

Application for Limitation of Food Stuffs in a Radiological Emergency

Jong Tai Lee, Goan Yup Lee, Byung Oui Khang,
Ki Hoon Oh and Chang-Kyu Kim

Korea Atomic Energy Research Institute
Korea Institute of Nuclear Safety

방사선비상시 식품섭취제한 기준 및 적용성

이종태 · 이관엽 · 강병위 · 오기훈 · 김창규

한국원자력연구소
한국원자력안전기술원

(2002년 1월 3일 접수, 2002년 5월 8일 채택)

Abstract - Intervention levels for foodstuff restriction in a radiological emergency in Korea are suggested based on the justification and the optimization through the cost-benefit approach method from IAEA Safty Series 109 recommendation. Intervention levels are specified for three broad groups of radionuclides with similar values of committed effective dose per unit intake and specified for two broad categories of foodstuff grouped according to value per kg. It is also discussed on the applicability of revised intervention levels for foodstuff restriction.

Key words : radiological emergency, intervention level, foodstuffs restriction, action level

요약 - IAEA 안전시리즈 109에 제시된 정당화 및 최적화 절차에 따른 비용-이득 접근법을 적용하여 우리나라에 적합한 방사선비상시 식품섭취제한 개입준위 값을 제안 하였다. 관심 핵종은 예탁유효선량 기여도를 고려하여 세 그룹으로 구분하였고 대상식품은 가격에 따라 두 그룹으로 분류하였다. 아울러 제안된 개입준위를 실제 상황에 적용함에 있어서 고려해야할 사항에 대해 논의하였다.

중심어 : 방사선비상, 개입준위, 식품섭취제한, 조치준위

서 론

식품섭취제한 기준에 관한 연구는 체르노빌 원전사고 이후 국내외에서 널리 수행되어 왔으며 크게 두 가지 형식으로 정립되어 있다. 첫째는 거의 항상 정당화될 수 있는 회피 유효선량이 연간 10 mSv 정도라는 ICRP 권고치[1]를 기준으로 그 값의 1/2을 기준값으로 하고 연간 개인이 섭취하는 식품을 대상으로 유도개입준위를 산정하는 방식이며, 두 번째는 방사선비상시 폐기되는 식품의 가격과 회피선량으로 얻어지는 이득에 기초하여 개입준위의 적용원칙인 정당성 및 최적화를 유도하는 비용-이득 접근법[2]이다. 전자의 경우는

ICRP[1] 및 CEC[3]가 적용하였고 국내에서도 황원태[4] 등이 그 방법론에 대한 연구를 수행한 바 있다. 후자의 경우는 IAEA가 권고하는 방법으로 Jensen 등[5]의 연구결과가 발표되어 있다.

일반적으로, 세척 및 조리를 포함한 평소의 음식물 준비과정은 식품내의 방사능 농도(가끔은 1/10 수준 이하로 줄어 듦)를 크게 줄일 수 있다. 따라서 통제된 식품에서 섭취되는 피폭선량은 의외로 낮을 수 있다는 것을 알 수 있다.

식품의 평균 오염농도는 식품의 섭취제한치보다 낮다고 할 수 있다. 그러므로 개인이 받는 실제 선량은 평가되는 선량보다도 훨씬 더 낮을 것이다. 체르노빌 사고에서 직접적인 전선선량 측정이 모델에 의한 예상선량보다 더 낮은 선량을 일

정하게 보여준다는 것을 유럽의 많은 국가들에서 증명[2]하였다고 한다. 이와 같은 근거로 비용-이득 접근법이 보다 더 개입준위의 적용원칙에 적합하다고 판단된다.

우리나라의 방사선비상시 식품섭취제한 기준은 I-131에 국한되어 있는데, 그 값을 보면 음료수 3,000 pCi/l(111 Bq/l), 채소 200 pCi/g(7,400Bq/kg), 우유 6,000 pCi/l(222 Bq/l)과 같다[6]. 이들 값은 설정 근거가 모호하며 대상핵종 및 식품종류도 다양하지 못하여 실제로 방사선비상시에 적절히 대응하는데 미흡한 면이 있다.

