

원자력 비상시 가축사료로 이용을 위한 사료내 방사성 핵종농도 결정

Determination of Radionuclide Concentrations in Animal Feedstuffs for Use Following a Nuclear Emergency

황원태, 서경석, 김은한, 최영길, 한문희, 최용호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

비용-편익 분석법에 근거하여 동물성 식품에 대한 최적 유도개입준위를 평가하였으며, 이 결과로부터 가축사료로 이용을 위한 사료내 방사성 핵종농도를 도출하였다. 가축사료로 이용을 위한 사료내 방사성물질의 농도는 식품, 핵종, 가축으로의 공급기간 등에 따라 뚜렷이 다르게 나타났다. 장반감기 핵종 (^{137}Cs , ^{90}Sr)의 경우 사료 공급기간의 증가에 따라 가축의 체내 방사성물질의 축적으로 보다 낮은 농도를 갖는 사료를 공급하여야 하나, 단반감기 핵종 (^{131}I)의 경우에는 방사능붕괴 등으로 보다 높은 농도를 갖는 사료 공급이 가능하였다. 가축으로 공급을 위한 사료내 ^{137}Cs 농도는 ^{90}Sr 농도보다 낮았는데, 이는 주로 ^{137}Cs 의 보다 높은 사료-식품 전이계수에 기인한다.

Abstract

The optimized derived intervention levels for animal products were evaluated based on cost-benefit analysis. From these results, the radionuclide concentrations in animal feedstuffs for use were derived. It was shown that radionuclide concentrations in animal feedstuffs for use depend strongly on animal products, radionuclides and feeding period. In case of the contaminated feedstuffs with long-lived radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr), the feedstuffs with lower contamination should be supplied to animals with increase of feeding period due to the accumulation of radionuclides in animal products. While, in case of the contaminated feedstuffs with short-lived radionuclides (^{131}I), the feeding of higher contaminated feedstuffs was possible with increase of feeding period due to radionuclide decay. It was shown that ^{137}Cs concentration was lower than ^{90}Sr concentration in animal feedstuffs for use. It is primarily due to the higher feed-animal

products transfer factor of ^{137}Cs .

1. 서 론

원자력시설의 비상시 환경으로 방출된 방사성물질에 의한 오염 식품의 섭취는 인체에 중요한 영향을 끼치는 피폭경로이다. 이러한 사실은 1986년 체르노빌 원전 사고 분석 결과로부터 명백히 입증되었으며, 주변국가 특히 동유럽지역 주민의 경우 오염 식품섭취에 의한 피폭영향은 인체에 방사능 위해를 주는 여러 피폭경로중 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 오염 식품에 대한 적절한 대응 및 관리는 피폭영향뿐 아니라 경제적, 사회적 피해를 등을 최소화하는데 매우 중요하다.

오염 식품에 대한 대응행위를 수행하기 위해서는 무엇보다 먼저 식품내 방사성물질의 농도를 측정 또는 예측하여야 한다. 가축의 사료를 공급하여 생산되는 동물성 식품의 경우 생산된 제품을 직접 측정하여 대응행위를 수행하는 것은 사료내 방사성물질의 농도를 통해 최종적으로 제품의 생산시점에서의 농도를 예측하여 대응방안을 강구하는 것보다 경제성을 포함한 여러 측면에서 효과적이지 못하다. 현재 유럽을 중심으로 세계 여러 각국에서는 가축으로 공급이 가능한 사료내 방사성물질의 농도 준위에 대한 연구가 활발히 진행중에 있으나[1], 불행히도 우리나라의 경우 아직까지 이들에 대한 연구가 전무한 실정이다.

본 연구에서 국제방사선방호위원회의 방사선방호에 대한 최근 권고 (ICRP-60[2])에 근거하여 동물성 식품에 대한 최적 개입준위를 산정하였으며, 이들로부터 가축으로 공급을 위한 사료내 방사성물질의 농도준위를 도출하였다.

