

## A Methodology for Determining the Optimal Durations of the Use of Contaminated Crops As Feedstuffs of Cattle Following a Nuclear Accident

Won-Tae Hwang, Moon-Hee Han, Yong-Ho Choi and Gyuseong Cho\*

Korea Atomic Energy Research Institute

\*Korea Advanced Institute of Science and Technology

### 원자력 사고후 가축 사료로서 오염 농작물 이용에 대한 최적기간 결정 방법론

황원태 · 한문희 · 최용호 · 조규성\*

한국원자력연구소, \*한국과학기술원

(1999년 4월 19일 접수, 1999년 8월 13일 채택)

**Abstract** - A methodology for determining the optimal durations of the use of contaminated crops as feedstuffs of cattle was designed based on the cost-benefit analysis method. The results of application for pigs, an omnivorous cattle, were discussed for the hypothetical deposition of radionuclides on August 15 when a number of crops are fully developed in Korean agricultural conditions. For investigating the relative cost-effectiveness of the use of contaminated crops as feedstuffs, the net benefit was compared with the case of the direct disposal of contaminated crops. The time-dependent radionuclide concentration in crops after the deposition was predicted using a dynamic food chain model DYNACON. The net benefit from the actions was quantitatively evaluated in terms of cost equivalent of doses and monetary costs of implementing the action. It depended on a number of factors such as radionuclides, variety of crops supplied as feedstuffs and duration of the actions. The use of contaminated crops as feedstuffs was more cost effective for  $^{90}\text{Sr}$  or  $^{131}\text{I}$  deposition than for  $^{137}\text{Cs}$  deposition.

**Key Words** : optimal duration, cost-benefit analysis method, pigs, deposition, dynamic food chain model

**요약** - 가축의 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 최적기간 결정 방법론을 비용-편익 분석법에 근거하여 모델링하였다. 많은 농작물의 왕성한 성장시기인 8월 15일을 방사성물질의 침적시점 (사고 시점)으로 가정하여 잡식성 가축인 돼지에 대해 적용한 결과를 논의하였다. 또한 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 상대적 비용 효과를 고찰하기 위해 오염 농작물을 바로 폐기시켰을 경우와 순이득을 비교·논의하였다. 침적후 농작물내 방사성물질의 농도는 동적섭식경로모델 DYNACON으로부터 예측되었다. 대응행위에 의한 순이득은 피폭선량의 금전가와 수행에 소요되는 금전적 비용에 의해 정량적으로 평가하였다. 오염 농작물을 사료로 이용함에 대한 순이득은 핵종, 농작물의 공급분율, 공급기간 등에 따라 다양하게 나타났다. 사료로서 오염 농작물의 이용은  $^{137}\text{Cs}$  침적에 비해  $^{90}\text{Sr}$  또는  $^{131}\text{I}$  침적의 경우에 비용측면에서 보다 효과적이었다.

**중심어** : 최적기간, 비용-편익분석법, 돼지, 침적, 동적섭식경로모델

### 서론

원자력 사고시 환경으로 방출된 방사성물질은 광범위하게 농작물을 오염시킴으로써 오염된 음식물

섭취에 의한 인체의 방사능 위해 뿐 아니라 막대한 경제적, 사회적 피해를 주게 된다. 따라서 주민에 대한 피해를 줄이기 위해서는 적절한 대응조치가 요구되는데 국제원자력기구 (IAEA), 국제방사

