

A Methodology for Justification and Optimization of Countermeasures for Milk After a Nuclear Accident and Its Application

Won-Tae Hwang, Moon-Hee Han, Eun-Han Kim and Gyuseong Cho*

Korea Atomic Energy Research Institute

*Korea Advanced Institute of Science and Technology

원자력 사고후 우유에 대한 비상대응의 정당화/최적화를 위한 방법론 및 적용연구

황원태 · 한문희 · 김은한 · 조규성*

한국원자력연구소, *한국과학기술원

(1998년 11월 18일 접수, 1999년 1월 14일 채택)

Abstract - The methodology for justification and optimization of the countermeasures related with contamination management of milk was designed based on the cost and benefit analysis. The application results were discussed for the deposition on August 15, when pasture is fully developed in Korean agricultural conditions. A dynamic food chain model DYNACON was used to estimate the time-dependent radioactivity of milk after the deposition. The considered countermeasures are (1) the ban of milk consumption (2) the substitution of clean fodder, which are effective in reducing the ingestion dose as well as simple and easy to carry out in the first year after the deposition. The total costs of the countermeasures were quantitatively estimated in terms of cost equivalent of doses and monetary costs. It is obvious that a fast reaction after the deposition is an important factor in cost effectiveness of the countermeasures. In most cases, the substitution of clean fodder was more effective countermeasure than the ban of consumption. A fast reaction after the deposition made longer justifiable/optimal duration of the countermeasure.

Key Words : nuclear accident, deposition date, dynamic food chain model, countermeasures, justification, optimization

요약 - 원자력 사고후 우유에 대한 비상대응방법론을 비용/편익 분석법에 근거하여 고안하였다. 목초의 왕성한 성장시기인 8월 15일을 방사성물질의 침적시점(사고시점)으로 가정하여 지표위 방사성물질의 농도, 침적후 대응행위의 시작시점과 수행기간의 함수로써 적용결과를 논의하였다. 침적후 우유내 방사성물질의 농도는 동적섭식경로모델 DYNACON으로부터 예측되었다. 대응행위로는 침적후 첫해에 피폭을 효과적으로 줄일 수 있고 수행하기 용이한 섭취금지 및 비오염 사료대체가 고려되었다. 대응행위 수행에 따른 총비용은 피폭부담과 금전비용의 합으로 평가하였다. 침적후 신속한 대응은 소요되는 금전비용에 대한 피폭저감 측면에서 중요한 변수였다. 많은 경우 비오염 사료대체는 섭취금지보다 비용측면에서 효과적인 대응행위였다. 대응행위를 빨리 취할수록 대응행위의 정당화 및 최적기간은 증가하였다.

중심어 : 원자력사고, 침적시점, 동적섭식경로모델, 대응행위, 정당화, 최적화

서론

원자력 사고시 환경으로 방출된 방사성물질은 광범위하게 농작물을 오염시킴으로써 오염된 음식물 섭취에 의한 인체의 방사능 위해 뿐 아니라 막대

한 경제적, 사회적 피해를 주게 된다. 따라서 주민에 대한 피해를 줄이기 위해서는 적절한 대응조치가 요구되는데 국제원자력기구 (IAEA), 국제방사선방호위원회 (ICRP)와 같은 국제기관에서는 방사선 방호의 기본원칙인 개입의 정당화와 방호의 최

적화에 입각하여 체계적인 방법을 사용하여 사고에 대비하도록 권고하고 있다[1,2]. 방사성물질에 의한 음식물의 오염준위는 방호계획을 수립할 때 요구되는 필수정보로 직접 시료를 분석하거나 환경내 핵종이동 모델을 통해 알 수 있다. 우유와 같이 연속적으로 생산되는 음식물의 경우 모델에 측에 의한 방법은 신속한 대응행위의 결정 뿐 아니라 장기 대책수립에 있어 보다 효과적이다. 사고시와 같이 단기간에 다량의 방사성물질이 농경지에 침적되는 경우 침적시점에 따른 농업 및 환경조건의 영향으로 환경내 방사성물질의 농도는 침적후 시간에 따라 매우 다양한 변화를 나타낸다. 따라서 환경내 방사성물질의 농도가 항상 일정하다고 가정하는 평형모델 (equilibrium model)로는 사고시 적절하게 대처할 수 없기 때문에 침적시점과 침적후 시간에 따른 방사성물질의 농도의 변화를 해석할 수 있는 동적모델 (dynamic model)이 요구된다. 우리나라의 농업 및 환경특성을 고려한 동적모델 DYNACON[3]이 한국원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석시스템 (FADAS : Following Accident Dose Assessment System)[4]에서 고려되는 여러 피폭경로중 음식물 섭취에 의한 내부피폭을 평가하기 위한 모듈로서 개발된 바 있다.

