

방사성물질의 사고 누출에 따른 가축의 공기 흡입과 토양 섭취에  
의한 육류의 오염영향

Contaminative Influence of Beef Due to the Inhalation of Air and  
the Ingestion of Soil of Cattle in an Accidental Release of  
Radioactive Materials

황원태, 김은한, 서경석, 정효준, 이선미, 한문희  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력시설의 사고로 인해 방사성물질의 대기 누출에 따른 환경에서 핵종 거동을 모사하는 동적 섭취경로모델 DYNACON을 개선하여 가축 (육우)의 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 육류 (쇠고기)의 오염영향을 고찰하였다. 이들 오염경로는 누출이 육우의 비방목 기간에 일어나는 경우에 육류의 오염에 있어서 결코 무시될 수 없는 오염경로라는 사실을 확인하였다. 특히 누출 후 대부분 기간에 걸쳐 토양 섭취는 공기 흡입에 의한 육류의 오염영향에 비해 우세하였다. 누출 기간동안 강우는 토양 섭취에 의한 육류의 오염에 중요한 요소로 작용하였으며, 이러한 현상은 단반감기 핵종인  $^{131}\text{I}$  보다 장반감기 핵종인  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우에 보다 뚜렷하였다. 이전에 수행된 우유에 대한 분석결과와 비교하여 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 오염경로는 상대적으로 긴 생물학적 반감기를 갖는 육류에 대해 보다 중요하였다. 방목기간에 방사성물질이 대기로 누출되는 경우 누출 기간동안 강우의 유무에 관계없이 목초 섭취에 의한 오염 영향이 지배적이었으며, 결과적으로 토양 섭취와 공기 흡입에 의한 오염 영향은 우유의 경우와 마찬가지로 무시 가능하였다.

Abstract

The contaminative influence of beef due to the inhalation of air and the ingestion of soil of cattle, both of which are dealt with as minor contaminative pathways in most radioecological models but may not be neglected, was comprehensively investigated with the improvement of

the Korean dynamic food chain model DYNACON. As the results, it was found that both pathways can not be neglected at all in the contamination of beef in the case of an accidental release during the non-grazing period of cattle. The ingestion of soil was more influential in the contamination of beef than the inhalation of air over most time following an release. If precipitation is encountered during an accidental release, contaminative influence due to the ingestion of soil was far greater compared with the cases of no precipitation. This fact was more distinct for a long-lived radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  than a short-lived radionuclide  $^{131}\text{I}$  (elemental iodine). Compared with the results for milk performed prior to this study, the contaminative pathways due to the inhalation of air and the ingestion of soil were more important in beef because of longer biological half-lives. In the meantime, in the case of an accidental release during the grazing period of cattle, radioactive contamination due to the ingestion of pasture was dominant irrespective of the existence of precipitation during an accidental release. It means that contaminative influence due to the inhalation of air and the ingestion of soil is negligible like the cases of milk.

## 1. 서 론

원자력발전소를 포함한 원자력시설로부터 대기로 방출된 방사성물질에 의한 농축산물의 오염은 인체에 중요한 영향을 끼치는 피폭경로이다. 사고와 같이 짧은 기간에 다량의 방사성물질이 대기로 누출되어 농경지에 침적되는 경우 농작물내 농도는 농작물의 성장 및 경작 특성 등으로 누출이 일어난 시점 또는 계절에 따라 다양한 변화를 나타낸다. 결과적으로 오염된 농축산물 섭취는 다른 피폭경로와 달리 뚜렷한 계절적 영향을 나타내는 인체에 대한 주요 피폭경로이다[1]. 이와 같이 농작물의 계절적 특성을 반영하여 방사성물질의 대기 누출이 일어난 시점에 따라 농축산물의 농도변화를 해석할 수 있는 모델을 동적 섭취경로모델 (dynamic food chain model ; 이하 동적모델)이라 하며, 1986년에 발생한 체르노빌 사고 이후에 이에 대한 관심은 한층 고조되었다. 국내에서는 한국원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석시스템 (FADAS : **F**ollowing **A**ccident **D**ose **A**ssessment **S**ystem[2])에서 농축산물 섭취에 의한 내부 피폭선량을 평가하기 위한 모듈로서 동적모델 DYNACON[3]을 개발한 바 있다. 개발 초기의 모델에서는 지상으로 핵종의 침적량으로부터 농축산물내 농도를 예측하였으나, 그 후 핵종의 환경누출 기간동안 발생할지 모르는 강우에 의한 핵종의 거동현상의 고려와 함께 사고시 환경에서 신속하고 쉽게 측정할 수 있는 공기중 농도 또는 지상으로 침적량으로부터 농축산물 오염 예측이 가능하도록 개선하였다[4].