선방호위원회(ICRP)에서는 방사선 방호의 기본원칙인 개입의 정당화와 방호의 최적화에 입각한 체계적인 방법을 사용하여 사고에 대비하도록 권고하고 있다[1,2]. 방사성물질에 의한 음식물의 오염 준위는 방호계획을 수립할 때 요구되는 필수정보로 직접 시료를 분석하거나 환경내 핵종이동 모델 예측을 통해 알 수 있다. 모델예측에 의한 방법은 신속한 대응행위의 결정 뿐 아니라 장기 대책수립에 있어 보다 효과적이다. 사고시와 같이 단기간에 다량의 방사성물질이 농경지에 침적되어 음식물을 오염시키는 경우 방사성물질의 침적시점에 따른 농업 및 환경조건의 영향으로 환경내 방사성물질의 농도는 침적후 경과시간에 따라 매우 다양한 변화를 나타낸다. 따라서 환경내 방사성물질의 농도가 항상 일정하다고 가정하는 평형모델(equilibrium model)로는 사고시 적절하게 대처할 수 없기 때문에 침적시점과 침적후 경과시간에 따른 방사성물질의 농도의 변화를 해석할 수 있는 동적모델(dynamic model)이 요구된다. 한국원자력연구소에서는 실시간 방사선피폭해석시스템(FADAS: Following Accident Dose Assessment System)[3]에서 음식물 섭취에 의한 내부피폭을 평가하기 위한 모듈로서 우리나라의 농업 및 환경특성을 고려한 동적모델 DYNACON[4]을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 원자력 사고시 경제성 측면에서 효과적이며 수행하기 용이한 대응조치의 한 방안으로 가축의 사료로서 오염 농작물의 이용 방안에 대한 최적기간 결정 방법론을 비용-편익 분석법(cost-benefit analysis method)에 근거하여 모델링하였으며, 잡식성 가축인 돼지에 대해 그 적용 결과를 논의하였다. 또한 오염 농작물을 바로 폐기시켰을 경우와 순이득을 비교하므로써 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 상대적 비용 효과를 고찰하였다. 이러한 대응행위에 따른 비용은 피폭선량의 금전가와 수행에 소요되는 금전적 비용만을 고려하여 평가하였으며, 최종 의사결정 과정에서 중요하게 고려되는 정치·사회적 비용은 반영하지 않았다.

## 재료 및 방법

### 육류성 식품내 방사성물질의 농도

DYNACON은 환경구성요소를 구간(compartment)으로 나누고 구간간 핵종 이동을 해석하는 구간모델로서 구간  $i$ 에서의 방사성물질의 농도  $X_i$  (Bq dry-kg<sup>-1</sup> 또는 Bq m<sup>-2</sup>)는 구간  $i$ 로 방사성물질

의 유입율과 유출율의 차이로써 표현된다.

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

여기서,

$\lambda_{ij}$  = 구간  $i$ 에서 구간  $j$ 로의 핵종 이동율 (d<sup>-1</sup>),

$n$  = 구간  $i$ 의 오염에 영향을 미치는 구간수.

방사성물질의 침적시점과 지표위 방사성물질의 농도 (Bq m<sup>-2</sup>)의 자료가 입력되면 구간에 대한 연립 미분방정식의 수치해로부터 가축의 사료내 방사성물질의 농도를 얻는다. 육류성 식품내 방사성물질의 농도  $C(t)$  (Bq kg<sup>-1</sup>)는 구간에 대한 수치해로부터 다음과 같이 해석적으로 얻을 수 있다.

$$C(t) = C(t-\Delta t) e^{-(\lambda_b+\lambda_p)\Delta t} + T_f \sum_k V_k \cdot X_{A,k}(t) \quad (2)$$

여기서,

$\Delta t$  = 계산시간간격 (d),

$\lambda_b$  = 가축의 생물학적 배설율 (= ln2/T<sub>1/2,b</sub>, d<sup>-1</sup>),

$\lambda_p$  = 방사능 붕괴상수 (= ln2/T<sub>1/2,p</sub>, d<sup>-1</sup>),

T<sub>1/2,b</sub> = 가축의 생물학적 반감기 (d),

T<sub>1/2,p</sub> = 핵종의 물리적 반감기 (d),

T<sub>f</sub> = 오염된 사료섭취에 의한 육류성 식품으로의 핵종 전이계수 (d kg<sup>-1</sup>),

V = 가축의 오염사료 섭취율 (dry-kg d<sup>-1</sup>),

X<sub>A</sub> = 사료내 방사성물질의 농도 (Bq dry-kg<sup>-1</sup>),

k = 사료의 종류.

식 (2)의 오른쪽 첫번째 항은 오염사료 공급시작 시점부터  $t-\Delta t$ 까지 오염사료의 섭취로 인한 육류성 식품의 오염을, 두번째 항은 시간  $t$ 에서 오염사료의 섭취로 인한 육류성 식품의 오염을 나타낸다. 만일 일정한 기간동안 오염사료를 공급한 후 도살 등을 위해 비오염 사료로 공급하는 경우 육류성 식품내 방사성물질의 농도는 가축의 배설과 방사능 붕괴에 의해 다음 식에 따라 감소한다.

$$C(t) = C(t_f) e^{-(\lambda_b+\lambda_p)t} \quad (3)$$

여기서  $C(t_f)$ 는 비오염 사료공급 시작시점  $t_f$ 에서 육류성 식품내 방사성물질의 농도 (Bq kg<sup>-1</sup>)를 나타낸다.