본 연구에서는 DYNACON과 연계하여 비용/편익 분석법 (cost and benefit analysis)에 근거하여 방사성물질의 목초 침적시 오염된 우유에 대한 비상대응방법론을 고안하였고 실제 적용결과를 논의하였다. 대응행위로는 침적후 첫해에 피폭을 효과적으로 줄일 수 있으면서 수행하기 용이한 섭취금지 및 비오염 사료대체를 고려하였다. 대응행위에 따른 총비용은 피폭부담과 금전비용만을 고려하여 평가하였으며, 최종 대응행위 결정에서 중요하게 고려해야 하는 정치·사회적 요소는 고려하지 않았다.

재료 및 방법

우유내 방사성물질의 농도

DYNACON은 환경구성요소를 구간 (compartment)으로 나누고 구간간의 핵종이동을 해석하는 구간모델로 구간 i 에서의 방사성물질의 농도 A_i ($Bq\ kg^{-1}$ 또는 $Bq\ m^{-2}$)는 구간 i 로 방사성물질의 유입율과 유출율의 차이로써 표현된다.

$$\frac{dA_i}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^K \lambda_{ji} A_j - A_i \sum_{j=1, j \neq i}^K \lambda_{ij}$$

(1)
여기서,
 λ_{ij} = 구간 i 에서 구간 j 로의 핵종이동율 (d^{-1}),
 K = 구간수.

입력자료는 침적시점과 지표위 방사성물질의 농도 ($Bq\ m^{-2}$)이며, 구간에 대한 방사성물질의 농도 변화는 각 구간에 대한 미분방정식의 수치해로부터 얻을 수 있다. 우유는 방목된 젖소가 오염된 목초와 토양을 섭취함으로써 오염된다. 목초와 토양내 방사성물질의 농도는 방사성물질의 재부유, 기후에 의한 제거, 토양 침침으로의 이동 등 여러 환경적 요인에 의해 시간에 따라 변화한다. 구간에 대해 얻어진 수치해로부터 우유내 방사성물질의 농도 $C(t)$ ($Bq\ l^{-1}$)는 다음과 같이 해석적으로 얻을 수 있다.

$$C(t) = C(t-\Delta t)e^{-(\lambda_b + \lambda_d)\Delta t} + C_1(t) + C_2(t) \quad (2)$$

여기서,
 Δt = 계산시간간격 (d),
 λ_b = 생물학적 배설율 ($= \ln 2 / T_{1/2, b}$, d^{-1}),
 $T_{1/2, b}$ = 생물학적 반감기 (d),
 λ_d = 방사능 붕괴상수 (d^{-1}).

식 (2)의 오른쪽 첫번째 항은 침적시점부터 $t - \Delta t$ 까지 오염된 목초와 토양의 섭취로 인한 우유의 오염 기여분을, 두번째 (C_1)와 세번째 (C_2) 항은 시간 t 에서 각각 오염된 목초와 토양의 섭취로 인한 우유의 오염기여분을 나타낸다. 만일 젖소의 방목을 금지하고 오염된 목초대신 비오염사료로 대체하는 경우 우유내 방사성물질의 농도변화는 C_1 과 C_2 항이 제거된 형태로 나타낼 수 있다.