가축은 사료의 섭취 뿐 아니라 공기의 흡입 (토양의 재부유에 의한 공기오염 포함)과 토양의 섭취 등으로 오염될 수 있다. 현재까지 개발된 여러 동적모델[5,6] 뿐 아니라 미국 원자력규제위원회 (NRC)[7]와 미국 환경보호청 (EPA)[8] 등에서 개발한 평형모델 (equilibrium model)에서 공기 흡입과 토양 섭취는 사료 섭취에 비해 상대적으로 사소한 오염경로로 분류되어 무시되거나 또는 특정기간에만 부분적으로 고려되고 있다. 가축은 방목기간 뿐 아니라 비방목기간에도 질병 예방과 육질 개선 등을 위해 야외에서 활동시키며 축사는 외부 공기와 쉽게 혼합되는 개방형이기 때문에 공기 흡입과 토양 섭취는 사육되는 전 기간에 걸쳐 축산물의 중요한 오염경로가 될 수 있다. 또한 가축이 오염되지 않은 사료로 사육된다하더라도 축사 외부의 활동과 축사의 밀폐 등 대응책 결정에 이틀 두 오염경로는 중요한 요소로 작용할 수 있다. 현재 DYNACON에서는 우유를 생산하는 젖소와 육류 (쇠고기)를 생산하는 육우의 방목기간에만 토양 섭취로 인한 오염 영향만을 고려하고 있으며, 우유에 대한 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 오염 영향은 이전 연구에서 수행된 바 있다[9].

본 연구는 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 우유의 오염영향 분석의 후속단계로 DYNACON을 개선하여 육류에 대한 두 오염경로의 영향을 분석하였다. 장반감기 핵종  $^{137}\text{Cs}$  (반감기 약 30년)과 단반감기 핵종  $^{131}\text{I}$  (반감기 약 8일)에 대해 누출이 일어난 시점 (목초의 성장기와 비성장기)과 누출 기간동안 강우의 유무에 따라 비교 분석한 결과를 수록하였다.

## 2. 방사성물질의 환경내 거동

원자력시설로부터 대기로 누출된 방사성물질은 주변의 지형 및 기상조건 등에 따라 이동하면서 확산된다. 공기 중 방사성물질은 중력 또는 강우 등에 의해 지상으로 침적되는데 일부는 농작물에 차단 (interception)되고 나머지는 토양 표면에 침적한다. 농작물의 잎 표면에 의해 차단된 방사성물질은 기상조건과 농작물의 성장에 따라 희석되고 일부는 농작물의 조직을 통해 사람이 먹는 부위 (가식부위)로 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 기법으로 널리 활용되고 있다[10]. 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].

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

여기서,

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

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

$n$ : 구간  $i$ 의 오염에 영향을 미치는 구간수

각 구간에 대해 식 (1)과 같은 형태의 미분 방정식과 초기 값을 설정한 후, 연립 미분 방정식의 해로부터 각 구간에 대한 방사성물질의 농도변화를 예측한다. 이를 위해서는 농작물 특성 뿐 아니라 핵종 특성 등 수 많은 자료가 요구된다. DYNACON은 수집 가능한 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 적용 값 등은 참고문헌 [3]과 [4]에 잘 기술되어 있다.

### 3. 육류의 오염예측

육류는 사료 섭취 뿐 아니라 토양 섭취와 공기 흡입 등에 의해 오염될 수 있다. 육류의 오염 예측에 있어서 동적모델[5,6] 뿐 아니라 평형모델[7,8]에서 사료의 섭취는 주요

오염경로로 고려되는 반면, 나머지는 상대적으로 사소한 오염경로로 분류되어 무시되거나 부분적으로 고려되고 있다. 동적모델과 평형모델은 결과의 활용목적에 있어서 차이가 있다. 일반적으로 평형모델은 원자력시설의 운영에 따른 방사성물질에 의한 환경상의 위해 방지 등 주로 시설 운영의 규제적 차원에서 활용되기 때문에 결과에 대한 보수성이 유지되어야 한다. 따라서 일반적으로 토양 섭취와 공기 흡입에 의한 오염영향을 반영하고 있지 않는 평형모델에서는 결과에 대한 과소평가를 방지하기 위해 사료 섭취에 의한 오염영향 평가모델의 변수값 설정에 보수성을 부여하여야 할 것이다. 반면 동적모델은 사고결과 해석과 이에 따른 대응책 결정 등에 활용되기 때문에 가능한 한 실제적 현상을 반영한 수학적 모델과 변수 값의 선정이 중요하다. 현재 DYNACON에서 토양 섭취에 의한 오염경로는 가축의 방목기간에만 고려하고 있으며, 공기 흡입에 의한 영향은 고려하고 있지 않다. 가축은 방목기간 뿐 아니라 비방목기간에도 질병 예방과 육질 개선 등을 위해 야외에서 활동시키며 축사는 외부 공기와 쉽게 혼합되는 개방형이기 때문에 공기 흡입과 토양 섭취는 사육되는 전 기간에 걸쳐 축산물의 중요한 오염경로가 될 수 있다. 또한 가축이 오염되지 않은 사료로 사육된다하더라도 축사 외부의 활동과 축사의 밀폐 등 오염 피해 최소화를 위한 대응책 결정에 있어 이들 두 오염경로는 중요한 요소로 작용할 수 있다. 특히 오염되지 않은 저장 사료를 섭취하는 비방목기간에 방사성물질이 대기로 누출되는 경우 토양 섭취와 공기 흡입은 육류에 있어서 지배적 오염경로이다. 따라서 일반적으로 사소한 오염경로로 분류되는 토양 섭취와 공기 흡입에 의한 축산물의 오염영향을 고찰할 필요가 있으며, 이들 오염경로를 포함한 육류의 오염은 다음 식으로 평가될 수 있다.