2. 식품에 대한 최적 유도개입준위

최근의 국제방사선방호위원회의 방호체제 (ICRP-60)에서는 원자력 비상시 ① 행위의 정당화 (justification of action), ② 방호의 최적화 (optimization of protection) 원칙에 근거하여 대응행위를 수행하도록 권고하고 있다[2]. 이러한 원칙을 이행하기 위한 의사결정 보조수단으로 다양한 방법이 ICRP 출판물 (ICRP-55[3])에 제시되어 있으며, 그 중에서 비용-편익 분석법 (cost-benefit analysis)은 경제적 논리에 입각하여 가장 잘 확립되어 있어 현재 가장 널리 이용되는 방법이다. 특히, 이 분석법은 사고후 급박한 대응행위가 요구되어 경제적 논리보다 심리적 요인이 보다 강하게 작용하는 단기 대응행위 (예로 대피, 소개 등)보다 장기 대응행위 (예로 오염 식품섭취 금지, 이주 등) 의사결정 보조수단으로 보다 더 널리 이용된다. 이 분석법의 기본적 원리는 대응행위를 수행함에 따른 순이익 즉, 대응행위 수행함에 따라 피할 수 있는 피폭선량의 금전가와 수행에 따른 금전 비용의 차이가 최대가 되도록 행위의 방법, 형태, 시간 등이 결정되어야 한다는 것이다. 비용-편익 분석법에 근거한 식품에 대한 최적 개입준위 (IL , Bq/kg)는 다음 식으로 유도된다[4].

$$IL = \frac{b}{\alpha \cdot DCF} \quad (1)$$

여기서,

α : 피폭선량의 금전가 (원/man-Sv)

b : 식품의 소비자 가격 (원/kg)

DCF : 음식물 섭취에 의한 유효선량에 대한 선량환산인자 (Sv/Bq)

본 연구에서 식품에 대한 사회환경 특성은 2000년도 자료에 근거하며, 동물성 식품의 국내 소비자 가격을 표 1에 나타냈다[5]. α 값은 인적자본 접근법 (human capital approach)에 근거하여 9,600,000원/man-Sv ($\approx 8,000$ US \$/man-Sv)를 적용하였다. ICRP의 신권고 (ICRP-60)에 근거한 유효선량에 대한 선량환산인자 값을 적용하였다[6]. 보수적 평가를 위해 우유의 경우 1세 미만의 유아에 대한 선량환산인자 값을, 기타 식품의 경우 유아를 제외한 연령군에 대한 선량환산인자 값 중 가장 큰 값을 적용하였다. 이들 자료를 이용하여 평가된 식품에 대한 최적 개입준위를 표 3에 나타냈다.

3. 사료내 방사성 핵종농도 결정

오염 사료의 공급은 동물성 식품을 오염시키며, 최종적으로 이를 사람이 소비함으로써 인체에 대한 방사능 위험을 주게 된다. 오염 사료의 연속적 공급에 따른 시간 t 에서 동물성 식품내 방사성물질의 농도 (C_{anim} , Bq/kg)는 다음 식으로 평가될 수 있다.

$$C_{anim}(t) = C_{anim}(t-\Delta t) e^{-(\lambda_b + \lambda_d) \Delta t} + T_f F_v C_{feed}(t) \quad (2)$$

$$C_{feed}(t) = C_{feed}(t=0) e^{-\lambda_d t} \quad (3)$$

여기서,

λ_b : 식품에 대한 생물학적 반감기 (1/d)

λ_d : 핵종의 물리적 반감기 (1/d)

T_f : 사료-식품 전이계수 (d/kg)

F_v : 가축의 사료섭취율 (dry-kg/d)

$C_{feed}(t)$: 시간 t 에서 사료내 방사성물질의 농도 (Bq/dry-kg)

식 (2)에서 오른쪽의 첫 번째 항은 시간 t 이전까지 사료 섭취에 의한 식품 오염을, 두 번째 항은 시간 t 에서 사료 섭취에 의한 식품 오염을 나타낸다. 국내 가축에 대한 특성자료를 표 1에 나타냈다[5,7]. 그림 1은 오염 사료의 공급 시작시점 ($t=0$) 농도가 1 Bq/dry-kg인 사료를 연속적으로 가축에 공급하였을 경우 시간에 따른 동물성 식품내 방사성물질의 농도 변화를 보여준다. 핵종과 사료 공급기간에 따라 식품내 농도는 뚜렷한 차이를 보여주며, 이는 주로 가축의 사육특성과 체내 신진대사 등에 기인한다.

식품에 대한 최적 개입준위로부터 가축으로 공급을 위한 사료내 방사성물질의 농도 (C_{feed}^* Bq/dry-kg-feed)는 다음과 같다.

$$C_{feed}^* = \frac{II}{C_u} \quad (4)$$

여기서,

C_u : 사료내 농도에 대한 동물성 식품내 농도 ((Bq/kg)/(Bq/dry-kg-feed))