국내에서 황원태[4] 등은 5 mSv/y의 회피선량을 기준으로 식품섭취제한을 위한 유도개입준위를 연령별, 핵종별 및 식품군 별로 상세하게 산정한 바 있으나 기준치로서의 제안이나 방사선 비상대책에의 적용성까지는 접근치 못하였다.

이 논문은 IAEA 안전시리즈 109에 제시된 정당성 및 최적화 질차에 따른 비용-이득 접근법에 따라 방사선비상시 식품섭취제한 개입준위에 대한 근거를 마련하고 국내 특성자료를 이용하여 식품섭취제한 개입준위의 계산하고 우리나라에서 적용할 수 있는 개선된 기준 안 마련을 시도하였다. 관심 핵종은 예탁유효선량 기여도를 고려하여 세 그룹으로 구분하였고 대상식품은 가격에 따라 두 그룹으로 분류하였다. 그리고 제안된 개입준위를 실제 상황에 적용함에 있어서 고려해야할 사항에 대해 논의하였다.

개입준위의 유도

식품폐기

보통, 식품의 섭취제한 상황은 오염식품 및 물이 폐기되고 오염 대체물들이 쉽게 공급될 수 있을 때 발생한다. 이때 소요되는 비용은 생활 양식에 큰 방해가 없고 심각한 수요, 공급의 혼란이 없는 경우에 대략 시장의 식품 값과 같다고 할 수 있다. 회피할 수 있는 집단선량과 보호조치에 소요되는 경제적 비용이 크게 고려되는 경우에, 폐기되는 식품에 대해 특별히 최적화되는 개입준위를 평가하는 데에는 가장 간단한 비용-이득 접근법을 적용하는 것이 합리적이다.

단위 시간당 식품대체에 소요되는 비용 a는 대략 kg당 고려되는 음식물의 비용 b(\$/kg)와 그 음식물의 생산을 V(kg/h)의 곱이라고 가정한다.

즉,
 $a = bV$ (1)

단위 섭취당 주어진 예탁유효선량(e(50))을 갖는 방사성 핵종에 대하여, 방사능농도 C(Bq/kg)를 갖는 음식물 소비로부터 선량이 예탁되는 율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dE/dt = C \cdot V \cdot e(50) \tag{2}$$

단위시간당 회피선량 가치는 단위 시간당 선량 변화율 dE/dt와 단위선량당 선량회피로 얻어지는 이득 α의 곱으로 나타낼 수 있다. 그러면 다른 인자들을 무시하는 경우, 단위 시간당 식품대체에 소요되는 비용 a 보다 단위시간당 선량회피로 얻어지는 이득 α · dE/dt 가 클 때, 식품대체가 정당화될 것이다.

그리고 최적 개입준위는 단위시간당 순수이득이 0과 같을 때 얻어진다.

즉,
 $\alpha \cdot dE/dt - a = 0$ (3)

식(1) 및 식(2)를 식(3)에 대입하면

$$\alpha \cdot dE/dt - bV = 0 \tag{4}$$

$$\alpha \cdot C \cdot V \cdot e(50) - bV = 0 \tag{5}$$

최적화된 농도 C_{van}은 다음과 같이 구해진다.

$$C_{van} = \frac{b}{\alpha \cdot e(50)} \tag{6}$$

따라서, 특수 방사성핵종 그룹에 기초하여 폐기를 위한 최적 농도는 b/α 비율에 의존한다. 특정 범주의 음식물에 대해, 이 값은 지리적 위치에 대해 b 또는 α의 단독 값보다 덜 민감하다.