비상대응방법론

우유의 오염과 그에 따른 방사능 피폭을 줄이기 위해 다양한 대응행위를 고려할 수 있다. 이들 대응행위 중에는 모든 나라와 모든 상황에서 쉽게 적용할 수 있는 것이 있는 반면 일부는 검증과 적용시 기술적 어려움이 따르는 것도 있다. 주어진 기간동안의 섭취금지는 수행하기에 가장 용이하지만 비용측면에선 비효과적인 대응행위이다. 많은 경우에 비오염 사료대체는 섭취금지보다 비용측면에서 보다 효과적이며 또한 섭취금지 만큼이나 수

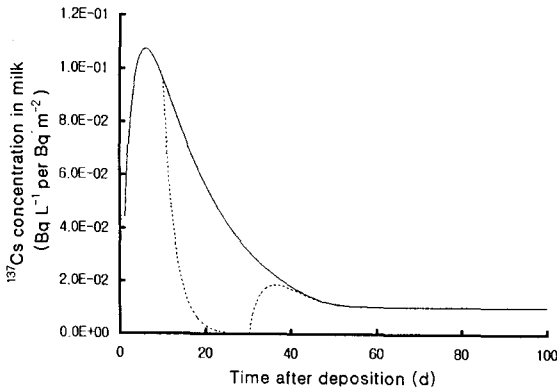


Fig. 1. Variation of ¹³⁷Cs concentration in milk with and without substitution of clean fodder after unit deposition on August 15. The clean fodder is substituted for 20 d with 10 d delay after the deposition (solid line : without substitution, dashed line : with substitution).

행하기 용이한 대응행위이다.

원자력 사고시 비상대응 결정지원을 위해 여러 정량적 기법이 이용될 수 있는데 경제적 이론에 입각하여 잘 확립되어 있고 가장 오랫동안 널리 이용되고 있는 기법은 비용/편익 분석법 [1]으로 대응행위를 수행함에 따른 총비용은 피폭부담과 금전비용으로 표현된다.

본 연구에서는 오염된 우유는 같은 가격의 오염되지 않은 우유로 쉽게 대체될 수 있다고 가정하였다. 침적후 1년동안 한마리의 젖소로부터 생산되는 우유에 근거하여 아래의 3가지 경우에 대해 총비용은 다음과 고안될 수 있다.

(경우 I) 아무런 대응행위를 취하지 않을 경우

$$: \alpha \cdot H \quad (3)$$

(경우 II) 비오염사료 대체의 경우 :

$$\alpha \cdot f \cdot H + V \cdot b_f \cdot \tau \quad (4)$$

(경우 III) 섭취금지의 경우 :

$$\alpha \cdot f \cdot H + P \cdot b \cdot \tau \quad (5)$$

여기서,

H = 아무런 대응행위를 취하지 않을 경우 소비에 따른 누적선량

$$\left(= P \cdot e(50) \cdot \int_0^{1\text{yr}} C(t) dt, \text{ Sv animal}^{-1} \right),$$

α = 단위 선량당 금전가 (\$ Sv⁻¹),

V = 비오염 사료로 대체가능한 젖소의 사료섭취율 (kg (animal · d)⁻¹),

b_f = 비오염 사료의 단가 (\$ kg⁻¹),

b = 우유의 단가 (\$ l⁻¹),

P = 우유의 생산율 (l (animal · d)⁻¹),

f = 잔류 피폭선량의 분율,

τ = 대응행위 수행기간 (d),

$e(50)$ = 예탁실효 선량환산인자 (Sv Bq⁻¹).

비상대응에 따른 잔류 피폭선량의 분율 f 값은 침적시점, 침적후 대응행위 시작시점 및 수행기간 등 다양한 변수의 함수로 아무런 대응행위를 취하지 않았을 때 받게되는 피폭선량에 대한 대응행위를 취하였을 때 잔류 피폭선량의 비로 정의된다. 섭취에 따른 피폭선량은 우유내 방사성물질의 농도에 직접적으로 비례하므로 침적후 시간 t_1 부터 t_2 까지 비상대응을 수행하였을 경우 잔류 피폭선량의 분율은 다음 식으로 평가될 수 있다.

(1) 비오염 사료 대체의 경우 :

$$\frac{\int_0^{t_1} C(t) dt + \int_{t_1}^{1\text{yr}} C^*(t) dt}{\int_0^{1\text{yr}} C(t) dt} \quad (6)$$

(2) 섭취금지의 경우 :

$$\frac{\int_0^{1\text{yr}} C(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} C(t) dt}{\int_0^{1\text{yr}} C(t) dt} \quad (7)$$

여기서,

$C^*(t)$ = 비오염사료 대체시 우유내 방사성물질의 농도 (Bq l⁻¹).

