방사성물질은 중력 또는 강우 등에 의해 지상으로 침적되며, 일부는 농작물에 차단 (interception)되고, 나머지는 토양 표면에 침적한다. 농작물의 잎 표면에 의해 차단된 방사성물질은 기상조건과 농작물의 성장에 따라 희석되고, 일부는 농작물의 내부조직을 통해 가식부위로 이동한다. 토양 표면에 침적된 방사성물질은 토양의 보다 깊은 층으로 이동하면서, 일부는 토양에

흡착 (absorption)되고 흡착된 방사성물질은 다시 탈착 (desorption)되기도 한다. 농작물의 뿌리가 주로 분포하는 토양층내 방사성물질은 농작물의 뿌리흡수를 통해 가식부위로 이동하고 일부는 뿌리가 더 이상 존재하지 않는 보다 더 깊은 토양층으로 이동한다. 토양 표면에 침적된 방사성물질은 기상 및 환경 등의 영향에 따라 재부유 (resuspension)되며, 재부유된 방사성물질은 농작물의 잎 표면에 차단되고 일부는 다시 토양 표면으로 침적된다. 축산물을 생산하는 가축은 사료로 이용되는 농작물의 오염과정 이외에 토양 섭취에 의해 오염될 수 있으며, 섭취된 오염 사료와 토양은 가축의 체외로 배설되고 일부는 최종적으로 사람이 소비하게 되는 축산물에 잔류하게 된다. 이러한 방사성물질의 환경내 이동과정을 DYNACON에서 고려하고 있으며, 이에 대한 모형도를 그림 1[3]에 나타냈다.

방사성물질의 침적 후 시간에 따른 복잡한 물리적, 화학적 오염 과정은 수학적 기법을 통해 예측될 수 있는데 구간 접근법 (compartmental approach method)은 이러한 목적을 위해 널리 활용되고 있다[5]. 이 기법은 그림 1에 나타낸 바와 같이 방사성물질이 유사한 거동을 나타내는 환경 구성요소를 세분화한 여러 구간 (compartments)로 나누고 구간간 방사성물질의 이동은 전달율 상수 (transfer rate constants)를 사용하여 모사한다. 구간에서의 방사성물질의 농도변화는 해당 구간으로 방사성물질의 유입율과 유출율의 차로써 나타낼 수 있다[3].

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

여기서,

$X_i$ : 구간  $i$  에서 방사성물질의 농도 ( $Bq \text{ kg}^{-1}$  또는  $Bq \text{ m}^{-2}$ )

$\lambda_{ij}$ : 구간  $i$  에서 구간  $j$  로 방사성물질의 전달율 상수 ( $d^{-1}$ )

$n$ : 구간  $i$  의 오염에 영향을 미치는 구간수

각 구간에 대해 식 (1)과 같은 형태의 미분 방정식과 초기 값을 설정한 후, 연립 미분방정식의 해로부터 각 구간에 대한 방사성물질의 농도변화를 예측한다. 이를 위해서는 농경지의 특성과 농작물의 성장 특성 등과 같은 농업, 환경적 자료뿐 아니라 농작물, 축산물, 토양에 따른 많은 핵

종 이동관련 자료가 요구된다. DYNACON은 수집 가능한 한 많은 국내 농업, 환경적 특성 자료의 고찰을 통해 개발하였으며, 국내 자료 정보가 부족한 경우에는 외국의 여러 문헌 자료조사를 통해 적절한 자료를 선택하여 사용하고 있다. DYNACON에 대한 구간에서의 수학적 모델과 고려되는 핵종 이동 관련변수 및 적용값 등은 참고 문헌 [3]과 [4]에 잘 기술되어 있다.

### 축산물의 오염예측

국내 농업, 환경적 특성을 반영하여 개발한 DYNACON은 5가지의 축산물 (우유, 쇠고기, 돼지고기, 닭고기, 계란)을 고려하고 있다. 이들 축산물은 사료 섭취 뿐 아니라 토양 섭취와 공기 흡입 등에 의해 오염될 수 있다. 일반적으로 많은 모델에서 사료의 섭취는 주요 오염경로로 고려되는 반면, 나머지는 상대적으로 사소한 오염경로로 분류되어 이들 경로에 의한 영향은 무시하거나 부분적으로 고려하고 있다. DYNACON에서도 토양 섭취에 의한 오염경로는 우유를 생산하는 젖소나 쇠고기를 생산하는 육우와 같은 가축 (이하 방목가축)의 방목기간에만 고려하며, 공기 흡입에 의한 영향은 고려하고 있지 않다. 그러나 오염되지 않은 저장 사료를 섭취하는 비방목기간에 방사성물질이 환경으로 누출되는 경우 토양 섭취와 공기 흡입은 이들 축산물의 주요 오염 경로가 될 수 있다. 그 이유로 방목기간보다는 가축의 야외 활동시간이 적다하더라도 비방목기간에도 여전히 질병 예방과 육질의 향상 등을 위해 야외에서 활동시키기 때문이다. DYNACON에서 돼지나 닭과 같이 방목하지 않는 가축 (비방목 가축)은 단지 수확된 곡물의 섭취로 오염된다고 가정하고 있으며, 방목가축과 마찬가지로 오염되지 않은 저장 사료를 섭취하는 기간동안에 방사성물질이 환경으로 누출되는 경우 토양 섭취와 공기 흡입은 이들 축산물의 주요 오염 경로가 될 수 있다. 따라서 일반적으로 사소한 오염경로로 분류되는 토양 섭취와 공기 흡입에 의한 축산물의 오염영향을 고찰할 필요가 있으며, 이들 오염경로를 포함한 축산물 오염은 다음 식으로 평가될 수 있다.