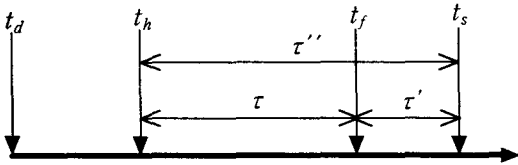
### 최적기간 결정 방법론

원자력 사고시 비상대응 결정지원을 위해 비용-효용 분석(cost-effectiveness analysis), 비용-편익 분석(cost-benefit analysis), 다속성 효용분석

(multi-attribute utility analysis), 다범주 우위분석 (multi-criteria outranking analysis) 등과 같은 여러 정량적 분석방법이 이용될 수 있는데, 이 중에서 경제적 이론에 입각하여 잘 확립되어 있고 널리 이용되고 있는 기법은 비용-편익 분석법으로 최적화된 편익을 도출하므로써 대응행위에 대한 의사결정을 유도한다.

오염된 농작물에 대한 경제·사회적 피해를 최소화하기 위해서는 다양한 대응행위가 고려될 수 있다. 오염된 농작물을 사람이 소비하지 않고 폐기시키는 것은 여러 대응행위 중 수행하기 용이하고 피폭부담 측면에서는 가장 효과적이지만, 폐기 시킴으로서 야기되는 경제적 손실이 크다. 따라서 한 대안으로서 경제·사회적 피해를 줄이면서 수행하기 용이한 대응행위로 오염 농작물을 폐기하지 않고 가축의 사료로 이용하는 방안이 고려될 수 있다.

그림 1은 가축의 사료로서 오염 농작물의 이용 방안을 정량적으로 평가하기 위한 도식도를 보여 준다. 오염 농작물을 공급하기 전까지는 수입 및 저장사료와 같은 비오염 사료가 가축에 공급되어 육류성 식품의 오염은 없다고 가정하였다. 오염 농작물은 수확후 임의의 기간 ( $\tau$ )까지 일정하게 가축의 사료로 공급되며, 가축의 도살전 일정기간 ( $\tau'$ )은 사람의 소비를 위해 비오염 사료로 공급된다고 가정하였다.



**Legend**

- $t_d$  : deposition time of radionuclides
- $t_h$  : harvest time of crops (= starting time of the action)
- $t_f$  : ending time of the action (= starting time of normal feeding regime)
- $t_s$  : slaughter time of cattle
- $\tau$  : duration of the action
- $\tau'$  : duration of normal feeding regime
- $\tau''$  : duration from start of the action to slaughter of cattle

**Fig. 1.** Schematic diagram for determining the optimal duration of the use of contaminated crops as feedstuffs of cattle.

비용-편익 분석법에 근거하여 한마리의 가축에 대해 오염 농작물을 사료로 공급하므로써 예상되는 순이득 ( $\Delta B$ )은 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$\Delta B = V_{cf} \cdot b_{cf} \cdot \tau - \alpha \cdot e \cdot M \sum_k C_k(t_s) \quad (4)$$

여기서,

$V_{cf}$  = 오염 농작물로 대체 가능한 가축의 비오염 사료섭취율 (dry-kg (animal · d)<sup>-1</sup>),

$b_{cf}$  = 비오염 사료의 단가 (\$ dry-kg<sup>-1</sup>),

$\alpha$  = 단위 선량당 금전가 (\$ Sv<sup>-1</sup>),

$e$  = 예탁 유효선량환산인자 (Sv Bq<sup>-1</sup>),

$M$  = 가축당 사람이 소비할 수 있는 육류성 식품의 양 (kg animal<sup>-1</sup>),

$C_k(t_s)$  = 오염 농작물  $k$ 의 공급으로 도살시점  $t_s$ 에서 육류성 식품내 방사성물질의 농도 (Bq kg<sup>-1</sup>).

식 (4)에서 오른쪽 첫번째 항은 비오염 사료대신 오염 농작물을 사료로 공급하므로써 얻는 금전적 이득을 나타내며, 두번째 항은 오염 농작물을 사료로 이용하므로써 육류성 식품내 방사성물질 농도의 증가에 따른 피폭의 금전적 부담을 나타낸다. 가축의 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 정당화 및 최적기간은 수학적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{정당화 : } \Delta B(\tau) > 0 \quad (5)$$

$$\text{최적화 : } \frac{\Delta B(\tau)}{d\tau} = 0 \quad (6)$$

가축의 사료로서 오염 농작물의 이용에 따른 상대적 비용 효과를 고찰하기 위해 오염 농작물을 그대로 폐기시키는 경우 순이득은 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$\Delta B = \alpha \cdot e \cdot \tau \sum_k V_k \cdot \bar{X}_{A,k} - \tau \sum_k V_k \cdot b_k \quad (7)$$