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

여기서,

$C(t)$  : 시간  $t$  에서 육류내 방사성물질의 농도 (Bq dry-kg<sup>-1</sup> 또는 Bq L<sup>-1</sup>)

$\Delta t$  : 계산시간 간격 (=1일)

$\lambda_b$  : 육류에 대한 생물학적 반감기 (d<sup>-1</sup>)

$\lambda_d$  : 핵종의 물리적 반감기 (d<sup>-1</sup>)

$TF$  : 육류로의 핵종 전이계수 (d kg<sup>-1</sup>)

- $A(t=0)$  : 방사성물질의 환경누출 기간동안 평균 공기중 농도 ( $\text{Bq m}^{-3}$ )
- $X_A(t)$  : 사료의 외부조직 (또는 표면)에서의 방사성물질의 농도 ( $\text{Bq dry-kg}^{-1}$ )
- $X_B(t)$  : 사료의 내부조직에서 방사성물질의 농도 ( $\text{Bq dry-kg}^{-1}$ )
- $X_C(t)$  : 토양 표면에서 방사성물질의 농도 ( $\text{Bq m}^{-2}$ )
- $RF$  : 재부유 인자 ( $\text{m}^{-1}$ )
- $BR$  : 가축의 공기 흡입율 ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )
- $F_v$  : 가축의 사료섭취율 ( $\text{dry-kg d}^{-1}$ )
- $F_s$  : 가축의 토양 섭취율 ( $\text{dry-kg d}^{-1}$ )
- $\rho_s$  : 토양의 밀도 ( $\text{dry-kg m}^{-3}$ )
- $L_s$  : 지표면 토양의 깊이 (m)

식 (2)에서 오른쪽의 첫 번째 항은 시간  $t$  이전까지 사료 섭취, 토양 섭취, 공기의 흡입에 의한 육류의 오염, 두 번째 항은 시간  $t$  에서 사료 섭취에 의한 육류의 오염, 세 번째 항은 시간  $t$  에서 토양 섭취에 의한 육류의 오염, 네 번째 항은 방사성물질의 누출 기간동안 공기의 흡입에 의한 육류의 오염, 다섯 번째 항은 시간  $t$  에서 토양에 침적된 재부유 방사성물질의 흡입에 의한 육류의 오염을 나타낸다. 이러한 육류의 오염과정은 전 기간에 걸쳐 연속적으로 일어난다고 가정하였다. 본 연구에서 적용된 가축 (육우)에 대한 공기 흡입율 및 토양 섭취율은 각각  $130 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ [11]와  $0.5 \text{ kg d}^{-1}$ [3]로 가정하였으며, 기타 다른 특성 변수는 참고문헌 [3]에 잘 기술되어 있다. DYNACON에서는 토양의 경작특성에 따라 경작지와 비경작지로 구분하고 있다. 이 모델에서 육우의 사료로 이용되는 목초는 비경작지 토양특성에 따라 성장하고 방목기간에는 비경작지에서 활동한다고 가정하고 있다. 본 연구에서는 육류 (쇠고기) 오염평가를 위한 방사성물질의 토양 이동 특성은 모두 비경작지와 동일하다고 가정하였다. 즉 육우는 비경작지와 동일한 토양 특성을 갖는 야외에서 활동한다고 가정하였다. 사료의 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 연립미분방정식의 수치해로부터 방사성물질의 대기 누출 후 시간에 따라 예측된다.