$$C(t) = C(t-\Delta t) e^{-(\lambda_a + \lambda_s) \Delta t} + TF \# \left[ (X_A(t) + X_B(t)) F_v + X_C(t) \frac{F_s}{\rho_s L_s} \right] + BR TF [A(t=0) + X_C(t) RF] \quad (2)$$

여기서,

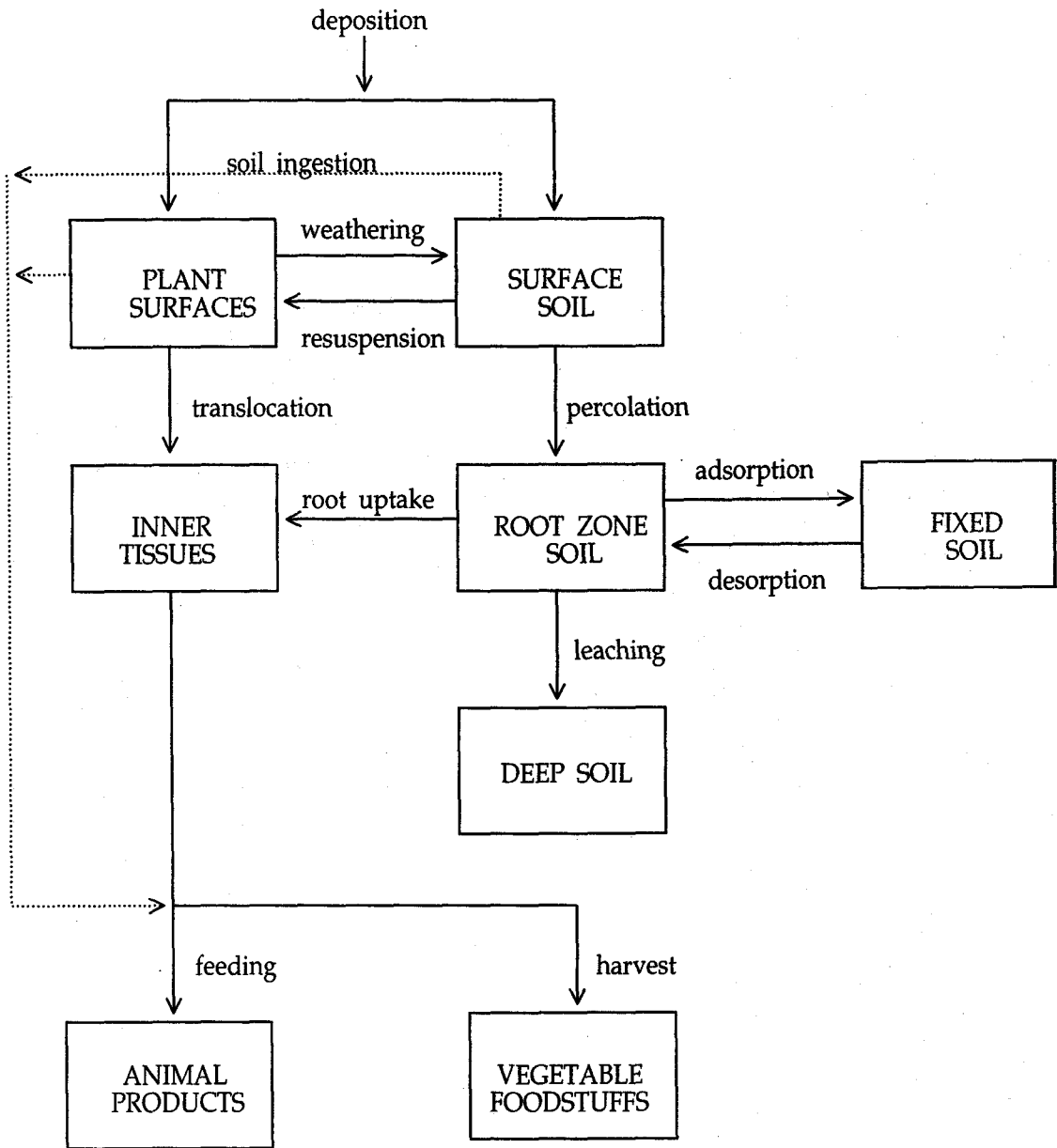


Fig. 1. Transfer processes of radionuclides between different compartments considered in DYNACON.