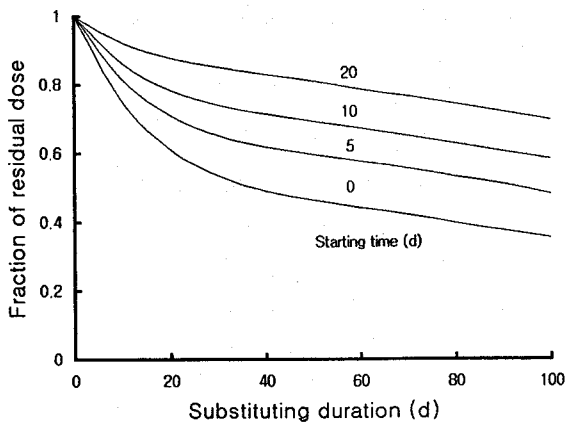
대응행위 및 대응기간에 따른 순이익 ΔB 는 아무런 대응행위를 취하지 않았을 경우 총비용 (G , 경우 I)과 대응행위에 따른 총비용 (S , 경우 II 또는 경우 III)의 차이이며, 대응행위의 정당화 및 최적화 기간은 수학적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

정당화 : $\Delta B(\tau) = G - \Delta S(\tau) > 0 \quad (8)$

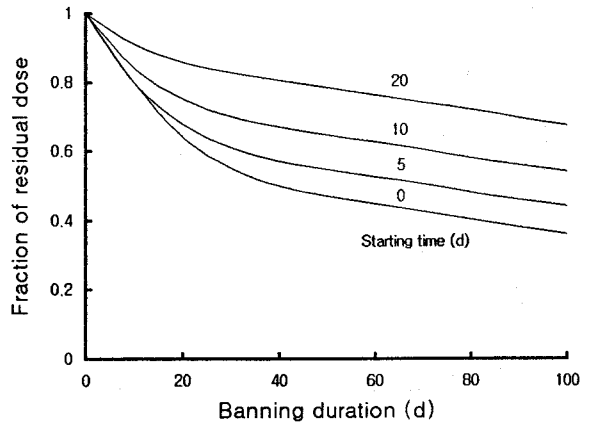
최적화 : $\frac{\Delta B(\tau)}{dt} = 0 \quad (9)$

결과 및 고찰

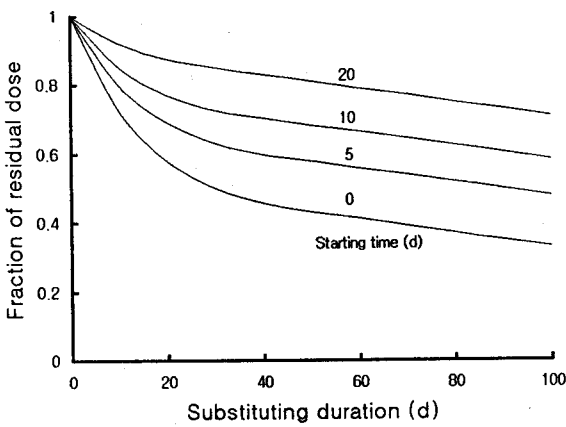
본 연구에서 고안된 우유에 대한 비상대응방법



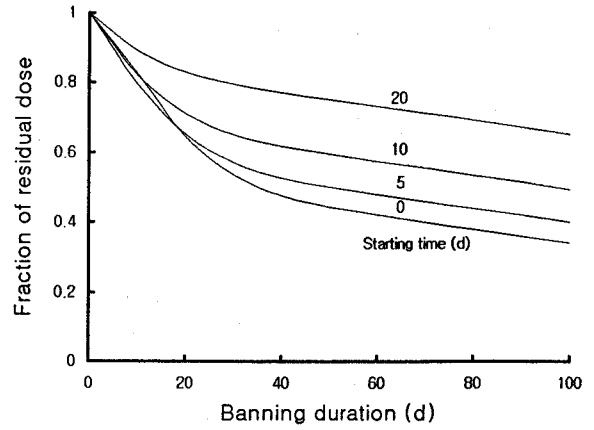
(a.1) Countermeasure : substitution of clean fodder, radionuclide : ^{137}Cs