#### 4. 결과 및 고찰

우유와 공기 호흡과 토양 섭취에 따른 오염영향을 반영한 동적모델 DYNACON을 사용하여 이들 경로에 의한 우유의 오염영향을 고찰하였다. 이들 경로에 의한 오염영향은 가상 사고 시나리오에 따라 다양하게 나타날 것으로 판단되며, 이들 현상을 보다 명확히 설명해 줄 것으로 판단되는 대표적 시나리오를 구성하였다. 방사성물질의 대기 누출이 일어난 시점은 우유의 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. 대기 누출은 하루동안 지속되며, 이 때 공기중 평균 농도는 강우의 유무에 관계없이  $1 \text{ Bq m}^{-3}$ 으로 가정하였다. 누출 기간동안 강우가 있는 경우, 강우는  $0.1 \text{ mm hr}^{-1}$ 의 강우율로 방출기간 내내 지속된다고 가정하였다. 원자력발전소의 사고시 농축산물 오염영향에 중요한 장반감기 핵종  $^{137}\text{Cs}$ 과 단반감기 핵종  $^{131}\text{I}$ 이 분석 대상 핵종으로 선택되었다.

그림 2는 방사성물질의 대기 누출이 목초의 비성장기에 일어나며, 누출기간 동안 강우가 없는 경우 오염경로의 고려에 따른 우유내 농도변화를 보여준다.  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 고려되는 오염경로에 따라 그 결과는 큰 차이를 나타냈다. 심지어 목초의 성장기 동안에도 상당한 농도차이를 나타냈다 (예로 누출 후 100일 경과한 일년 중 174번째 날 두 오염경로의 고려 유무에 따라 최대 약 10배 차이를 나타냈다). 누출 후 약 40일 경과할 때까지는 공기의 흡입 (누출기간동안 오염 공기의 흡입과 토양의 재부유로 인한 오염 공기의 흡입)에 의한 우유의 오염이 상대적으로 우세하지만 시간경과에 따라 토양의 섭취에 의한 영향이 우세하였다. 이전 연구에서 수행된 우유에 대한 분석결과와 비교하여 차이점은 방목기간까지도 두 경로는 우유의 오염에 상당한 영향을 미친다는 것이다. 이는 우유에 대한 핵종의 생물학적 반감기가 우유에 비해 상대적으로 길기 때문이다 ( $^{137}\text{Cs}$ 의 우유에 대한 생물학적 반감기는 약 50일이지만 우유의 경우에는 약 2일에 불과하다).  $^{131}\text{I}$ 의 경우에는 토양 섭취에 의한 영향이  $^{137}\text{Cs}$ 에 비해 보다 뚜렷하였다. 즉, 누출 후 수 일 정도의 매우 짧은 기간동안에만 공기 흡입에 의한 영향이 우세하고 나머지 전 기간에 걸쳐 토양 섭취에 의한 영향이 지배적이었다. 그 이유로 본 연구에서 고려된 원소형 요오드 (elemental iodine)는 지상으로 침적속도가 입자상 핵종  $^{137}\text{Cs}$ 에 비해 약 10배 정도 높기 때문이다[4].  $^{131}\text{I}$ 의 우유에 대한 생물학적 반감기는 약 100일[3]로  $^{137}\text{Cs}$ 에 비해 상대적으로 길며, 결과적으로 시간에 따른 급격한 농도의 감소는 핵종의 물리적 반감기에 기인한다. 요약하면  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 토양섭취와 공기흡입은 결코 무시할 수 없는 오염경로이며,  $^{131}\text{I}$ 의 경우 누출 후 수 일 동안만 제외하고 공기흡입에 의한 영향은 상대적으로 사소하다는 사실을 말해준다.

그림 3은 방사성물질의 누출이 목초의 비성장기에 일어나며, 누출 기간동안 강우가 있

는 경우 오염경로의 고려에 따른 육류내 농도변화를 보여준다. 강우의 유무를 제외하고 동일한 조건에서 계산된 그림 2의 결과와 비교하여  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우에는 강우에 따른 지상으로 많은 침적으로 거의 전 기간에 걸쳐 공기 토양 섭취에 의한 영향이 지배적이며, 공기 흡입에 의한 영향은 상대적으로 무시 가능하였다. 강우가 없는 경우에 비해 육류내  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도는 뚜렷이 높게 나타난 반면,  $^{131}\text{I}$ 의 농도는 강우의 유무에 관계없이 거의 유사한 결과를 보여준다. 이는 핵종에 따라 다른 건침적에 대한 습침적 속도의 비로 설명될 수 있다. 예로  $0.1 \text{ mm hr}^{-1}$ 의 강우에 대해  $^{137}\text{Cs}$ 의 습침적 속도는 건침적 속도에 비해 약 20 배 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. 요약하면 두 핵종 모두 대부분 기간에 걸쳐 토양 섭취는 중요한 오염경로이지만 공기흡입에 의한 영향은 상대적으로 사소하다는 사실을 말해준다.