$C(t)$  : 시간  $t$  에서 축산물내 방사성물질의 농도 (Bq dry-kg<sup>-1</sup> 또는 Bq L<sup>-1</sup>)  
 $\Delta t$  : 계산시간 간격 (=1day)  
 $\lambda_b$  : 축산물에 대한 생물학적 반감기 (d<sup>-1</sup>)  
 $\lambda_d$  : 핵종의 물리적 반감기 (d<sup>-1</sup>)  
 $TF$  : 축산물로의 핵종 전이계수 (d kg<sup>-1</sup>)  
 $A(t=0)$  : 방사성물질의 환경누출 기간동안 평균 공기중 농도 (Bq m<sup>3</sup>)

$X_A(t)$  : 사료의 외부조직 (또는 표면)에서의 방사성물질의 농도 (Bq dry-kg<sup>-1</sup>)  
 $X_B(t)$  : 사료의 내부조직에서 방사성물질의 농도 (Bq dry-kg<sup>-1</sup>)  
 $X_C(t)$  : 토양 표면에서 방사성물질의 농도 (Bq m<sup>-2</sup>)  
 $RF$  : 재부유 인자 (m<sup>-1</sup>)  
 $BR$  : 가축의 공기 흡입율 (m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>)

- $F_v$ : 가축의 사료섭취율 (dry-kg d<sup>-1</sup>)
- $F_s$ : 가축의 토양 섭취율 (dry-kg d<sup>-1</sup>)
- $\rho_s$ : 토양의 밀도 (dry-kg m<sup>-3</sup>)
- $L_s$ : 지표면 토양의 깊이 (m)

식 (2)에서 오른쪽의 첫 번째 항은 시간  $t$  이전까지 사료 섭취, 토양 섭취, 공기의 흡입에 의한 축산물의 오염, 두 번째 항은 시간  $t$ 에서 사료 섭취에 의한 축산물의 오염, 세 번째 항은 시간  $t$ 에서 토양 섭취에 의한 축산물의 오염, 네 번째 항은 방사성물질의 환경 누출 기간동안 공기의 흡입에 의한 축산물의 오염, 다섯 번째 항은 시간  $t$ 에서 토양에 침적된 재부유 방사성물질의 흡입에 의한 축산물의 오염을 나타낸다. 본질적으로 무시 가능한 오염경로와 가축의 사육 특성에 따라 비방목 가축으로 닭은 공기 흡입, 돼지는 토양 섭취에 의한 오염영향은 무시하였으며, 이러한 축산물의 오염과정은 전 기간에 걸쳐 연속적으로 일어난다고 가정하였다. 또한 가축의 토양 섭취율은 야외 활동시간 등의 계절별 특성에 따라 다를 수 있으나 현재까지 자료의 부족으로 전 기간에 걸쳐 일정하다고 가정하였다. 본 연구에서 적용된 가축에 대한 공기 흡입율 및 토양 섭취율을 표 1[3,6]에 나타냈으며, 가축의 다른 특성 변수는 참고문헌 [3]에 잘 기술되어 있다. DYNACON에서는 토양의 경작특성에 따라 경작지와 비경작지로 구분하고 있다. 이 모델에서 목초를 제외한 모든 농작물은 경작지 토양특성에 따라 재배되어 수확되며, 쪼트소와 육우의 사료로 이용되는 목초는 비경작지에서 성장하고 방목기간에는 비경작지에서 활동한다고 가정하고 있다. 본 연구에서는 축산물 오염평가를 위한 방사성물

질의 토양 이동 특성은 모두 비경작지와 동일하다고 가정하였다. 즉 가축은 비경작지와 동일한 토양 특성을 갖는 야외에서 활동한다고 가정하였다. 사료 외부조직에서의 방사성물질의 농도  $X_A$ , 내부조직에서의 농도  $X_B$  그리고 토양 표면 농도  $X_C$ 는 식 (1)에서 기술한 바와 같이 구간에 대한 미분방정식과 초기값을 사용한 연립 미분방정식의 수치해로부터 방사성물질의 환경누출 후 시간에 따라 예측된다.

### 결과 및 고찰

동적모델 DYNACON을 개선하여 원자력시설의 사고시 환경으로 누출된 방사성물질에 의한 가축의 공기 흡입과 토양 섭취에 따른 축산물 오염의 영향을 고찰하였다. 이러한 오염영향은 가상 사고 시나리오, 축산물, 핵종 등에 따라 다양하게 나타날 것으로 판단되며, 본 연구에서는 원자력시설의 사고시 상대적으로 중요한 식품인 우유에 대한 오염 영향을 고찰하였다. 환경으로 방사성물질이 누출된 시점은 쪼트소의 사료로 이용되는 목초의 대표적 성장기 (5월 1일 ~ 10월 31일)인 8월 15일 (일년 중 227일째 날)과 비성장기인 3월 15일 (일년 중 74일째 날)을 선택하였다. 방사성물질의 환경 누출은 하루동안 지속되며, 이 때 공기중 평균 농도는 강우의 유무에 관계없이 1 Bq m<sup>-3</sup>로 가정하였다. 방사성물질의 환경누출 기간동안 강우가 있는 경우, 강우는 0.1 mm hr<sup>-1</sup>의 강우율로 누출기간 내내 지속된다고 가정하였다.

그림 2는 방사성물질의 환경누출이 목초의 비성장기에 일어나며, 누출기간 동안 강우가 없는 경우 다음 4가지 경우에 대한 우유내 방사성물질의 농도변화를 보여준다.