그림 2는 공급기간에 따라 가축사료로써 이용을 위한 사료내 핵종의 농도를 보여준다. 단, 우유는 연속적으로 생산되므로 가축사료로써 이용을 위한 사료내 핵종의 농도는 공급기간과 무관하게 공급후 최대치를 나타내는 시점에서의 방사성물질 농도를 적용하여 유도하였다. 장반감기 핵종 (^{137}Cs , ^{90}Sr)의 경우 공급기간의 증가에 따라 가축의 체내 방사성물질의 축적으로 보다 낮은 농도를 갖는 사료를 공급하여야 하나, 단반감기 핵종 (^{131}I)의 경우에는 방사능붕괴 등으로 보다 높은 농도를 갖는 사료 공급이 가능하다는 사실을 알 수 있다. 가축사료로 이용을 위한 사료내 ^{137}Cs 농도는 ^{90}Sr 농도보다 낮으며, 이는 주로 보다 높은 ^{137}Cs 의 사료-식품 전이계수 때문이다. 전반적으로 육류의 경우 사료내 농도가 높은 것으로 나타났으며, 이는 주로 단가가 상대적으로 비싼 육류에 대해 설정된 최적 개입준위가 높기 때문이다. 이 그림에서 만일 오염사료를 공급후 20일째 식용을 위해 한우를 도살할 경우, 가축사료로 이용하기 위한 사료내 ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I 의 농도는 각각 38 kBq/kg-feed, 870 kBq/kg-feed, 1140 kBq/kg-feed라는 사실을 나타낸다.

이러한 결과는 동물성 식품의 오염은 전적으로 오염 사료 섭취에 기인한다는 가정하에 평가한 것이며, 오염 토양과 물의 섭취에 의한 영향을 고려할 경우 가축으로 공급을 위한 사료내 핵종의 농도는 보다 낮은 값을 나타낼 것이다.

4. 결 론

비용-편익 분석법에 근거하여 동물성 식품에 대한 최적 유도개입준위를 평가하였으며, 이 결과로부터 가축사료로 이용을 위한 사료내 방사성 핵종농도를 도출하였다. 가축사료로 이용을 위한 사료내 방사성물질의 농도는 식품, 핵종, 공급기간 등에 따라 뚜렷이 다르게 나타났다. 장반감기 핵종의 경우 공급기간의 증가에 따라 가축의 체내 방사성물질의 축적으로 보다 낮은 농도를 갖는 사료를 공급하여야 하나, 단반감기 핵종의 경우에는 방사능붕괴 등으로 보다 높은 농도를 갖는 사료 공급이 가능하다는 사실을 알 수 있다. 주로 사료-식품 전이계수의 차이로 가축사료로 이용을 위한 사료내 ^{137}Cs 농도는 ^{90}Sr 농도보다 낮았다.

가축으로 공급되는 사료의 종류는 다양하며, 각 사료의 종류에 대한 공급량은 계절에 따라 차이를 나타낸다. 또한 각 사료의 종류에 대한 오염도는 사고시점에 따라 큰 차이를 나타낸다. 따라서 본 연구에서 언급한 포괄적 의미의 사료에 대한 핵종농도보다는 각 사료의

종류에 따른 침적시점별 사료내 핵종농도 값을 결정하는 일은 사고로 인한 경제적, 사회적 피해 최소화를 위해 보다 효과적인 대응 수단이 될 수 있을 것이다. 본 연구의 결과는 경제적 피해를 최소화하기 위한 측면에서 평가한 결과이며, 오염 사료이용에 대한 최종 결정 시에는 사회적, 심리적 측면 등을 포함하는 포괄적 영향을 고려하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] R. F. M Woodman and A. F. Nisbet, "Derivation of Working Levels for Radionuclides in Animal Feedstuffs for Use Following a Nuclear Accident", Health Physics, 77(4), 383-391 (1999).
- [2] ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60 (1991).
- [3] ICRP, "Optimization and Decision-Making in Radiological Protection", ICRP Publication 55 (1989).
- [4] IAEA, "Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency", IAEA Safety Series No. 109 (1994).
- [5] 통계청, "한국통계연보" (2000).
- [6] IAEA, "International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources", IAEA Safety Series No. 115 (1994).
- [7] 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).

표 1. 가축의 특성자료

식품 항목		우유	육류	돼지고기	가금류
		생물학적 반감기 (d)	^{137}Cs	2	50
	^{90}Sr	3.5	70	70	11
	^{131}I	0.7	100	100	100
사료-식품 전이계수 (d/kg)	^{137}Cs	3.0×10^{-3}	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-1}	4.5
	^{90}Sr	2.0×10^{-3}	3.0×10^{-4}	2.0×10^{-3}	4.0×10^{-2}
	^{131}I	3.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	1.0×10^{-1}
사료섭취율 (d/dry-kg)		16.1	7.2	2.4	0.07
식품의 소비자 가격 (원/kg)		1700	26000	8700	3000

(주) 육류의 대표성 식품은 쇠고기 (한우), 가금류는 닭고기임.