선량회피로 얻어지는 이득

1 Sv를 피폭 받는 경우 건강한 사람의 생명이 대 손실은 약 1년 정도로 평가되고 있다[2]. 이 의미를 경제적 논리로 접근하면 1 Sv를 받는 각 개인은 1년의 생산성을 상실한다는 것과 같다. 이와 같은 가정으로 한 국가의 건강관리는 개인당 국민소득(GNP)에 비례한다는 것을 보여줄 수 있다. IAEA는 단위선량당 선량회피로 얻어지는 이득 α를 GNP/man-Sv ± 200%로 제안하여 α가 한 국가의 국민소득에 비례하여 기술될 수 있음을 밝히고 있다. 이에 대한 상세한 이론적 배경은

참고문헌 7에서 찾아볼 수 있다.

통계청 발표에 의하면 2000년도 우리나라의 개인당 국민소득은 \$9,628[8]이다. 이를 \$10,000로 적용하여 α 값을 계산하면 아래와 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{GNP/man-Sv} \pm 200\% \\ &= \$10,000/\text{man-Sv} \pm 200\% \\ &= \$5,000/\text{man-Sv} \text{ to } \$20,000/\text{man-Sv} \quad (7) \end{aligned}$$

식품구분 및 가격

식품을 품목별로 세분하면 방사선비상시 운영에 복잡성만 가중되고 실효성에 의문이 있다. 따라서 가능하면 가장 간단하면서도 효과적인 관리를 할 수 있는 방법이 요구된다. IAEA SS-109에 의하면 음식물 폐기 및 대체에 대한 개입준위를 kg당 고려되는 음식물의 비용 b의 가격에 따라, 크게 두 그룹으로 구분하여 적용하고 있다. 즉, kg당 가격이 1달러 이하인 우유, 야채, 곡물, 과일 등을 한 그룹으로 하고, 수 달러에서 10달러 이하인 고기류, 생선류, 유제품 등을 다른 한 그룹으로 구분하였다. 일본의 경우, 저 가격 품목을 음료수, 우유(유제품 포함), 그리고, 고 가격 품목을 야채, 곡류, 육류, 어류, 란류로 구분하였다. 우리나라의 경우 식품의 시장가격을 토대로 이를 구분하면 아래와 같다.

범주 1 : 가격(b)이 kg당 1달러 이하
음료수, 우유, 야채, 과일 등

범주 2 : 가격(b)이 kg당 수 달러에서 10달러까지
고기류, 생선류, 곡류, 유제품 등

방사성핵종 그룹

식(6)에서, 섭취된 단위 방사능당 예탁유효선량 e(50)의 값으로 방사성 핵종들에 대한 개입준위는 지정될 수 있다. 그러나 방사선비상시에는 핵종별로 상세하게 구분하여 개입준위를 지정하는 경우에도 복잡성만 가중되고 신속한 분석평가에 대한 효율성도 의문시된다. IAEA는 예탁유효선량 e(50)의 특성이 비슷한 그룹으로 구분하여 대표핵종에 대한 개입준위로 그 그룹의 개입준위를 대신할 수 있도록 하는 것을 권고하고 있다. 여기서는 3개의 방사성핵종 그룹을 고려하여 개입준위를 검토한다. 방사성 핵종 그룹은 아래와 같다.

- 제 1그룹 : 세슘계열(e(50) : 10^8 Sv/Bq)
Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-106, Sr-89

- 제 2그룹 : 요드 계열(e(50) : 10^7 Sv/Bq)
I-131, Sr-90
- 제 3그룹 : 초우라늄 계열(e(50) : 10^6 Sv/Bq)
Am-241, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242

사료대체(우유)

일반적으로 우유와 육류를 폐기하는 것보다 간단한 대책은 오염되지 않은 사료로 오염된 것을 대체하는 것이다. 이 경우 우유의 최적 농도를 고려할 때 식(1)은 대책에 적용하는 비용을 표현하기 위해 다음과 같이 약간 수정될 수 있다.