Table 1. Breathing rate of air and soil ingestion rate of cattle[3,6]

Cattle	Breathing rate of air (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Soil ingestion rate (kg d <sup>-1</sup> )
Diary cows (Milk)	170	0.5
Beef cows	130	0.5
Pig	30	NG*
Chicken	NG*	0.01

\* NG : substantially negligible pathway

- Case 1 : 기존모델 (방목기간에만 토양섭취에 의한 오염을 고려) 예측결과
- Case 2 : 기존모델에 가축의 공기흡입에 의한 오염경로를 고려한 예측결과
- Case 3 : 기존모델에 가축의 토양섭취에 의한 오염경로를 고려한 예측결과
- Case 4 : 기존모델에 가축의 공기흡입과 토양섭취에 의한 오염경로를 고려한 예측결과

장반감기 핵종 <sup>137</sup>Cs (반감기 약 30년)과 <sup>90</sup>Sr (반감기 약 29년)의 우유내 농도는 전반적으로 유

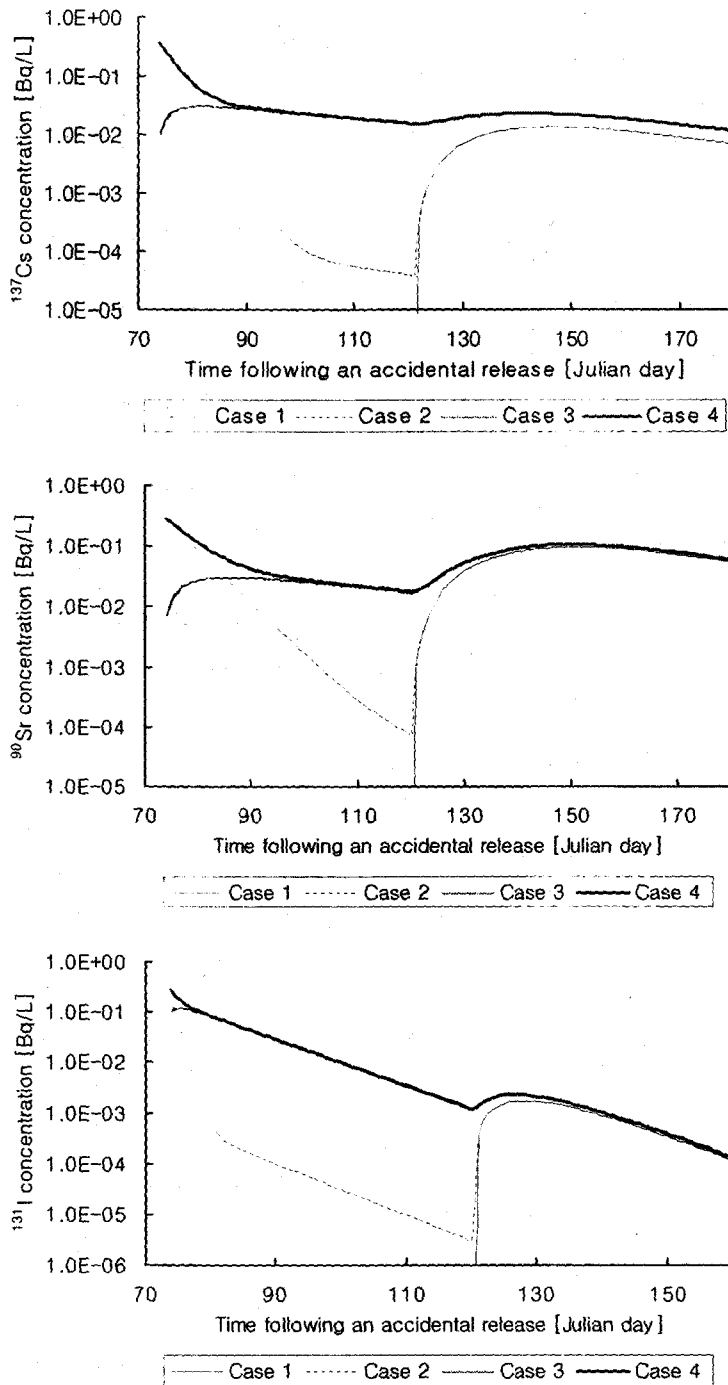


Fig. 2. Radionuclide concentrations in milk for four different cases assuming that an accidental release has taken place in a specified non-growing season (15th March) with no precipitation ; Case 1 : predictive results using the previous model, Case 2 : predictive results by incorporating the contaminative pathway due to the inhalation of air into the previous model, Case 3 : predictive results by incorporating the contaminative pathway due to the ingestion of soil into the previous model, Case 4 : predictive results by incorporating the contaminative pathway due to the inhalation of air and the ingestion of soil into the previous model.