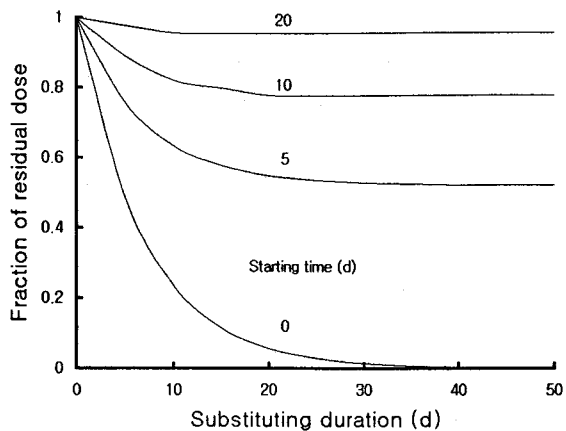
(a.2) Countermeasure : ban of consumption, radionuclide : ^{137}Cs



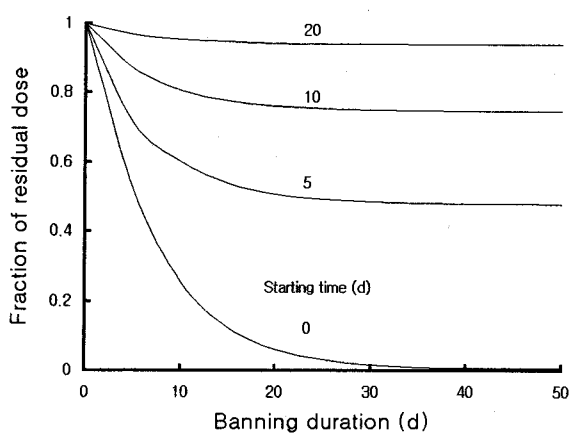
(b.1) Countermeasure : substitution of clean fodder, radionuclide : ^{90}Sr



(b.2) Countermeasure : ban of consumption, radionuclide : ^{90}Sr

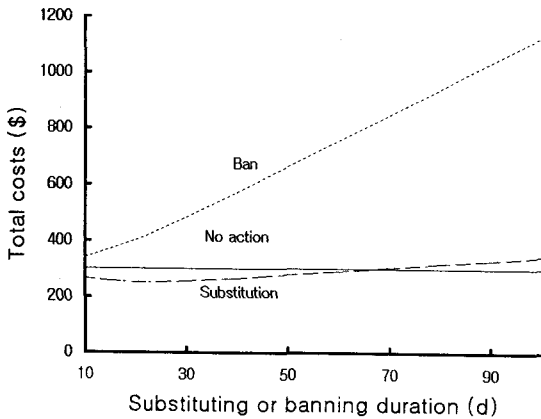


(c.1) Countermeasure : substitution of clean fodder, radionuclide : ^{131}I

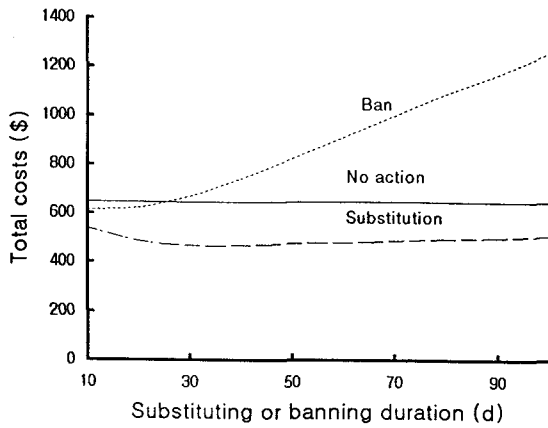


(c.2) Countermeasure : ban of consumption, radionuclide : ^{131}I

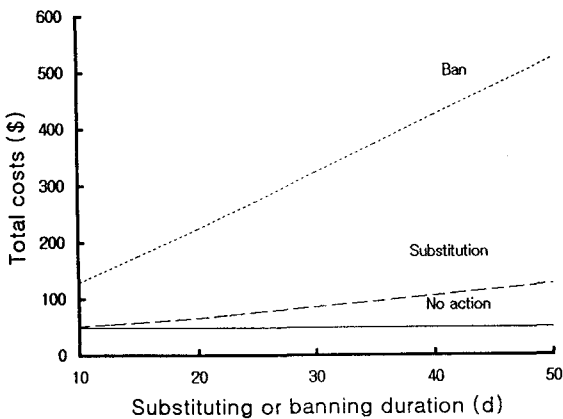
Fig. 2. Fraction of residual dose as a function of the performing duration of the countermeasures and their starting time after the deposition.