여기서  $b$ 는 농작물의 단가 (\$ dry-kg<sup>-1</sup>),  $\bar{X}_A$ 는 오염 농작물이 사료로 공급되는 기간  $\tau$  동안 농작물내 평균 방사성물질의 농도 (Bq dry-kg<sup>-1</sup>)이며 다음 식으로 평가할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{X}_{A,k} &= \frac{\int_{\tau} X_{A,k}(t) dt}{\tau} \\ &= \frac{\int_{\tau} X_{A,k}(t_h) \cdot e^{-\lambda_p t} dt}{\tau} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $X_A(t_h)$  는 농작물의 수확시점  $t_h$  에서 농작물내 방사성물질의 농도 ( $\text{Bq dry-kg}^{-1}$ )를 나타낸다. 식 (7)에서 오른쪽 첫번째 항은 오염 농작물을 사람이 소비하지 않았을 때 피할 수 있는 선량의 금전적 이득을 나타내며, 두번째 항은 그대로 폐기하였을 때의 금전적 손실을 나타낸다.

## 결과 및 고찰

본 연구에서 가축의 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 대응행위 방법론을 잡식성 가축인 돼지에 적용하였다. 또한 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 상대적 비용 효과를 고찰하기 위해 오염 농작물을 바로 폐기시켰을 경우와 순이득을 비교·논의하였다. 우리나라의 환경에서 많은 농작물이 왕성하게 성장하는 8월 15일을 사고시점으로 가정하였으며, 이 경우 쌀 (성장기간 : 5월 1일 ~ 9월 30일), 콩류 (성장기간 : 5월 1일 ~ 9월 30일) 및 과일류 (성장기간 : 5월 1일 ~ 10월 10일)는 상대적으로 오염도가 높은 주요 농작물로 돼지의 사료로 이용된다고 가정하였다. 돼지의 사료는 공급량중 약 85%는 수입사료, 15%는 사람이 소비한 후 남은 음식물 찌꺼기로 구성된다[5]. 수입사료 공급분은 오염 농작물로 대체 가능하며, 사람이 소비한 후 남은 음식물 찌꺼기는 오염되지 않았다고 가정하였다. 사료로서 이용되는 오염 농작물의 다양한 공급에 따른 순이득을 비교하기 위해 다음 3가지 경우에 대해 고찰하였다.

- Case I : 쌀 70%, 콩류 : 10%, 과일류 20%
- Case II : 쌀 40%, 콩류 : 40%, 과일류 20%
- Case III : 쌀 40%, 콩류 : 20%, 과일류 40%

사료로서 오염 농작물의 다양한 공급에 따른 돼지의 체중 및 육질의 변화 등은 없다고 가정하였다. 사료로서 오염 농작물의 공급은 쌀과 콩류가 수확되는 10월 1일부터 시작되며, 과일류는 쌀이나 콩류보다 늦게 수확 (10월 10일)되므로 과일류가 수확되기 전까지 오염 과일류의 공급분은 오염 쌀로 대체된다고 가정하였다. 돼지는 오염 농작물의 공급 시작일로부터 120일 후 도살된다고 가정하였다. 지표위 방사성물질의 농도는  $0.8 \text{ MBq m}^{-2}$ 으로 가정하였으며, 원자력발전소 사고시 중요한 장반감기 핵종인  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=30\text{년}$ )과  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2}=29\text{년}$ ), 단반감기 핵종인  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2}=8\text{일}$ )에 대해 결과를 고찰하였다. 1996년 소비자 물가자료에 근거하여 쌀은  $1.5 \text{ \$ dry-kg}^{-1}$ , 콩류는  $2.0 \text{ \$ dry-kg}^{-1}$ , 과일류는  $7.0 \text{ \$ dry-kg}^{-1}$  ( $1.0 \text{ \$ fresh-kg}^{-1}$ 에 해당), 사료는  $0.2 \text{ \$ dry-kg}$ 으로 가

정하였으며[6], 인적자본접근법 (human capital approach)에 근거한 당해연도 1인당 국민소득을 적용하여  $\alpha$  값은  $10,000 \text{ \$ (man} \cdot \text{Sv)}^{-1}$ 로 가정하였다. 한마리의 돼지는 약  $80 \text{ kg}$ 의 육류를 제공하며[7], 사료의 공급량은 약  $3.6 \text{ dry-kg d}^{-1}$  (대체 가능한 사료의 공급량 :  $3.06 \text{ dry-kg d}^{-1}$ )이다[6]. 성인에 대한 유효 선량환산인자는  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ 에 대해 각각  $1.3 \times 10^{-8}$ ,  $2.8 \times 10^{-8}$ ,  $2.2 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$ 을 적용하였다[8].