사한 변화를 나타냈다. 다만 방사성물질의 환경누출 기간동안 공기 흡입으로 인한 우유내  $^{137}\text{Cs}$  농도는  $^{90}\text{Sr}$  농도에 비해 누출 후 초기에 약간 높으나 시간에 따른 농도의 감소율은  $^{137}\text{Cs}$ 이  $^{90}\text{Sr}$  보다 높게 나타났다. 이는 핵종에 따른 젖소의 다른 체내 신진대사에 기인한 것으로, 우유로의 전이계수 ( $^{137}\text{Cs}$  :  $3.0 \times 10^{-3} \text{ d L}^{-1}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  :  $2.0 \times 10^{-3} \text{ d L}^{-1}$ [3])는  $^{137}\text{Cs}$ 이 상대적으로 높고 생물학적 반감기 ( $^{137}\text{Cs}$  : 2 d,  $^{90}\text{Sr}$  : 3.5 d[3])는 상대적으로 짧기 때문이다. 방목이 시작되는 시점 (5월 1일 ; 일년 중 121번째 날)부터 방목으로 인한 오염 목초 및 토양의 섭취로 우유내 농도는 일정기간 증가하며, 농도의 증가는  $^{90}\text{Sr}$ 이 보다 뚜렷하였다. 이는 방사성물질의 누출시점이 목초의 비성장기로 가정된 사고 시나리오에 기인한 것으로 이 경우 목초는 주로 뿌리 흡수를 통해 오염되는데,  $^{90}\text{Sr}$ 의 뿌리 흡수율이  $^{137}\text{Cs}$ 에 비해 약 10배 정도 높기 때문이다[3]. 방사성물질이 환경으로 누출된 후 초기에는 공기 흡입에 의한 영향이 토양 섭취에 의한 영향보다 높지만 누출 후 시간에 따라 토양 섭취에 의한 영향이 보다 높게 나타났다. 결과적으로 방사성물질의 누출기간 동안 오염된 공기의 흡입은 축산물 오염에 중요한 영향을 미치나 토양에 침적된 후 재부유된 방사성물질의 흡입에 의한 영향은 상대적으로 사소한 오염경로라는 사실을 알 수 있다. 토양 섭취에 의한 오염 경로는 방사성물질의 환경 누출 후 장기간에 걸쳐 중요한 영향을 나타내며,  $^{137}\text{Cs}$ 이  $^{90}\text{Sr}$ 에 비해 보다 중요한 오염경로로 나타났다. 단반감기 핵종  $^{131}\text{I}$  (반감기 약 8일)의 경우에는 토양 섭취에 의한 영향이 다른 핵종에 비해 보다 뚜렷하다. 그림에서 나타낸 바와 같이  $^{131}\text{I}$ 의 환경 누출 후 매우 짧은 기간동안에만 공기 흡입에 의한 영향이 높고 나머지 대부분 기간에 걸쳐 공기 흡입은 토양 섭취에 의한 영향에 비해 무시 가능한 수준이다. 그 이유로 본 연구에서 고려된 원소형 요오드 (elemental iodine)는 지상으로 침적속도가  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$  같은 입자상 핵종에 비해 약 10배 정도 높을 뿐 아니라[4] 생물학적 반감기도 약 0.7일[3]로 매우 짧기 때문이다.

그림 3은 방사성물질의 환경 누출이 목초의 비성장기에 일어나며, 누출 기간동안 강우가 있는 경우 그림 2에서 언급한 4가지 경우에 대한 우유내 방사성물질의 농도변화를 보여준다. 강우가 없는 조건인 그림 2의 결과와 비교하여  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우에는 강우에 따른 지상으로 많은 침적으로 토양 섭취에 의한 영향이 보다 뚜렷하였다.

$^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우 공기 흡입에 의한 영향이 토양 섭취에 의한 영향 보다 우세한 시간은 강우가 없는 경우보다 매우 짧으며, 침적 후 시간에 따라 공기 흡입에 의한 영향은 상대적으로 무시 가능한 수준이었다. 강우가 없는 경우와 마찬가지로 토양 섭취에 의한 오염 경로는 방사성물질의 환경 누출 후 장기간에 걸쳐 중요한 영향을 나타내며,  $^{137}\text{Cs}$ 이  $^{90}\text{Sr}$ 에 비해 보다 중요한 오염경로로 나타났다. 강우가 없는 경우에 비해 우유내  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도는 높게 나타난 반면,  $^{131}\text{I}$ 의 농도는 거의 유사하였다. 이는  $^{131}\text{I}$ 의 건침적 속도에 대한 습침적 속도의 비가  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 에 비해 훨씬 낮기 때문이다. 예로  $0.1 \text{ mm hr}^{-1}$ 의 강우에 대해  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 의 습침적 속도는 건침적 속도에 비해 약 20배 이상 높은 반면,  $^{131}\text{I}$ 은 거의 비슷하다[4]. 따라서  $^{131}\text{I}$ 은 토양 오염 뿐 아니라 목초의 오염에 있어서 강우의 유무에 민감하지 않다는 것을 나타내며, 이러한 연구결과는 참고문헌 [4]에서도 제시한 바 있다.

그림 4는 방사성물질의 환경누출이 목초의 성장기에 일어나며, 누출 기간동안 강우가 없는 경우 다음 2가지 경우에 대한 우유내 방사성물질의 농도변화를 보여준다.

- Case 1 : 기존모델 (방목기간에만 토양섭취에 의한 오염을 고려) 예측결과
- Case 2 : 기존모델에 가축의 공기흡입에 의한 오염경로를 고려한 예측결과

그림에서 나타낸 바와 같이 목초의 비성장기에 방사성물질이 환경으로 누출되는 경우와 달리 모든 핵종에 대해 Case 1과 Case 2의 예측결과는 거의 유사하였다. 이러한 결과는 목초의 성장기에 방사성물질이 환경으로 누출되는 경우 전 기간에 걸쳐 공기 흡입은 우유의 오염에 무시 가능한 오염경로라는 사실을 말해 준다.