(a) Total costs for ¹³⁷Cs deposition



(b) Total costs for ⁹⁰Sr deposition



(c) Total costs for ¹³¹I deposition

Fig. 3. Total costs as a function of the performing duration of the countermeasures (starting time : 5 d, radioactivity on the ground : 50 kBq m⁻²).

론을 목초의 왕성한 성장시기 (성장기간 : 5월 1일 ~ 9월 30일)인 8월 15일 침적에 대해 적용하였다. 원자력발전소 사고시 중요 핵종인 ¹³⁷Cs (T_{1/2}=30년), ⁹⁰Sr (T_{1/2}=29년), ¹³¹I (T_{1/2}=8일)이 고려되었다. 1996년 소비자 물가자료에 근거하여 우유는 1.0 \$ l⁻¹, 사료는 0.2 \$ kg⁻¹으로 가정하였으며, 인적자본접근법 (human capital approach)에 근거하여 α 값은 10,000 \$ (man · Sv)⁻¹을 적용하였다[5]. 한마리의 젖소에 대해 비오염 사료로 대체가능한 사료의 양은 10 kg d⁻¹[6], 우유 생산량은 10 l d⁻¹[1]로 가정하였다. 성인에 대한 선량 환산인자는 ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ¹³¹I에 대해 각각 1.3 x 10⁻⁸, 2.8 x 10⁻⁸, 2.2 x 10⁻⁸ Sv Bq⁻¹을 적용하였다 [7].

그림 1은 ¹³⁷Cs의 단위 침적후 아무런 대응행위를 취하지 않았을 경우와 10일간의 대응행위 지체된 후 비오염 사료로 20일동안 대체하였을 경우 우유내 ¹³⁷Cs의 농도변화를 보여준다. 아무런 대응행위를 취하지 않았을 경우 우유내 방사성물질의 농도는 수일내 최대치에 도달한 후 우유의 짧은 생물학적 반감기 (T_{1/2,b} = 2일 [4])로 비교적 빠르게 감소하는 것을 보여준다. 비오염사료가 대체되었을 경우는 오염된 목초와 토양에 의한 우유오염에 대한 기여가 없으므로 우유내 방사성물질은 급격히 감소하며, 이후 젖소의 재방목으로 우유내 방사성물질의 농도는 약간 증가하는 것을 보여준다.

그림 2는 침적후 대응행위의 지연시간과 수행기간의 함수로써 잔류 피폭선량의 분율을 나타낸다. ¹³⁷Cs 침적의 경우, 40%의 피폭선량을 줄이기 위한 비오염사료 대체기간은 침적후 지연없이 수행하였을 경우는 약 20일이 요구되나 10일의 지연을 가지고 수행되었을 경우에는 약 90일이 요구되었다. 전자는 비용에 대한 피폭저감 측면에서 후자에 비해 약 4.5배 높다는 것을 나타낸다. 피폭선량을 40% 감소시키기 위한 금지기간은 침적후 지연없이 수행되었을때는 약 25일이 요구되나 10일의 지연을 가지고 수행되었을 경우에는 약 70일이 요구되었다. 전자는 비용에 대한 피폭저감 측면에서 후자에 비해 약 2.8배가 높았다. ⁹⁰Sr 침적에 대해서도 비슷한 현상이 발견되었다. 단반감기 핵종 ¹³¹I 침적의 경우, 신속한 대응행위의 효과는 보다 뚜렷하여 침적후 10일의 지연을 가지고 비오염 사료대체 또는 섭취금지를 하였을 경우 피폭선량을 40% 감소시키기는 매우 어려운 반면 지연없이 수행할 경우에는 약 7일 정도면 충분하였다. 결과적으로 모든 핵종에 대해 침적후 신속한 대응은 소요되는 금전비용에 대한 피폭저감 측면에서 매우

