

토양 중 ^{137}Cs 의 유도준위 설정

Determination of Derived Concentration Limit of ^{137}Cs in Soil

이창민, 최용호, 임광욱, 이창우

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

이원근

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리

요 약

방사선에 대한 선량한도를 1mSv 로 하여 토양 중 Cs-137 의 유도준위를 설정하였다. 토양은 경작지(논, 밭) 및 주거지역으로 구분하여 경작지에 대하여서는 경작되는 식품으로 전이된 방사능에 의한 내부피폭을, 주거 지역에 대해서는 토양오염에 의한 외부피폭으로부터 유도준위를 결정하였다.

특히 밭의 경우 1년에 2모작이 가능한 점을 감안하여 이를 이용해서 논과 밭중 적절한 결정 경로를 선택하고자 하였다.

이 값들은 여러 핵종이 오염된 경우는 각각 핵종의 방사능이 준위를 만족한다 하더라도 그들의 총합은 선량한도를 초과할 수 있기 때문에 조정이 필요하다. 따라서 이들의 총합이 선량한도 이상인 경우 각각의 준위를 측정된 핵종의 수로 나누어 구해지는 값을 조정된 유도준위로 하였다. 이 방법은 허용농도 결정 방법에 있어 논리적으로 타당하며 방사성 오염의 시나리오에 따른 불확실성을 제거한 정확한 방사능 측정값으로부터 계산되기 때문에 정확한 유도준위 결정이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract

In this work, according to new recommendation, we determined derived concentration limit of Cs-137 in soil. There are 2 classes in soil, one is a place for residence, and the other is a place for cultivation. The former has a pathway to internal exposure, the latter has a pathway to external exposure. Especially we considered the character of upland field and choose critical pathway.

We have to control the derived concentration limit in case of contamination of some

radio nuclides, because total concentration may exceed the dose limit although each concentration does not exceed the dose limit. So we use the method that dose limit is divided by the quantity of radionuclides. We expect to determine the acute value because this is very logical method, and does not have uncertainty of contamination pathway.

1. 서 론

최근 원자력발전소 주변의 환경방사선에 대한 국민적 관심이 고조되고 있으나 환경 방사능에 대한 허용기준의 미비로 인하여 환경방사능 조사로부터 검출되는 방사능에 대해 주변 주민 및 국민들을 이해시키는데 곤란함을 빈번하게 겪고 있다. 물론 원자력 발전소로부터 방출되는 방사능이 설계기준치 즉 방출기준치 미만이기 때문에 그 영향이 미미할 것이라는 주장이 있으나, 그 주장이 측정된 양을 대상으로 한 것이 아니므로 설득력이 약하다. 또 일부 학자들은 방사성 핵종의 방출기준치를 설정하는데 사용한 모델의 불확실성 등을 문제점으로 제기하기도 한다. 따라서 원전으로부터 유출되는 방사성 핵종이 환경에 존재할 때 이들에 의한 피폭선량이 국제 기준을 만족하는 방사능의 유도준위로서의 농도값 설정이 필요하다.

개정 전 원자력법[1]에서 방사선 피폭선량은 선량한도로, 물질의 방사능농도는 최대허용표면오염도, 최대허용수중 및 공기중 농도 등의 기준을 통해 규제되었다. 따라서 공기 및 물을 제외한 물질의 방사능에 대해서는 최대허용표면오염도와 비교하거나 또는 그 물질에 의해 인체가 피폭될 선량을 계산하여 선량한도와 비교하여야 하였다. 여기서 표면 오염이라는 것은 물질의 표면만 방사능으로 오염되었다는 가정하에서 규정된 것이기 때문에 그렇지 못한 대부분의 경우는 대상 물질에 의한 방사선 피폭선량을 계산하여야 하는 번거로움이 따르고 있었다. 특히 환경방사능 조사에서 측정되는 생물 시료중의 방사능은 물, 토양 등의 방사능으로부터 전이 혹은 농축되어 생물체 전체에 축적된 것이다. 따라서 이런 시료 등에 대해 선량한도로부터 결정되는 유도 준위로서의 농도를 설정해 놓으면 방사능 영향 평가측면에서 상당히 도움이 될 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 원전으로부터의 방출량이 비교적 크고 장 반감기 핵종으로서 원전의 장기적 안전측면에서 가장 중요시되고

있는 Cs-137에 대하여 상기 시료 중 가장 초기에 그 유해 여부를 알 수 있는 토양 중의 유도준위로서의 농도를 설정하고자 한다. 또한 선량한도에 기준을 두고 단일 핵종에 대해 유도준위를 설정하는 것이 다수의 시료인 경우 선량한도를 초과할 수 있다는 우려로 인해 이들을 고려할 수 있는 타당한 방법을 제시함으로써 여러 핵종이 오염이 된 경우에도 선량한도를 만족할 수 있는 유도준위를 제시하고자 한다.