그림 5는 방사성물질의 환경누출이 목초의 성장기에 일어나며, 누출 기간동안 강우가 있는 경우 그림 4에서 언급한 2가지 경우에 대한 우유내 방사성물질의 농도변화를 보여준다. 강우가 없는 경우와 마찬가지로 공기흡입은 무시 가능한 오염 경로였다. 강우가 있는 경우  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 의 오염은 강우가 없는 경우에 비해 지상으로 많은 침적으로 뚜렷이 높은 반면,  $^{131}\text{I}$ 의 오염은 강우가 있는 경우에 보다 낮게 나타났다. 그 이유는 강우로 인한  $^{131}\text{I}$ 의 지상으로 침적과정보다 목초에 차단된  $^{131}\text{I}$ 의 제거과정이 보다 우세하기 때문이다. 이러

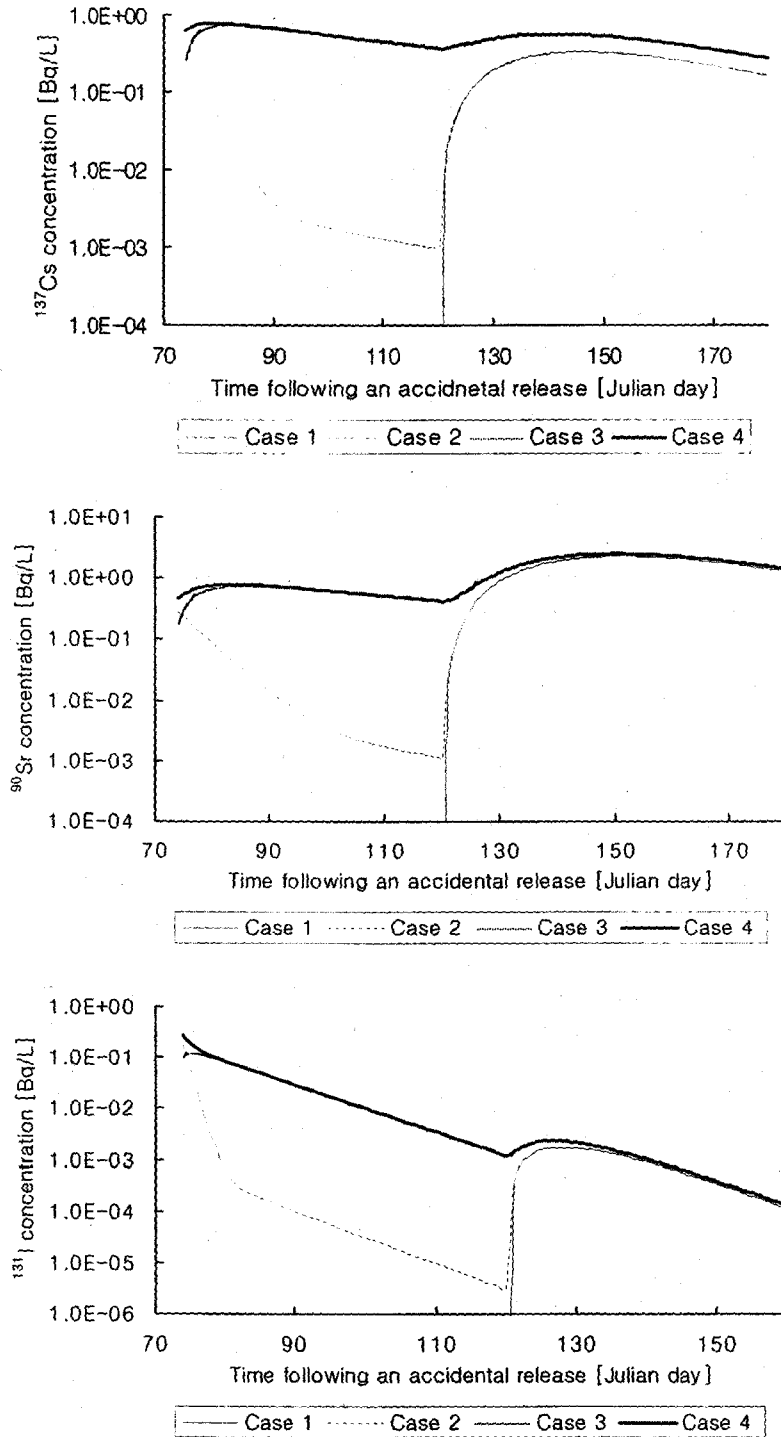


Fig. 3. Radionuclide concentrations in milk for the same cases as in Fig. 2 assuming that an accidental release has taken place in a specified non-growing season (15th March) with precipitation of  $0.1 \text{ mm hr}^{-1}$ .