그림 4는 방사성물질의 누출이 목초의 성장기에 일어나며, 누출기간 동안 강우가 없는 경우 오염경로의 고려에 따른 육류내 농도변화를 보여준다. 목초의 비성장기에 누출되는 경우와 달리 두 핵종 모두 4가지 각기 다른 오염경로의 고려에 대해 예측결과는 거의 유사하였다. 이러한 결과는 육류의 오염에 있어서 방목에 따른 목초의 섭취로 인한 영향이 지배적이며, 공기흡입과 토양섭취는 상대적으로 사소한 오염경로라는 사실을 말해 준다.

그림 5는 방사성물질의 누출이 목초의 성장기에 일어나며, 누출 기간동안 강우가 있는 경우 오염경로의 고려에 따른 육류내 농도변화를 보여준다. 강우가 없는 경우와 마찬가지로 육류의 오염은 방목에 따른 목초의 섭취로 인한 영향이 지배적이며, 공기흡입과 토양 섭취는 상대적으로 사소한 오염경로였다. 강우가 있는 경우  $^{137}\text{Cs}$ 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  $^{131}\text{I}$ 의 경우 강우로 인한 지상으로 침적과정보다 목초에 차단된  $^{131}\text{I}$ 의 강우에 의한 제거과정이 보다 우세하기 때문이다. 이러한 현상은 참고문헌 [4]에서도 이미 제시된 바 있다.

## 5. 결 론

원자력시설의 사고로 인해 방사성물질의 대기 누출에 따른 환경에서 핵종 거동을 모사하는 동적 섭취경로모델 DYNACON을 개선하여 육우의 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 육류의 오염영향을 고찰하였다.

공기 흡입과 토양 섭취는 누출이 육우의 비방목 기간에 일어나는 경우에 육류의 오염에 있어서 결코 무시될 수 없는 오염경로라는 사실을 확인하였다. 특히 누출 후 대부분



기간에 걸쳐 토양 섭취는 공기 흡입에 의한 육류의 오염영향에 비해 우세하였다. 누출 기간동안 강우는 토양 섭취에 의한 육류의 오염에 중요한 요소로 작용하였으며, 이러한 현상은 단반감기 핵종인  $^{131}\text{I}$  보다 장반감기 핵종인  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우에 보다 뚜렷하였다. 이전에 수행된 우유에 대한 분석결과와 비교하여 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 오염경로는 상대적으로 긴 생물학적 반감기를 갖는 육류에 대해 보다 중요하였다. 방목기간에 방사성물질이 대기로 누출되는 경우 누출 기간동안 강우의 유무에 관계없이 목초 섭취에 의한 오염 영향이 지배적이었으며, 결과적으로 토양 섭취와 공기 흡입에 의한 오염 영향은 우유의 경우와 마찬가지로 무시 가능하였다. 이와 같이 방사성물질의 누출 시점과 핵종에 따라 두 오염경로의 영향이 뚜렷이 다르게 나타나는 것은 육우의 사육특성, 체내에서 핵종의 신진대사, 핵종의 환경내 거동 특성 등에 기인한다.

이러한 연구는 DYNACON의 예측 결과에 대한 신뢰도 향상에 기여할 것으로 판단되며, 특히 방사성물질의 누출이 육우의 비방목기간에 일어나는 경우 육류의 오염 예측에 있어서 보다 그러하다. 뿐만 아니라 본 연구는 육우의 피해를 최소화하기 위한 대응책 결정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 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. Han, 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-1913/98 (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] J. Koch and J. Tadmor, "RADFOOD - A Dynamic Model for Radioactivity Transfer through the Human Food Chain", Health Physics 50 (6), 721-737 (1986).
- [6] F. W. Whicker and T. B. Kirchner, "PATHWAY : A Dynamic Food-Chain Model to Predict Radionuclide Ingestion after Fallout Deposition", Health Physics 52 (6), 717-737 (1987).
- [7] 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", Regulatory Guide 1.109, Revision 1, U. S. NRC (1977).
- [8] R. E. Moore, C. F. Baes, L. M. McDowell-Boyer, A. P. Watson, F. O. Hoffman, J. C. Pleasant and C. W. Miller, "AIRDOS-EPA : A Computerized Methodology for Estimating Environmental Concentrations and Doses to Man from Airborne Releases of Radionuclides", Oak Ridge National Lab., TN 37830, ORNL-5532 (1979).
- [9] 황원태, 김은한, 서경석, 정효준, 한문희, 이창우, "원자력 사고시 가축의 공기 흡입과 토양 섭취에 의한 축산물의 오염 - 우유에 대한 오염 영향을 중심으로", 대한방사선방어학회지, 28(4), 299-309 (2003).
- [10] R. E. Faw and J. K. Shultis, Radiological Assessment : Source and Exposures, pp 523-571, PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1993).
- [11] 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).