2. 결정경로

토양의 이용에는 여러 가지가 있다. 그것을 크게 두 가지로 나누어 보면 농작물을 재배하는 경작지와 사람들이 주거생활을 하는 거주지일 것이다. 따라서 이 두 장소에 대한 방사성 핵종의 유도준위를 결정하여 그 값의 합이 선량한도를 넘지 않도록 한다면, 토양으로부터의 과대피폭에 대한 염려는 없을 것이라고 사료된다. 이 두장소로부터의 피폭경로는 첫째, 토양으로부터 직접 받게 되는 외부피폭이고, 둘째는 식물로부터 전이되어, 그 식물을 섭취함으로써 받게 되는 내부피폭이다.

가. 경작지

경작지로는 논과 밭이 있는데 논인 경우 우리나라에서는 대체적으로 1모작만이 가능하므로 일년중 방사성 핵종이 경작지로부터 벼로 전이되어질 수 있는 기간은 모내기에서 추수까지의 약 5~6개월 정도이다. 그러나 밭의 경우는 2모작을 하는 경우가 많으며, 이때 년 중 이용기간은 최고 12개월에 달할 수 있다[2]. 벼는 우리나라 사람들이 가장 많이 섭취하는 대표작물이라고 볼 수 있으나 밭에서 길러지는 김장채소나 기타밭작물 등의 섭취량을 합해본다면 충분히 벼 이상으로 섭취한다고 사료되므로 논을 결정경로로 하여 벼를 결정작물로 단정하는 것은 다소 무리가 있다고 판단된다. 따라서 논과 밭에 대한 각각의 유도준위를 설정한 후 이 값들 중 더욱 보수적인 값을 취하고자 한다.

경작 중에 실제 농부가 밭에서 일하는 시간은 씨를 뿌릴 때와 수확물을 거두어 드릴 때 정도이고 그 외는 농촌에서의 산업화 등으로 인하여 1년 전체의 시간에 비추어 본다면, 아주 작다고 할 수 있다. 또한, 토양에 대한 오염 시 외부피폭에 의한

선량을 농산물의 전이에 의한 피폭선량과 비교해 보면 Cs-137의 경우 외부피폭선량전환인자가 1E-19정도이고, 내부피폭선량전환인자는 1E-8정도로 토양에서 식물체로의 전이를 고려한다 하더라도 약 100만 배 이상차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 곧, 외부피폭에 의한 피폭량이 내부피폭에 의한 피폭량보다 극히 작은값을 가지며, 이는 내부 피폭량에 대한 오차의 범주에 외부 피폭량이 속한다고 볼 수 있다. 따라서 경작지에 대한 유도준위로서의 농도는 식물체로 전이되므로써 얻게 되는 내부피폭만을 고려해도 충분할 것으로 사료된다.

나. 거주지

거주지는 사람이 일년동안 주거생활을 하며 지내는 지역이다. 이 지역에서 외부선량에 의한 피폭 외에 다른 피폭은 고려되어지기 힘들다. 거주지 내에서 소량의 채소류를 재배하는 경우도 있으나 이는 전체 면적에 비교해 볼 때 극히 적은 양이므로 외부피폭으로 인한 경로가 대부분을 차지한다고 볼 수 있다. 또한 사람이 거주지에서 1년을 전부 보내는 것이 아니므로 보수적인 관점에서 보더라도, 거주지에 있어서 외부선량으로 인한 피폭이 선량한도에 이르게 되는 농도를 산출하는 것이 타당하다고 사료되어진다. 이때 사용되어지는 외부피폭선량전환인자 경우 깊이 별로 산출되어 있음을 볼 수 있는데, 이중 표면에 의한 전환이 가장 큼을 볼 수 있다. 따라서 보수적인 관점에서 표면의 선량전환인자를 사용하고자 했다. 그러나 토양중 방사능은 보통 단위 무게당 농도(Bq/kg)로 측정되고 있으므로 이 면적 당 농도를 단위 무게당으로 환산해줄 필요가 있다. 이것을 표토 5cm깊이의 토양에 방사능이 균일하게 분포되어 있다고 가정하였다.[3]