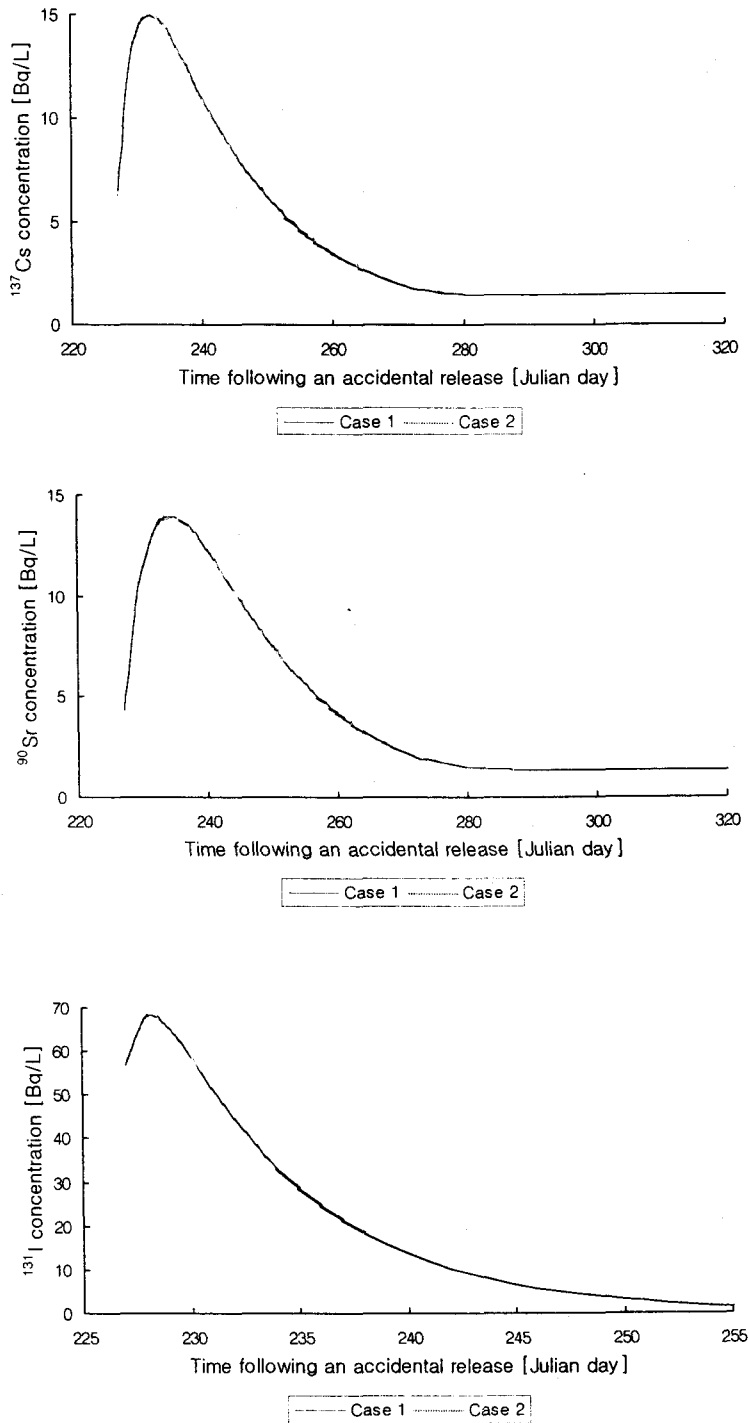


Fig. 4. Radionuclide concentrations in milk for two different cases assuming that an accidental release has taken place in a specified growing season (15th August) with no precipitation ; Case 1 : predictive results using the previous model, Case 2 : predictive results by incorporating the contaminative pathway due to inhalation of air into the previous model.