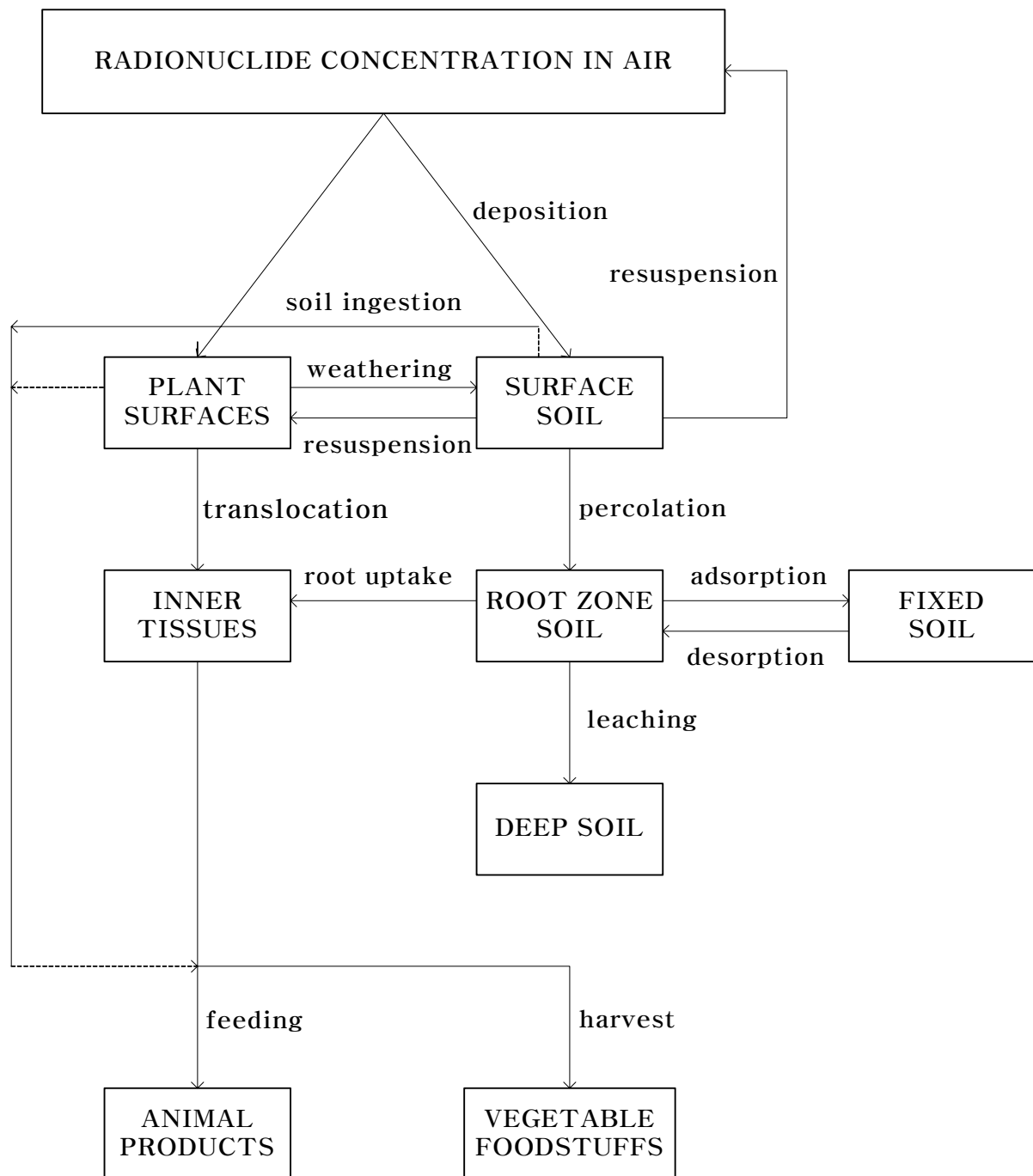


Fig. 1. Transfer processes of radionuclides between different compartments considered in DYNACON.