3. 계산 모델

연간 선량한도로부터 유도된 준위는 선량계산식의 역산으로써 계산할 수가 있다. 오염된 토양으로부터 전이된 식품을 섭취함으로써 얻게 되는 연간 내부피폭량은 다음과 같이 식1로써 계산될 수 있다.[4]

$$H_T = C_{Soil} \times T_F \times U_F \times D_i \quad (1)$$

여기서,

H_T : 피폭선량

C_{Soil} : 토양 중 농도

T_F : 식품의 전이계수

U_F : 식품 섭취량

D_i : 선량전환인자

H를 신 권고[5]에 의한 연간선량한도 1mSv로 하고, 섭취량과 선량전환인자, 전이계수를 이용하여 토양 중 유도준위로써의 농도를 계산할 수가 있다. 즉 식1을 토양 중 농도에 대해서 정리해 보면 다음 식2와 같다.

$$C_{Soil} = \frac{1mSv}{D_i \times T_F \times U_F} \quad (2)$$

4. 계산 인자

가. 섭취량

섭취량 조사는 보건복지부의 1996년 국민영양 조사 결과 보고서[6]와 한국원자력연구소에서 1997년도의 조사자료[7]를 참조하였다.

그런데 이들 자료가 BSS(Basic Safety Standard) 96[8]에서의 6개의 연령군, 즉 3개월(~ 1세미만), 1세(1세이상 ~ 3세미만), 5세(3세이상 ~ 7세미만), 10세(7세이상 ~ 12세미만) 15세(12세이상 ~ 17세미만) 성인(17세 이상)으로 구분되어 있지 않아 위에서 '한국인 영양권장량'에서 제시하고 있는 "소비 단위 계수"를 사용하여 각 연령군의 섭취량을 산정 하였다. 그런데 우리 나라 국민들의 에너지 소비 단위 계수가 조사된 "한국인 영양권장량"에서는 IAEA에서와는 다른 연령군 즉 1세 미만, 1세 이상 ~ 4세 미만, 4이상 ~ 7세 미만, 7세 이상 ~ 10세 미만, 10세 이상 ~ 13세 미만, 13세 이상 ~ 16세 미만, 16세 이상 ~ 20세 미만, 20세 이상으로 구분하여 소비단위계수를 발표하고 있다. 여기서 IAEA의 연령군에 따라 "한국인 영양권장량"에서 적합하게 소비단위 계수를 구할 수 없는 연령군은 1세 이상 ~ 2세 미만, 7세 이상 ~ 12세 미만이다. 이들에 대해서는 이들 나이의 상한치에서 가

까운 나이의 소비단위 계수로 하였다. 이렇게 구한 6개 연령군의 소비단위 계수를 표 1에 보였다. 소비 단위 계수는 상대적으로 보수적인 남자의 값을 사용하였다.

표 1 6개 연령군에 따른 소비단위계수

연 령	소비단위계수
~ 1세 미만	0.36
1세 이상 ~ 2세 미만	0.48
2세 이상 ~ 7세 미만	0.60
7세 이상 ~ 12세 미만	0.82
12세 이상 ~ 17세 미만	1.04
17세 이상	1.00

이에 따라 산출된 연령군별 섭취량은 다음 표2와 같다.

표 2 연령군별 섭취량(kg/yr)

농작물	섭취량(kg/yr)					
	3개월	1년	5년	10년	15년	성인
짚	0	62.99	78.73	107.60	136.47	131.22
배추	0	15.01	18.77	25.65	32.53	31.28
과일류	0	18.11	22.63	30.93	39.23	37.72
기타밭작물	0	24.33	30.41	41.56	52.71	50.68

나. 선량전환인자

선량전환인자는 현재 BSS 96으로 사용중인 IAEA의 Safety-Series 115[8]에 나와있는 선량전환인자를 사용하였다. 이 중 연령별 Cs-137에 대한 값은 표3과 같다.