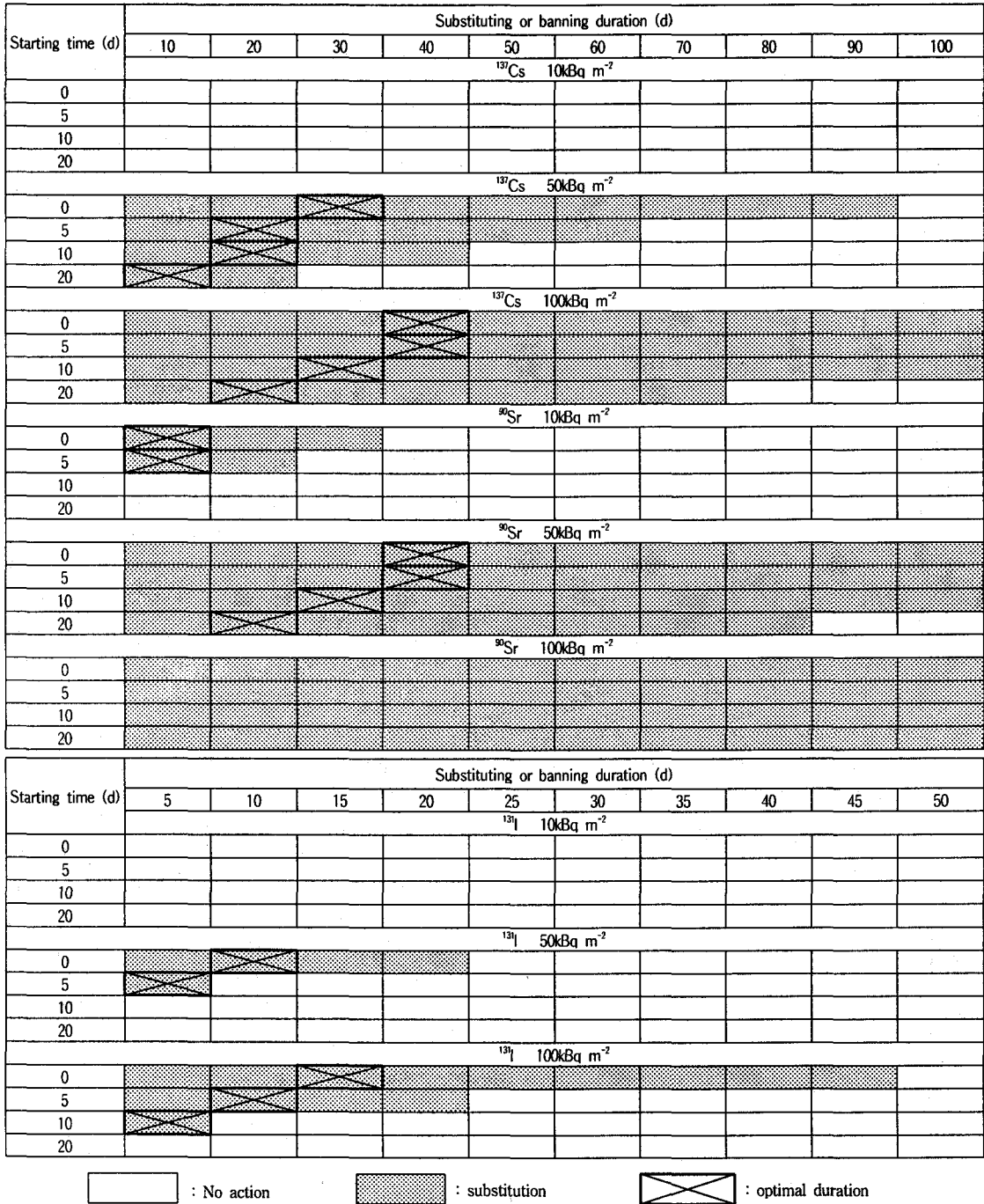


Fig. 4. Justifiable/optimal duration of the countermeasures as a function of radioactivity on the ground and starting time after the deposition.