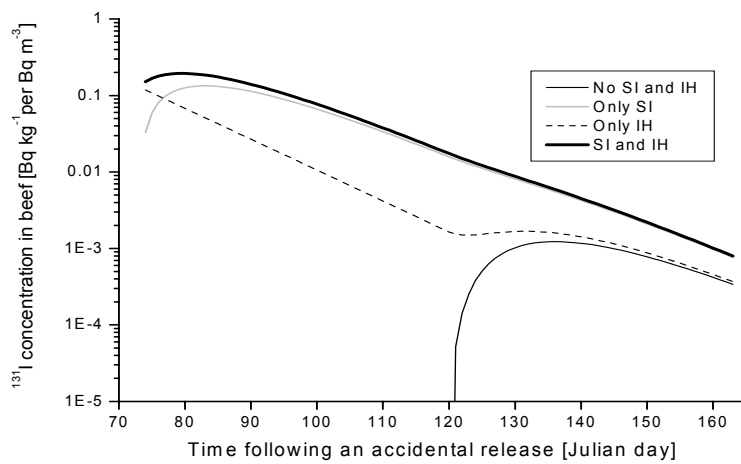
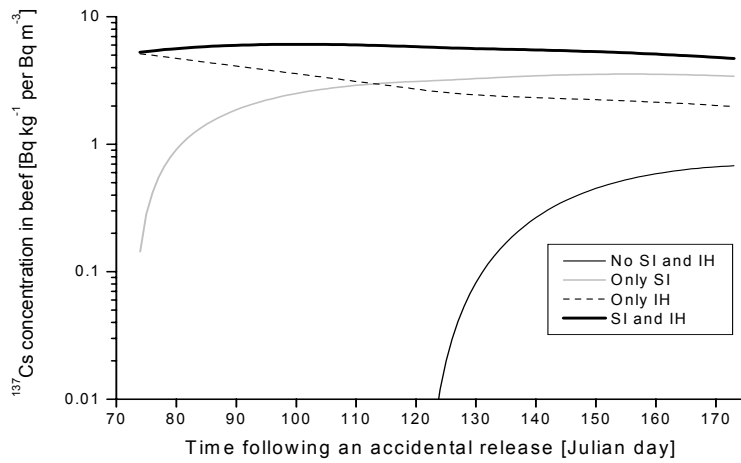


Fig. 2. Radionuclide concentrations in beef for four different cases assuming that an accidental release has taken place in a specified non-growing season (15th March) with no precipitation (SI : ingestion of soil, IH : inhalation of air).

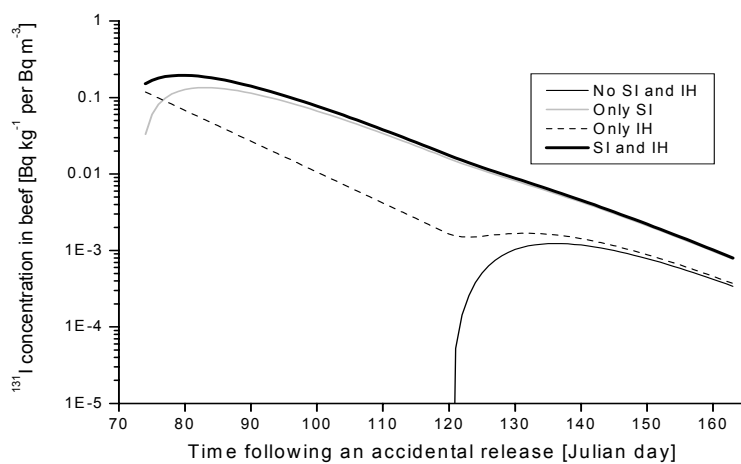
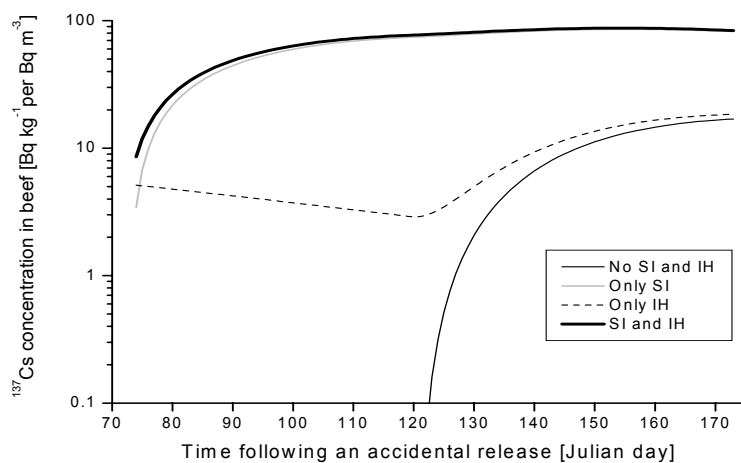


Fig. 3. Radionuclide concentrations in beef for four different cases assuming that an accidental release has taken place in a specified non-growing season (15th March) with precipitation of  $0.1 \text{ mm hr}^{-1}$  (SI : ingestion of soil, IH : inhalation of air).