표 3 연령군별 Cs-137의 선량전환인자(단위 Sv/Bq)[8]

연령군 핵종	1세미만	1~2	2~7	7~12	12~17	17세 이상
	Cs-137	2.20E-08	1.20E-08	9.60E-09	1.00E-08	1.30E-08

다. 전이계수

전이계수는 토양속에 존재하는 핵종이 작물체에 흡수되어 가식부로 전이되는 정도를 나타내는 계수이다. 본 연구에서는 국내에 적합하고 현실적인 평가를 하기 위

하여 국내에서 측정된 값들을 사용하였다.(표4)[10]

표 4 Cs-137의 전이계수

Crop	Soil property	Transfer factor
Rice	pH 6.4 LS	0.020-0.021
	pH 7.7 L	0.01
	pH 5.5 SiCL	0.04
	pH 4.4 SL	0.061
	pH 6.1 LS	0.018
	pH 5.6 SL	0.030
	pH 4.6 SL	0.10
Soybean	pH 6.4 LS	0.082-0.088
	pH 4.4 SL	0.28
	pH 6.1 LS	0.17
	pH 5.6 SL	0.13
	pH 4.6 SL	0.50
Ch, cabbage	pH 6.0 SL	0.10-0.11

LS : Loamy sand , SL : Sandy loam , L : Loam , SiCL : Silty clay loam
 위 표의 값들 중에서 보수적인 측면에서 가장 높은 값들을 사용하였다.

5. 토양 중 유도준위의 설정

가. 경작지

논에 대해서 살펴보면, 논에서는 주로 쌀이 재배되며, 가끔 2모작이 되는 경우가 있기도 하지만, 국내 기후 실정으로는 대부분 1모작만 하고 있다. 따라서 앞서의 식 2를 이용하여 논에 대한 유도준위를 계산해 보면, 각각의 인자들이 6개 연평균으로 나누어짐에 따라 6개의 준위값을 구할 수가 있는데, 이중 가장 보수적인 값을 선택해 보면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{Soil} = \frac{0.001 Sv/yr}{1.30E-08 Sv/Bq \times 0.1 \times 136.47 kg/yr} = 5.6E+03 Bq/kg$$

밭의 경우 4월에서 7월까지 하(夏)작물을 재배하고 8월 이후에 파종하여 11~12

월까지 동(冬)작물을 재배함으로써 2모작을 하는 경우가 많다.[2] 그러나 현재 보건 복지부 등지에서 육상식품에 대한 섭취량을 품종별로 자세하게 나누지 않고, 곡류, 기타발작물, 과일류, 김장채소류로 나누고 있는 관계로 편이상 하(夏)작물을 기타 발작물과 동일시하였고 동(冬)작물을 김장채소류로 하여 배추를 대표작물로 사용하였다. 이는 현재 개발된 전이계수의 분류와도 비슷함으로 적절하다고 사료된다. 또한 기타발작물의 전이계수는 가장 전이률이 높은 콩을 대표작물로 사용하였다. 따라서, 밭의 경우 토양의 오염은 항상 일정한 평형상태에 있다고 가정할 때 두 작물 즉 기타발작물과 김장채소류를 함께 섭취한 경우의 피폭선량이 선량한도를 넘지 않도록 유도준위를 설정할 필요가 있다.

이를 계산하기 위하여 위의 2식을 변환하여 보면,

$$C_{Soil} = \frac{1mSv}{D_i \times [(T_{기타발작물} \times U_{기타발작물}) + (T_{김장채소} \times U_{김장채소})]} \quad (3)$$

이에 각각의 값을 대입해 보면,

$$C_{Soil} = \frac{0.001Sv}{1.30E-08 \times [(0.5 \times 52.71) + (0.11 \times 32.53)]} = 2.57E+03 \text{ Bq/kg}$$

이는 곧 김장채소와 기타발작물이 한 토양에서 1년간 2모작으로 재배되더라도 선량한도를 만족할 수 있는 토양 중의 유도준위인 것이다.

나. 거주지

거주지는 외부피폭만을 고려하여 이에 대해 선량한도에 이르게 되는 유도준위를 설정할 것이다. 이때 사용되는 선량전환인자는 가장 보수적인 값을 보이는 표면에서의 외부피폭선량전환인자를 사용할 것이며, 앞서 설명한 바와 같이 측정시 단위 무게당 농도(Bq/kg)점을 감안하여 표토 5cm깊이의 토양에 방사능이 균일하게 분포되어 있다고 가정할 것이다. 이 환산에 필요한 토양중의 밀도는 고리주변의 밭토양을 지표 15cm깊이로 채취하여 실측한 값의 평균치인 1.2g/cm³[4]을 사용하였다.