중요하다는 사실을 알 수 있다. 핵종별 피폭저감 효율의 차이는 핵종의 물리적 반감기 및 생물학적 반감기 등의 차이에 기인한다.

그림 3은 핵종별로 50 kBq m⁻² 침적 후 5일 동안 대응행위가 지연되었을 때 비오염 사료대체와 섭취금지 기간의 함수로써 소요되는 총비용을 보여

준다. ^{137}Cs 침적의 경우, 섭취금지란 아무런 대응 행위를 취하지 않았을 경우보다 많은 비용이 소요 ($\Delta B < 0$)되므로 정당화되지 못하였다. 반면 약 70일간 이내의 비오염 사료대체는 아무런 대응 행위를 취하지 않았을 경우보다 순이득에 있어서 양의 값을 가지므로 정당화될 수 있다는 것을 보여준다. 비오염 사료를 약 20일간 대체하였을 때 총비용은 최소값 (최대의 순이득)을 나타냈으며 그 이상의 대체는 대체함으로써 피할수 있는 피폭 선량의 효과보다 대체되는 사료비용의 증가로 총비용은 서서히 증가하였다. 따라서 비오염 사료대체의 최적기간은 약 20일간이며 이는 대응행위를 끝내야 하는 시점을 나타낸다. ^{90}Sr 침적의 경우도 비오염 사료대체가 효과적 대응행위였으며, 아무런 대응행위를 취하지 않았을 때 누적농도 (^{137}Cs : $232 \text{ kBq } \ell^{-1}$, ^{90}Sr : $231.5 \text{ kBq } \ell^{-1}$)와 대체에 따른 잔여 피폭선량의 분율은 ^{137}Cs 침적의 경우와 비슷하지만 ^{90}Sr 의 상대적으로 높은 선량환산인자로 순이득은 ^{137}Cs 침적에 비해 상대적으로 크다. 따라서 ^{90}Sr 침적의 경우 비오염 사료대체는 ^{137}Cs 침적에 비해 상당히 오랜기간동안 정당화될 수 있으며 비오염 사료대체의 최적기간도 길어 약 40일 간이었다. ^{131}I 침적의 경우는 상대적으로 낮은 누적농도 ($22.5 \text{ kBq } \ell^{-1}$), 대응행위에 따른 빠른 피폭선량의 감소로 두가지 대응행위 모두 비용측면에서 정당화되지 못하였다.

그림 4는 각 핵종에 대해 지표위 농도, 대응행위의 지연시간 및 수행기간의 함수로써 비용측면에서 보다 효과적인 대응행위에 대한 정당화 및 최적기간을 도시하였다. 모든 경우에 대해 비오염 사료대체가 섭취금지보다 효과적이며 대응행위의 정당화 및 최적기간은 대응행위를 빨리 취할수록 증가하였다. 정당화 및 최적기간의 증가는 대응행위에 대한 시간적 여유가 증가한다는 것을 의미한다.

결 론

비용/편익 분석법에 근거한 우유에 대한 비상대응 방법론을 고안하였으며, 가상 사고에 대한 적용결과를 논의하였다. 침적후 신속한 대응은 소요되는 금전비용에 대한 피폭저감 측면에서 중요하였다. 대부분의 경우 비오염 사료대체는 섭취금지보다 비용측면에서 효과적인 대응행위였으며, 대

응행위를 빨리 취할수록 대응행위의 정당화 및 최적기간은 증가하였다.

본 연구는 모델예측에 의한 결과이다. 따라서 실제 원자력시설 사고의 경우 신뢰성있는 대응행위 결정을 지원하기 위해서는 환경내 방사성물질의 농도 측정치와 상호 보완되어야 할 필요가 있다. 본 연구에서 제안된 방법론은 원자력시설 사고시 주변 지역의 오염된 농작물에 대한 신속한 대응행위의 결정지원은 물론 장기 비상대책 수립을 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. 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. 한문희 외, 실시간 방사선피폭해석시스템 구성연구, Korea Atomic Research Institute Report, KAERI/RR-1737/96(1997).
5. 통계청, 1996년 한국통계연보(1997).
6. 이정호 외, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부 피폭선량평가 코드개발, Korea Atomic Research Institute Report, KAERI/RR-998/90 (1991).
7. 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).