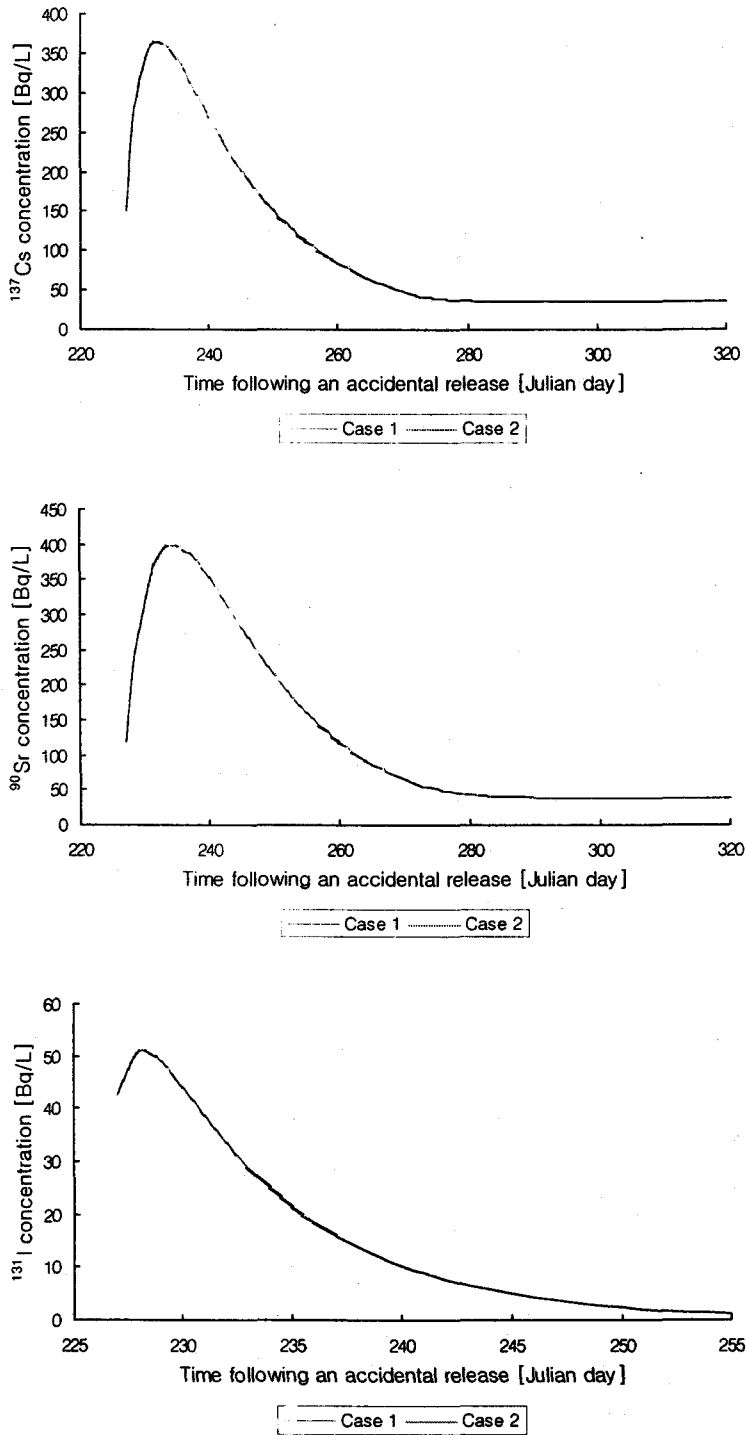


Fig. 5. Radionuclide concentrations in milk for the same cases as in Fig. 4 assuming that an accidental release has taken place in a specified growing season (15th August) with precipitation of  $0.1 \text{ mm hr}^{-1}$ .

한 현상은 참고문헌 [4]에서도 이미 제시된 바 있다.

## 결 론

원자력시설의 사고시 환경으로 누출된 방사성 물질에 의한 가축의 공기 호흡과 토양 섭취에 따른 축산물의 오염을 예측하기 위한 수학적 모델 정립과 아울러 동적 섭취경로모델 DYNACON을 개선하였다. 개선된 모델을 사용하여 젖소의 공기 호흡과 토양 섭취에 따른 우유의 오염영향을 고찰하였다.

방사성물질의 환경 누출이 목초가 성장하지 않는 비방목 기간에 일어나는 경우에 젖소의 공기 흡입과 토양 섭취는 우유의 중요한 오염경로가 될 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 강우는 이들 오염경로에 중요한 요소로 작용하였는데, 단반감기 핵종인  $^{131}\text{I}$ 보다 장반감기 핵종인  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 에 보다 뚜렷하였다. 방사성물질의 환경 누출이 방목기간에 일어나는 경우 강우의 유무에 관계없이 공기 흡입에 의한 영향은 전 기간에 걸쳐 무시 가능한 수준이었다. 이와 같이 방사성물질의 환경누출 시점과 핵종에 따라 두 오염경로의 영향이 뚜렷이 다르게 나타나는 것은 젖소의 사육 특성, 체내에서 핵종의 신진대사, 핵종의 환경내 거동 특성 등에 기인한다.

본 연구의 해석 결과는 우유에 국한한 것이며, 이러한 오염경로의 중요성은 축산물에 따라 다른 결과를 나타낼지 모른다. 또한 본 결과는 방사성 물질의 환경누출 시점을 목초의 성장기와 비성장기의 대표적 시점에 대해 얻어진 것이며, 이들 결과가 모든 방사성물질의 환경 누출시점을 대표하지 않는다는 사실에 주의해야 한다. 이러한 연구는 DYNACON의 예측 결과에 대한 신뢰도 향상에 기여하며, 특히 방사성물질의 환경누출이 목초의 비성장기에 일어나는 경우 축산물에 대한 오염농도 예측에 있어서 보다 그러하다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. H. Muller and G. Prohl, "The Role of Seasonal, Climatic and Meteorological Conditions in Modifying Nuclear Consequences", in : *Proceedings of an NEA Workshop on The Influence of Seasonal Conditions on the Radiological Consequences of a Nuclear Accident*, pp 139-147, 21-23 September, 1988, Paris (1998)
2. M. H. Han, E. H. Kim, K. S. Suh, W. T. Hwang and Y. G. Choi, *Development of Environmental Radiation Protection Technology : Development of Radiological Emergency Preparedness and Biological Dosimetry Technology*, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RR-913/8 (1998)
3. 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)
4. W. T. Hwang, E. H. Kim, K. S. Suh, H. J. Jeong, M. H. Han and C. W. Lee, "Influence of Predictive Contamination to Agricultural Products due to Dry and Wet Processes During an Accidental Release of Radionuclides", *Annals of Nuclear Energy*, 30, 1457-1471 (2003)
5. R. E. Faw and J. K. Shultis, *Radiological Assessment : Source and Exposures*, pp 523-571, PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1993)
6. S-R. Peterson, *Model Description of CHERPAC (Chalk River Environmental Research Pathways Analysis Code) ; Results of Testing with Post-Chernobyl Data from Finland*, AECL-11089, Canada (1994)