표 2. 본 연구에서 적용된 음식물 섭취에 의한 선량환산인자 (Sv/Bq)

식품		우유	기타 식품
핵종	^{137}Cs	2.1×10^{-8}	1.4×10^{-8}
	^{90}Sr	2.3×10^{-7}	7.9×10^{-8}
	^{131}I	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}

(주) 우유의 경우 1세 미만의 유아에 대한 값, 기타 식품의 경우 유아를 제외한 연령군에 대한 선량환산인자 중 가장 큰 값

표 3. 식품에 대한 최적 개입준위 (Bq/kg)

식품		우유	육류	돼지고기	가금류
핵종	^{137}Cs	8400	190000	65000	22000
	^{90}Sr	770	34000	12000	4000
	^{131}I	980	27000	9000	3100

(주) 육류의 대표성 식품은 쇠고기 (한우), 가금류는 닭고기임.

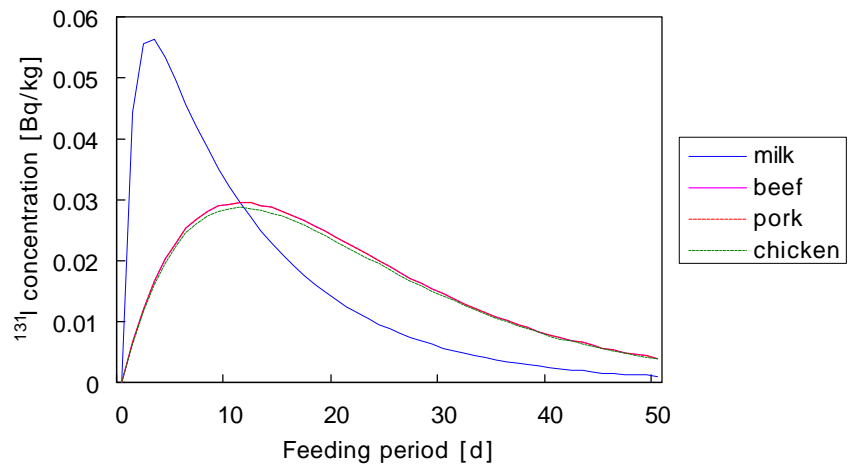
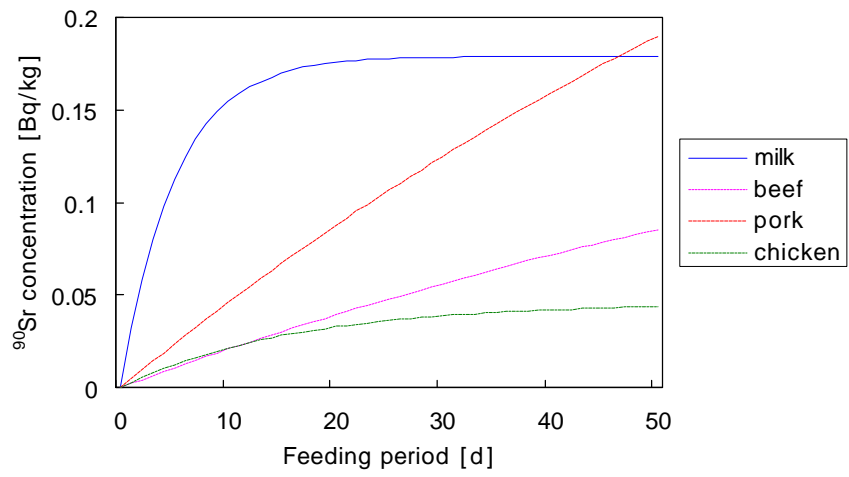
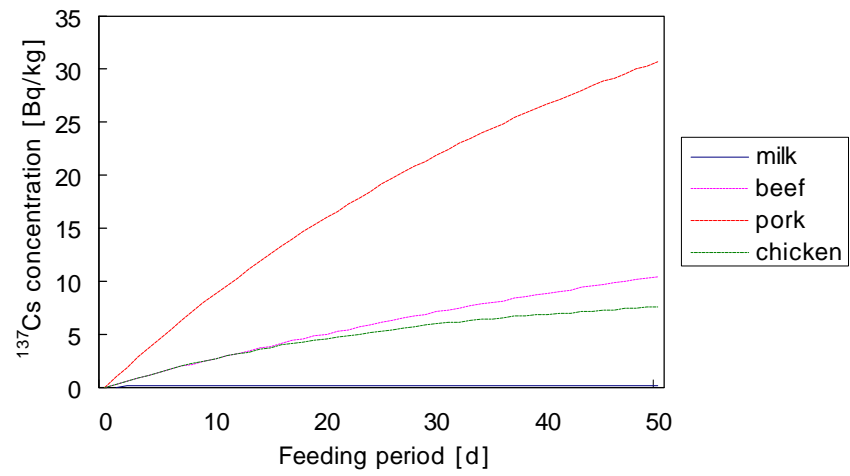