그림 2는 오염 농작물이 사료로 공급되는 시작시점인 10월 1일부터 공급기간동안 단위 침적당 농작물내 평균 방사성물질의 농도변화를 보여준다.

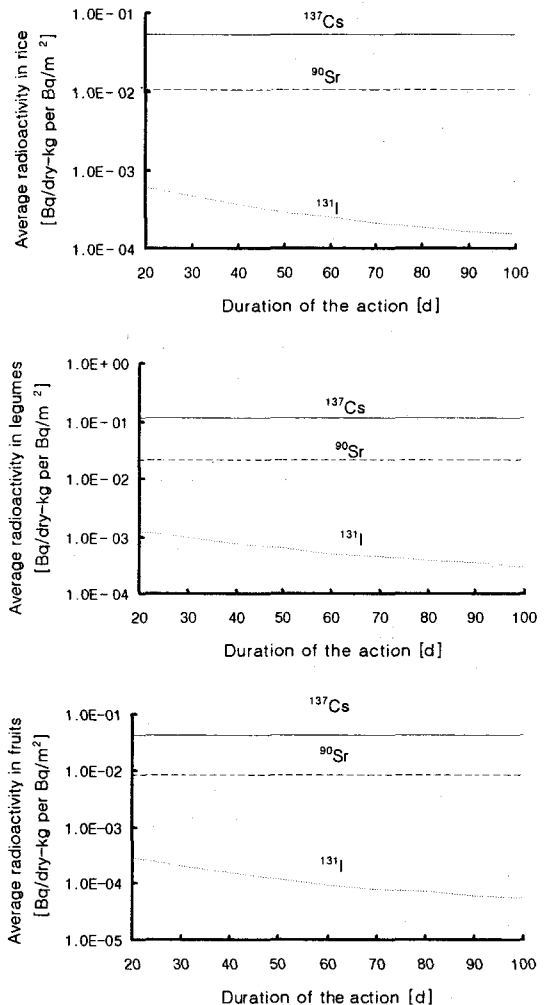
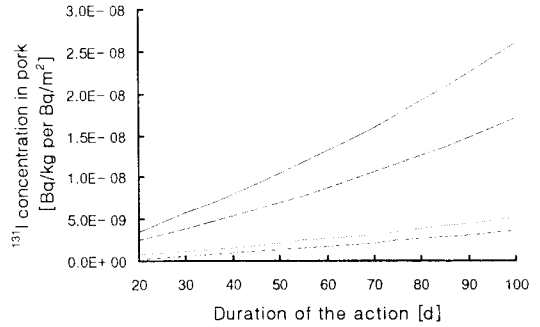
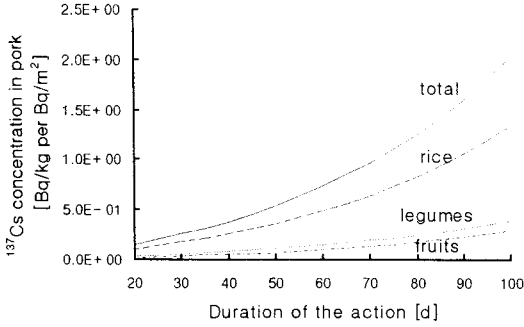


Fig. 2. Average radioactivity in crops,  $\bar{X}_A$ , as a function of the duration of the actions: the time of deposition is August 15; the starting time of the actions is October 1.

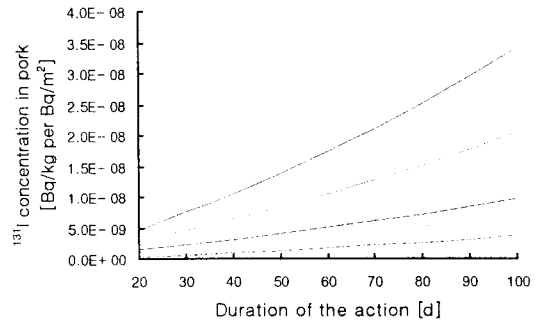
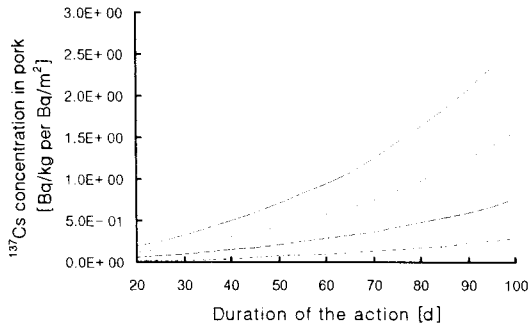
농작물은 크게 식물의 잎과 뿌리 흡수를 통해 오염되는데, 잎의 흡수를 통한 오염은 뿌리흡수를 통한 오염보다 훨씬 강하므로 공급기간에 따른 농