$$a = b_f \cdot i_f \quad (8)$$

여기서 b_f 는 kg당 대체되는 깨끗한 사료의 비용이며, i_f 는 하루에 동물이 소비하는 사료의 소비율이다. 그러면, 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$a \cdot C \cdot V \cdot e(50) - b_f \cdot i_f = 0 \quad (9)$$

그러므로, 우유 내의 최적 방사능 농도는 다음과 같이 구해진다.

$$C_{opt} = \frac{b_f \cdot i_f}{\alpha \cdot V \cdot e(50)} \quad (10)$$

식품섭취제한 계산

식품폐기

그룹 1의 방사성핵종 Cs-137과 범주 1의 음식물을 생각하자. 사람이 소비해야 할 이들 음식물을 폐기하기 위한 개입준위는 식(6)에서 대략 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} IL = C_{van} &= \frac{b}{\alpha \cdot e(50)} \\ &= (\$0.2/\text{kg} \text{ to } \$1.0/\text{kg}) / (\$5,000/\text{Sv} \\ &\quad \text{to } \$20,000/\text{Sv} \times 1.3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}) \\ &= 770 \text{ to } 15,000 \text{ Bq/kg} \end{aligned}$$

여기서 e(50)의 값 1.3×10^{-8} Sv/Bq 은 참고문헌 9의 자료가 인용되었으며 식품가격의 하한선을 상한선의 1/5로 가정하여 주민보호차원에서 개입준위가 낮게 평가되도록 유도하였다.

비슷한 방법으로 다른 방사성 핵종 그룹과 음식물 범주에 대해 식품 폐기를 위한 최적화된 개입준위의 범위가 평가될 수 있다. 이제 제1그룹의 대표핵종을 Cs-137(e(50)[9] : 어른 1.3×10^{-8} Sv/Bq,

어린이 2.1×10^{-8} Sv/Bq), 제2그룹의 대표핵종을 I-131(e(50)[9] : 어른 2.2×10^{-8} Sv/Bq, 어린이 2.4×10^{-7} Sv/Bq), 제3그룹의 대표핵종을 Pu-239 (e(50)[9] : 어른 2.8×10^{-7} Sv/Bq, 어린이 6.5×10^{-6} Sv/Bq)로 구분하여 개입준위를 계산하면 표 1과 같다.

Table 1. Range of Optimized Intervention Levels for Withdrawal and Substitution of Foodstuffs

Nuclide Group	Food category 1 (Bq/kg)		Food category 2 (Bq/kg)	
	Adult	Baby	Adult	Baby
Group 1	770 - 15,000	480 - 9,200	7,700 - 30,000	4,800 - 92,000
Group 2	460 - 8,800	42 - 810	920 - 17,600	84 - 1,620
Group 3	40 - 690	2 - 30	80 - 1,300	20 - 300

사료대체(우유)

가축을 위한 깨끗한 사료를 마련하는 비용은 약 \$ 0.1/kg 으로 가정한다. 비록 대형사고라 할 지라도, \$0.5/kg보다는 적다고 예상된다. 암소 한 마리는 매일 25 kg의 사료를 소비한다. 외국의 경우 이중 1/3을 목초로 하고 있으나 우리나라는 축산업을 위한 목초지 개발이 미흡하여 거의 대부분을 사료로 키우고 있다. 따라서 암소가 먹는 사료중 현장의 목초는 약 1/10이라 가정한다.

3 그룹의 방사성 핵종 들에 대해 우유의 최적 개입준위의 범위, C_{milk} 는 식(10)를 사용해서 평가될 수 있다. 예를 들면, 그룹 1의 방사성 핵종을 고려하면 우유에 대한 최적 개입준위는 다음과 같이 평가된다.

$$C_{opt} = \frac{b_f \cdot i_f}{\alpha \cdot V \cdot e(50)}$$

$$C_{milk} = (\$0.1/kg \text{ to } \$0.5/kg \times 1/10 \times 25kg/day) / (\$5,000 \text{ to } \$20,000/Sv \times 10 \text{ liter/day} \times 1.3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}) = 100 \text{ to } 1,900 \text{ Bq/kg}$$

비슷한 방법으로 다른 방사성핵종 그룹과 음식물 범주에 대해 최적화된 개입준위의 범위가 평가될 수 있다. 이제 제1그룹의 대표핵종을 Cs-137, 제2그룹의 대표핵종을 I-131, 제3그룹의 대표핵종을 Pu-239로 하고, e(50) 값을 어른과 어린이로 구분하여 개입준위를 계산하면 표 2와 같다.