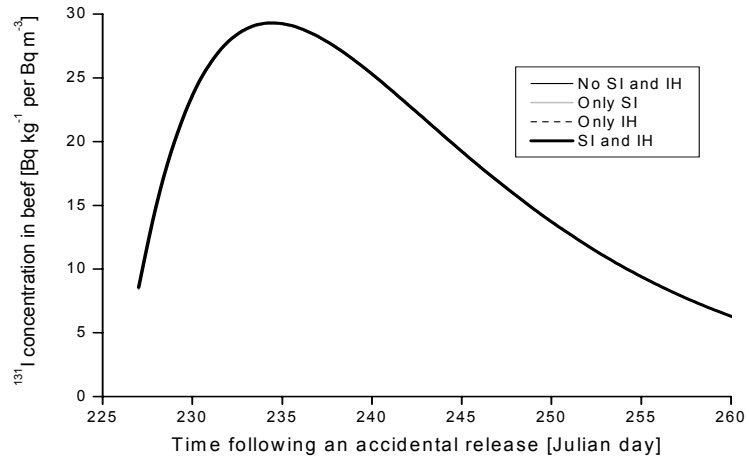
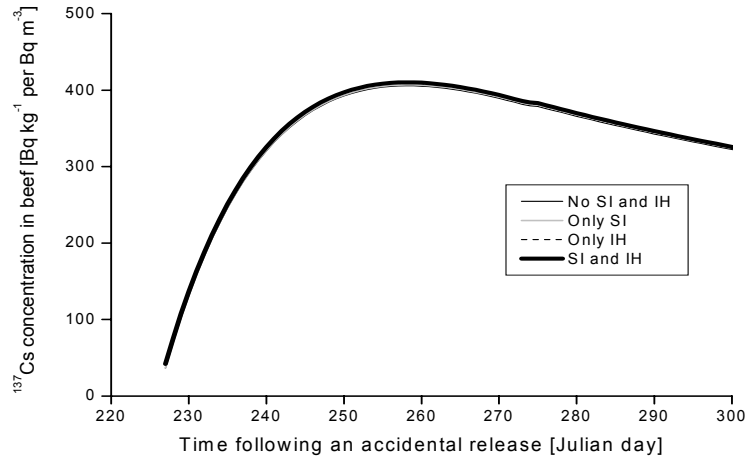


Fig. 4. Radionuclide concentrations in beef for four different cases assuming that an accidental release has taken place in a specified growing season (15th August) with no precipitation (SI : ingestion of soil, IH : inhalation of air ; the difference of predictive results from for different cases is very small).

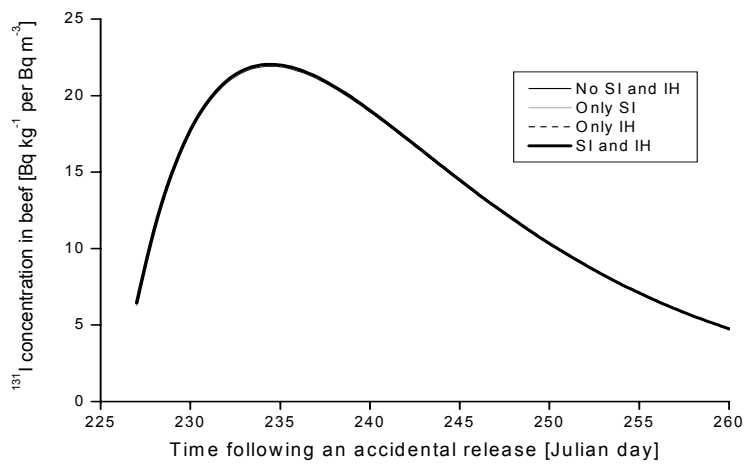
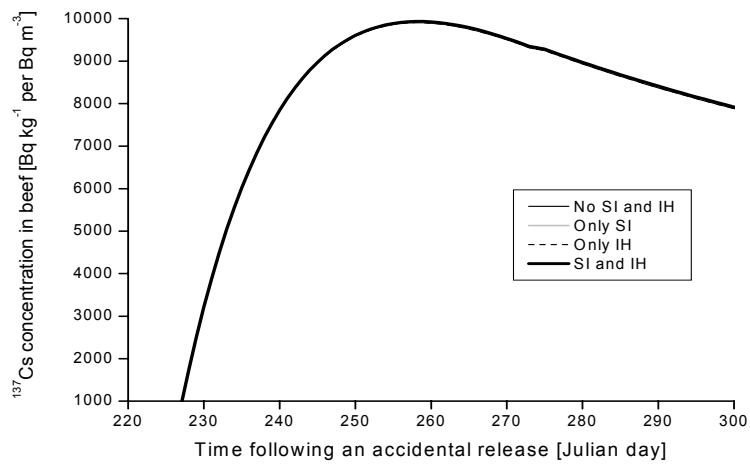


Fig. 5. Radionuclide concentrations in beef for the same cases as in Fig. 3 assuming that an accidental release has taken place in a specified growing season (15th August) with precipitation of  $0.1 \text{ mm hr}^{-1}$  (SI : ingestion of soil, IH : inhalation of air ; the difference of predictive results from for different cases is very small).