작물내  $^{137}\text{Cs}$ 의 평균 농도는  $^{90}\text{Sr}$ 의 평균 농도보다 상대적으로 높은 값을 보여준다. (잎 흡수율  $^{137}\text{Cs}$  :  $5.5 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  :  $1.0 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$  [3]). 두 핵종

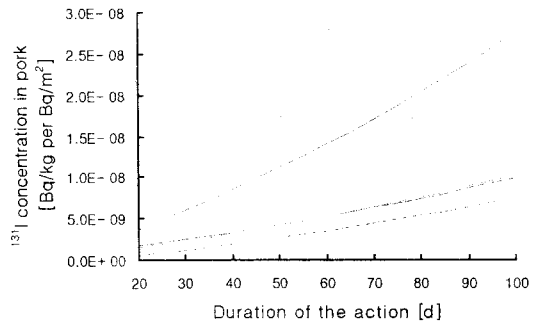
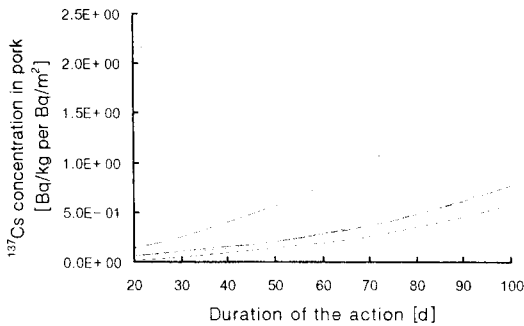
**Case I.** (70% 쌀, 10% 콩류, 20% 과일류)



**Case II.** (쌀 40%, 콩류 40%, 과일류 20%)



**Case III.** (쌀 40%, 콩류 20%, 과일류 40%)



**Fig. 3.** Contribution of crops for the contamination of pork as a function of duration of the action at a slaughter time of pigs; the time of deposition is August 15; the starting time of the action is October 1; the slaughter time of pigs is 120th day after the start of the action.

모두 반감기가 길어 공급기간에 따른 농작물내 평균 방사성물질의 농도는 거의 일정한 값을 보여준다. 반면  $^{131}\text{I}$ 은 잎의 흡수율은 상대적으로 높지만 ( $8.5 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$  [3]) 반감기가 짧아 침적시점과 수확까지 시간간격으로 다른 핵종에 비해 농작물내 평균 방사성물질의 농도는 낮을 뿐 아니라 공급기간에 따른 농작물내 평균 방사성물질의 농도도 뚜렷이 감소하는 것을 보여준다. 방사성물질의 농도는 모든 핵종에 대해 콩류, 쌀, 과일류의 순으로 높으며, 이러한 차이는 농작물의 성장특성 및 신진대사 등에 기인한다.

그림 3은 오염 농작물을 일정한 분율로 주어진 기간동안 사료로 공급된 후 돼지의 도살시점에서 육류내  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{131}\text{I}$ 의 농도에 대한 각 농작물의 기여를 보여준다 (육류내  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도는 오염정도만 차이가 날 뿐  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{131}\text{I}$ 의 경우와 경향이 유사함). 사료로서 오염 농작물의 공급기간이 길어짐에 따라 비오염 사료 공급기간이 짧아 도살시점에서 육류내 방사성물질의 농도는 계속적으로 증가한다는 것을 보여준다. Case I에 대해 육류의 오염은 두 핵종 모두 공급량이 많은 쌀에 의한 오염이 지배적이었다. Case II는 두 핵종 모두 콩류에 의한 육류의 오염이 가장 높았는데, 이는 그림 2에 나타낸 바와 같이 콩류의 오염이 다른 농작물에 비해 상대적으로 높기 때문이다. Case III에서는 콩류가 쌀의 공급량에 비해 50%에 불과하지만 콩류의 농도가 상대적으로 높아서 두 핵종 모두 쌀과 콩류의 육류 오염에 대한 기여는 비슷하였다. 비록 과일류는 비교적 공급량은 많으나 과일류에 대한 핵종의 오염이 다른 농작물에 비해 낮아 육류에 대한 오염 기여는 여전히 가장 낮게 나타났다. 육류의 오염은 콩류의 공급이 상대적으로 많은 Case II의 경우에 가장 높았다.