Table 2. Range of Optimized Intervention Levels for Milk based on Substitution of Clean Fodder

Radionuclide Group	Optimized Intervention Levels (Bq/kg)	
	Adult	Baby
Group 1	100 - 1,900	62 - 1,170
Group 2	60 - 1,100	6 - 100
Group 3	5 - 88	0.2 - 4.0

국내 식품섭취제한 기준(안)

국내에서 사용중인 방사선비상시 주민보호조치를 위한 식품섭취제한 기준은 I-131의 방사능 농도에 국한하여 음료수, 채소, 우유 등에 적용하고 있는데, 체르노빌 사고 이후에 개선된 국제기준과 비교하여 차이를 보이고 있고 설정 근거도 모호한 실정이다. 실효성 있는 방사능 재난대책을 수립하기 위해서는 야채, 곡물, 육류, 어류 등 식품종류도 다양화하여야 하며 중장기적 대책을 위한 세습, 스트론튬, 플루토늄 등과 같은 장반감기 방사성 핵종도 포함하여야 하므로 국내 식품섭취제한 기준은 이론적 배경하에 설정근거를 확보하여 개선되어야 할 것이다.

IAEA는 식품 폐기 및 대체에 대한 최적 개입준위와 동물의 깨끗한 사료대체에 대한 최적 개입준위의 범위를 토대로 식품에 대해 개입준위를 선정하였다. 이와 같은 방법으로 우리나라의 식품에 대한 개입준위를 평가한 결과가 표 1 및 표 2이다. 이들 최적 개입준위는 방사선 비상시의 대피 또는 소개 등 어떤 특정 대책을 위한 것이 아니고, 더구나 회피할 수 있는 량의 향으로 표현되지도 않았기 때문에, 이 결과로 얻어진 준위는 엄밀하게 말해서 조치준위(action level)라고 할 수 있다.

이들 결과를 토대로 조치가 취해져야 할 기준을 가장 낮은 값에서 정수화하여 선정할 경우, 국내에서 음식물 섭취제한에 적용될 수 있는 조치준위를 얻을 수 있다. 그 결과는 표 3과 같다. 여기에서 제2군의 육류 및 곡류의 준위는 하한치(표 1 참조)가 920 Bq/kg으로서 이 값의 사용도 가능하나 운영상의 편의를 위해 1,000 Bq/kg으로 조정하였고 제 3군의 조치준위는 초우라늄 원소들의 독성을 감안하여 표 2의 성인 기준치를 일괄 적용하여 10 Bq/kg으로 조정하였다.

본 연구에서는 식품을 음료수, 우유, 유아식품, 야채, 과일, 곡류, 육류, 어류 등으로 다양화하였

고 방사성 핵종은 I-131을 포함하여, Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-106, Sr-89, Sr-90, Am-241, Pu-238, Pu-239 및 Pu-242 등을 포함하였다. 표에서 IAEA 권고안[2]과 일본의 식품섭취제한 기준[10]을 참고로 수록하였다. 제안된 식품섭취제한을 위한 개입준위는 대체로 IAEA 권고안과 일본의 식품섭취제한 기준과 유사하나 곡류, 육류, 어류 등에 대한 I-131의 개입준위와 같이 일부는 10 배 정도 높은 것도 발견된다. 그 이유는 우리나라의 이들 식품가격이 상대적으로 높다는 것을 의미한다.