Cs-137의 표면에서의 외부피폭선량전환인자는 2.85E-19 Sv m²/yr Bq이므로 이를 위의 밀도값을 이용하여 무게 단위로 변환해 보면, 4.75E-18 Sv kg/yr Bq가 된다. 이를 선량한도로부터 유도준위를 구하여 보면, 2.1E+14Bq/kg이 된다.

6. 결 론

위에서 보는 바와 같이 외부피폭과 내부피폭에 대한 유도준위는 Cs-137의 경우 약 $1E+10$ 배 정도의 큰 차이를 보인다.

따라서 이는 유효오차 범위내에 들어가게 되므로 결국 토양에 대한 유도준위는 내부피폭을 결정경로로 하여 산출된 경작지의 값으로 설정하는 것이 타당하다고 사료되어진다. 또한 경작지중 위에서 보여지는 바처럼 밭의 유도준위가 더 보수적인 것을 볼 수 있다. 따라서 논과 밭 중 밭을 결정경로로 사용하는 것이 타당하다고 사료되어 진다.

그러나 위에서 산출된 유도준위의 경우 Cs-137 한 핵종으로 오염이 되었을 때는 선량한도를 만족할 수 있으나 2가지 이상의 핵종에 대해 오염이 된 경우는 이들 각각이 유도준위를 초과하여 오염이 되지 않았다 하더라도 이들의 선량을 합산해 보면 선량한도를 초과할 수 있다. 따라서 보통 2,3가지의 핵종이 동시에 오염이 되는 현실에 비추어 볼 때, 이들이 모두 섭취된다 하더라도 연간 선량한도를 초과하지 않는 유도준위가 필요함으로, 이에 적합한 방법을 개발하고자 하였다. 이는 유도개입준위(Derived Intervention Level:DIL)[11]의 계산방법과 유사한 것이나, DIL이 사고 후 상대적으로 높은 오염도에서 실행되므로 인하여 정상운전시 오염도가 낮은 상황에는 적합하지 않음으로 하여 다음과 같은 계산방법을 사용하였다.

$$DC_{PL} = \frac{DC_{SI}}{N} \quad (4)$$

여기서,

DC_{SI} : 단일 핵종이 단일 시료에 오염된 경우의 유도준위

N : 핵종 수

DC_{PL} : 여러 핵종이 시료에 오염된 경우의 유도준위

다만 한가지 문제점은 여러핵종이 검출되어지는 경우 제시된 유도준위를 조정하여야 하는 번거로움이 있다는 것이다. 그럼에도 불구하고 이 방법은 논리적으로 타당하며, 방사성 오염의 시나리오에 따른 불확실성을 제거한 정확한 방사능 측정값으로부터 계산되기 때문에 정확한 유도준위 결정이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 한국원자력 안전기술원, 원자력 관계 고시집, 한국원자력 안전기술원, 1996
- [2] 조재영 등, 전작(田作), 향문사, 1989
- [3] 이창우 등, karlsruhe 원자력연구소 주변의 환경방사능 측정자료로부터 실효선량당량계산, 대한방사선방어학회지, 1990
- [4] 이창우 등, 토양의 방사능 오염허용기준치 설정을 위한 피폭경로모델, 대한방사선 방어학회지, 1990
- [5] International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, I-CRP Publication60, Pergamon Press, 1991
- [6] 보건복지부, '95 국민영양조사결과보고서, 보건복지부, 1996
- [7] 이정호 등, 육상 방사선 환경생태 해석기술 개발, 과학기술처, 1997
- [8] IAEA, International basic standards for protection against ionizing-radiation and for the safety of radiation sources, Safety Series No.115 1997
- [9] 한국인구보건연구원, 한국인영양권장량, 보건사회부, 1985
- [10] 이창우 등, KFOOD-섭취 및 호흡경로에 의한 방사선 내부피폭 선량계산을 위한 전산코드, 한국원자력연구소, 1992
- [11] WHO(World Health Organization), Derived Intervention Level for Radionuclides in Food, 1988