표 1은 본 연구에서 고려한 침적핵종에 대하여 사료로서 오염 농작물의 이용 (Action I)에 대한 농작물의 공급분율과 공급기간별 도살시점에서의 육류 소비에 대한 순이익을 보여준다. Action I에서 (+)의 순이익 값은 오염 음식물의 사료로 이용이 정당화됨을 나타내며, (-) 값은 정당화되지 않는다는 것을 나타낸다. 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 상대적 비용 효과를 고찰하기 위해 오염 농작물을 그대로 폐기시켰을 경우 (Action II)에 대한 순이익을 함께 제시하였다. Action II에서 (+)의 순이익 값은 오염 농작물의 폐기가 정당화됨을 나타내며, (-) 값은 정당화되지 않는다

즉 오염 농작물의 소비가 비용 측면에서 이득이라는 것을 나타낸다.  $^{137}\text{Cs}$  침적의 경우 오염 농작물의 3가지 공급분율에 대해 사람이 소비하지 않고 바로 폐기시키는 것이 이득을 가져다주며, 이를 사료로 이용하는 것도 효과적이지 못하였다. 이 경우 오염 농작물의 폐기가 가장 효과적이라는 사실을 나타낸다.  $^{90}\text{Sr}$  침적의 경우에 사료로서 오염 농작물의 공급은  $^{137}\text{Cs}$  침적의 경우보다 효과적인데, 이는  $^{137}\text{Cs}$ 에 비해  $^{90}\text{Sr}$ 의 육류내 생물학적 반감기 ( $^{90}\text{Sr} : T_{1/2,b} = 70\text{일}$ ,  $^{137}\text{Cs} : T_{1/2,b} = 35\text{일}$ )는 길지만 사료에서 육류로의 핵종전이계수는 훨씬 낮기 때문이다 ( $^{90}\text{Sr} : T_f = 2 \times 10^{-3} \text{ d kg}^{-1}$ ,  $^{137}\text{Cs} : T_f = 4 \times 10^{-1} \text{ d kg}^{-1}$ ).  $^{90}\text{Sr}$  침적에 대해 Case I과 Case II의 경우, 사람이 소비하지 않고 폐기시키는 것이 정당화되나 폐기될 오염 농작물을 적절한 기간동안 사료로 이용하면 효과를 볼 수 있다는 것을 보여준다. Case III의 경우는 과일류의 상대적 높은 가격으로 폐기는 정당화되지 못하였다. 그러나 사람은 오염 농작물의 소비에 대한 막연한 심리적 불안감을 가질 수 있으므로 사람이 직접 소비하지 않고 사료로 이용하면 경제적 측면에서 효과적인 방안의 하나가 될 수 있다는 사실을 보여준다. Case I에 대한 오염 농작물의 최적 공급기간은 약 50일, 정당화될 수 있는 기간은 약 90일로 나타났다. 즉 오염 농작물을 50일동안 사료로 공급하고 나머지 70일동안은 오염되지 않은 사료로 공급하여 도살하는 것이 비용측면에서 최대의 효과를 갖는다는 것을 의미한다. Case II과 Case III의 경우는 사료로서 오염 농작물의 최적 공급기간은 각각 약 20일과 50일, 정당화될 수 있는 기간은 각각 약 50일과 80일로 나타났다. 이러한 오염 농작물의 공급분율에 따른 최적기간의 차이는 주로 농작물내 방사성물질의 농도에 기인하며, 최적기간이 길다는 것은 대응행위를 위한 시간적 여유가 많다는 것을 의미한다.  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2,b} = 100 \text{ d}$ ,  $T_f = 3 \times 10^{-3} \text{ d kg}^{-1}$ ) 침적의 경우는 짧은 물리적 반감기로 폐기시키는 것은 비용측면에서 손실인 것으로 나타났다.  $^{90}\text{Sr}$  침적의 Case III와 마찬가지로 사람은 오염 농작물의 소비에 대한 막연한 심리적 불안감을 가질 수 있으므로 사료로 이용하면 효과적인 한 방안이 될 수 있다는 사실을 보여준다. 이와 같이 핵종간 순이익의 차이는 사료에서 육류로의 전이계수, 핵종의 생물학적 반감기 및 물리적 반감기 등에 기인한다.