여 결정된 것임을 인식할 필요가 있다. 따라서 이들 개입준위는 대체 식품이 쉽게 공급될 수 있다는 것이 확인될 때에만 적절하다고 할 수 있다. 만일 많은 량의 식품폐기가 그 지역의 식품 부족 사태를 초래케 한다면 그 가치는 방사선 위해와 다른 위해(영양분 결핍 등)에 대해 균형적 보호차원에서 재검토되어야 한다. 이런 경우에는 방사선 영향과 영양학적 영향 모두를 고려하는 더욱 포괄적인 조치준위의 정당성 및 최적화가 요구될 것이다. 이러한 여건 하에서는 심각한 급성 건강 영향을 초래할 수 있는 선량을 받는 것으로부터

Table 3. Recommended Intervention Levels for Restriction of Foodstuffs

General Action Level (Bq/kg)				
Radionuclide Group	Meat, Fish, Grain	Vagitable, Fruit	Water, Milk	Baby Food
Group 1 Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-10, Sr-89	2,000	1,000	200	100
Group 2 I-131, Sr-90	1,000	500	100	10
Group 3 Am-141, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242	10	10	10	1
IAEA Recommendation				
Group 1	1,000	1,000	1,000	1,000
Group 2	100**	100	100	100
Group 3	10	10	1	1
Japan GAL*				
Group 1	500	500	200	1
Group 2	-	2,000	300	1
Group 3	10	10	1	1

* GAL : General Action Level

** I-131 : 1,000 Bq/kg, Sr-90 : 100 Bq/kg

결 론

비용-이득 접근법에 의거 국내에서 적용 가능한 식품섭취제한 기준(안)을 제안하였다. 이들 기준(안)은 전문가 회의 등을 통해 심도 있게 검토되기를 기대한다. 식품섭취제한 기준은 국가 당국에 의해 권고되어야 하며, 또한 방사선 비상계획에 적용하여야 한다.

개입준위의 범위는 방사선 사항만을 기초로 하

개인 보호된다는 것이 확인된다하더라도, 식품을 폐기하는 결정에는 집단의 영양학적 필요성 또한 중요한 고려사항이 된다는 것을 인식해야 한다. 실제 비상시 적용성에서는 이와 같은 것들을 반영해야 할 것이며 기 설정된 식품섭취제한 기준보다도 상당히 높은 수준의 불변하는 개입준위(어떤 경우 10배까지도)를 유도하게 될 수도 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 중 한국원자력안전기술원의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. "Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency" ICRP, Publication 63, a Report of a Task Group Committee 4(1992).
2. "Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency", IAEA, Safety Series 109(1994).
3. "Radiation Protection Principles for Relocation and Return of People in the Event of Accidental Release of Radioactive Material", Commission of the European Communities, Radiation Protection-64, doc. XI-027/93(1993).
4. 황원태, 서경석, 김은한, 최영길, 한문희, "국제 기구 권고방안에 근거한 원자력사고시 국내 음식물에 대한 유도개입준위 산정", 대한방사선 방어학회, 2000 추계 학술발표회 논문집, 조선대, 11. 3 (2000).
5. Per Hedemann Jensen, "Basic Principle for Intervention", IAEA International Training Course on Planning, Preparedness and Response for Radiological Emergencies, ANL, USA, 16 May(1997).
6. "민방위 집행계획: 방사능재해대책 계획(과학기술부 소관)", 내무부(1997).
7. 이종태, 강병위, 이관엽, 한기양, "방사선비상 개입준위 기준", KINS/HR-387(2001).
8. "각국의 1인당 국민소득(단위 \$)", 통계청, 주요경제지표, www.nso.go.kr(2001).
9. "International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and the Safety of Radiation Sources", IAEA Safety Series No.115(1996).
10. "원자력시설 등 주변의 방재대책에 대하여", 일본원자력안전위원회, 별첨 2, 평성 11년(2000).