그림 1. 사료 공급기간에 따른 육류성 식품내 핵종농도 변화
(사료내 핵종의 초기 농도 : 1 Bq/dry-kg)

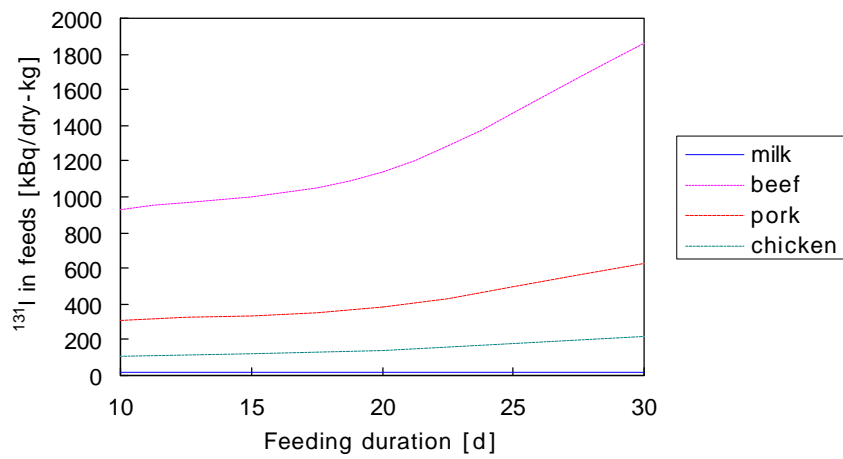
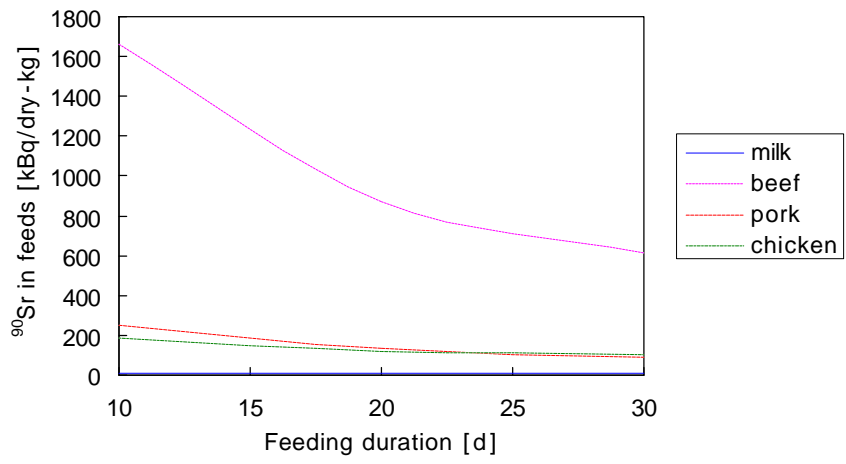
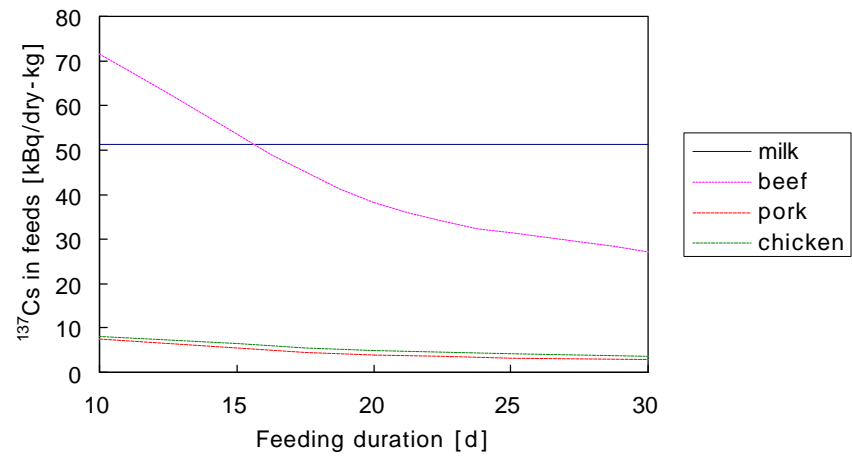


그림 2. 가축사료로서 이용을 위한 사료내 핵종농도