Table 1. Net benefit from the actions (\$).

Duration of the action	Type of action	Case I		Case II		Case III	
		Action I	Action II	Action I	Action II	Action I	Action II
<sup>137</sup> Cs	20	-1,210	243	-1,590	343	-1,250	235
	30	-2,080	344	-2,730	493	-2,170	312
	40	-3,140	445	-4,120	643	-3,300	388
	50	-4,440	545	-5,810	794	-4,680	464
	60	-6,030	646	-7,880	944	-6,360	540
	70	-7,960	746	-10,400	1,090	-8,410	615
	80	-10,300	847	-13,500	1,240	-10,900	691
	90	-13,200	947	-17,200	1,390	-14,000	767
	100	-16,700	1,050	-21,800	1,540	-17,700	842
<sup>90</sup> Sr	20	4.58	29.1	2.30	66.0	4.52	4.75
	30	5.95	25.4	2.22	80.7	5.46	-29.6
	40	6.78	21.6	1.48	95.3	5.99	-63.9
	50	7.06	17.8	0.11	110	6.01	-98.2
	60	6.65	14.0	-2.14	124	5.18	-133
	70	5.72	10.0	-5.20	139	3.94	-167
	80	3.89	6.20	-9.22	153	1.63	-202
	90	1.37	2.26	-14.4	167	-1.30	-236
	100	-2.02	-1.88	-20.6	182	-5.41	-271
<sup>131</sup> I	20	12.2	-122	12.2	-129	12.2	-158
	30	18.4	-202	18.4	-213	18.4	-274
	40	24.5	-283	24.5	-299	24.5	-390
	50	30.6	-364	30.6	-384	30.6	-506
	60	36.7	-445	36.7	-470	36.7	-622
	70	42.8	-526	42.8	-556	42.8	-739
	80	49.0	-607	49.0	-641	49.0	-855
	90	55.1	-688	55.1	-727	55.1	-971
	100	61.2	-769	61.2	-813	61.2	-1,090

Action I : use of contaminated crops as feedstuffs of pigs

Action II : disposal the contaminated crops

Case I : 70% rice, 10% legumes, 20% fruits

Case II : 40% rice, 40% legumes, 20% fruits

Case III : 40% rice, 20% legumes, 40% fruits

 : optimal duration

### 결론

가축의 사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 최적기간 결정 방법론을 비용-편익 분석법에 근거하여 모델링하였으며, 많은 농작물의 왕성한 성장시기인 8월 15일을 방사성물질의 침적시점으로 가정하여 잡식성 가축인 돼지에 대해 이를 적용하였다. 또한 오염 농작물을 바로 폐기시켰을 경우와 상대적 비용 효과를 비교하므로써 이를 사료로 이용함에 대한 대응방안을 고찰하였다.

사료로서 오염 농작물의 이용에 대한 순이익은 핵종, 농작물의 공급분율, 공급기간 등에 따라 다양하게 나타났다. 이러한 사료로서 오염 농작물의 이용은 <sup>137</sup>Cs 침적에 비해 <sup>90</sup>Sr 또는 <sup>131</sup>I 침적의 경우에 비용측면에서 보다 효과적이었다.

본 연구는 모델예측에 의한 결과로서 실제 원자력 사고의 경우 신뢰성있는 대응행위 결정을 지원하기 위해서는 환경내 방사성물질의 농도 측정치와 상호 보완되어야 할 필요가 있다. 본 연구에서 모델링된 방법론은 원자력시설 사고시 오염 음식

물에 대해 신속하고 적절한 대응행위의 결정지원을 위한 도구로 이용될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. International Atomic Energy Agency, *Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency*, IAEA Safety Series No. 109(1994).
2. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60(1991).
3. 한문희 외, 실시간 방사선피폭해석시스템 구성 연구, Korea Atomic Research Institute Report, KAERI/RR-1737/96(1997).
4. 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).
5. 이정호 외, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부 피폭선량평가 코드개발, Korea Atomic Research Institute Report, KAERI/RR-998/90(1991).
6. 통계청, 1996년 한국통계연보(1997).
7. G. Pröhl, W. Friedland and H. Müller, "Potential Reduction of the Ingestion Dose After Nuclear Accidents Due to the Application of Selected Countermeasures", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 50, Nos 2-4, pp 359-366(1993).
8. International Atomic Energy Agency, *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, IAEA Safety Series No. 115(1994).