감자의 재배기간 중 토양에 침적한 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 작물체로의 전이

최용호, 임광묵, 전인, 금동권
한국원자력연구원 원자력환경안전연구부

2008년 7월 9일 접수 / 2008년 8월 6일 1차수정 / 2008년 8월 11일 채택

감자의 재배기간 중에 침적된 방사성 핵종의 토양-작물체 전이계수(TF_a, $m^2 kg^{-1}$-fresh)를 측정하기 위하여 감자의 파종 2 일 전 및 생육 중 세 차례에 걸쳐 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs 함유 용액을 재배상자의 토양표면에 처리하였다. 파종 전 처리에서는 핵종이 표토(pH 5.2의 양질사토)와 혼합되었다. 조사 부위는 잎, 줄기, 괴경껍질, 괴경육이었다. 파종 전 처리시 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 TF_a 값은 작물체 부위에 따라 각각 1.9×10^{-4}~1.5×10^{-2}, 1.8×10^{-4}~7.5×10^{-4}, 4.0×10^{-4}~1.6×10^{-2}, 1.5×10^{-4}~3.9×10^{-4}의 변이를 보였다. 생육 중 처리시 TF_a 값은 파종 전 처리에 비해 대체로 수 배 정도 낮았다. ^{54}Mn, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 경우 생육 초기 또는 중기 처리시 후기 처리보다 높았으나 ^{60}Co의 경우 이와 반대였다. 부위 간에는 대체로 잎에서 가장 높았고 괴경육에서 가장 낮았다. 토양으로부터 네 부위로의 총 흡수율은 0.05~3.16%의 범위였다. 파종 전 처리 후 3 년차 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{137}Cs의 TF_a 값은 부위에 따라 각각 1년차의 11~25%, 21~25%, 38~67%였다. 본 연구결과는 감자의 생육 중 방사성 핵종의 단기침적시 영향을 예측하거나 관련 모델의 검증에 활용할 수 있다.

중심어 : 감자, 토양, 방사성 핵종, 전이계수, 재배기간, 단기침적

1. 서 론

방사성 핵종이 농경지에 침적되면 주로 뿌리를 통하여 토양으로부터 농작물에 흡수·전이되고 이 농작물을 소비함으로써 인체에까지 도달하여 내부피폭을 일으키게 된다. 따라서 방사성 핵종의 농경지 침적에 따른 농작물 내 핵종의 농도를 예측·평가하는 것은 평상시 주민선량 평가 및 사고시 대책수립에 있어서 매우 중요한 일이다.

토양으로부터 농작물로 방사성 핵종이 전이되는 정도는 통상 토양중 핵종 농도($Bq\ kg^{-1}$)에 대한 작물체 내 농도($Bq\ kg^{-1}$)의 비로 정의되는 토양-작물체 전이계수(TF_m)로 나타내고 있다[1,2]. 이 전이계수는 표토와 방사성 핵종을 일정 깊이로 혼합한 후 작물을 파종하고 수확기에 측정하는 것으로 주로 원자력 시설의 정상가동시 연속적인 균일방출에 따른 비교적 장기간의 토양침적에 적용하기 위한 것이다. 여기에서 표토의 혼합은 농경지에서 파종 전에 통상적으로 행해지는 밭갈이를 모사한 것이다.

한편, 방사성 핵종이 작물의 생육 중에 농경지에 침적되면 작물을 수확할 때까지 대체로 지표 부근에 집중적으로 분포하게 된다. 이것은 생육 중에는 밭갈이를 하지 않기 때문이다. 이와 같은 경우에는 표토 내에 핵종이 균일하게 분포하고 있는 것으로 볼 수 없으므로 TF_m을 적용할 수 있는 조건이 되지 못한다. 또한 생육 중에 일시적인 침적이 일어나면 침적시기에 따라 작물체의 흡수력, 흡수기간, 기관의 분화·발육 등에 차이가 있으므로 침적시기의 영향이 매우 클 것으로 보인다. 따라서 생육 중 침적에 대해서는 침적시기별로 토양침적밀도($Bq\ m^{-2}$)에 대한 작물체 내 농도($Bq\ kg^{-1}$)의 비로 정의되는 전이계수(TF_a, $m^2 kg^{-1}$-fresh)를 적용하는 것이 적절할 것으로 사료된다[3,4].

감자는 세계적으로 주식 또는 간식용으로 비교적 많이 소비되고 있는 작물이다. 우리나라에서도 꽤 많이 생산되어 다양한 형태로 소비되고 있다. 참고로 우리나라에서는 2006년도에 24,000 ha에서 총 630,000 ton의 생감자가 생산된 것으로 조사되어 있다[5]. 그러나 우리나라에서는 감자에 대해서 TF_m과 TF_a 둘 다 조사된 예를 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 감자의 재배기간 중 방사성 핵종의 단기적인 침적에 중점을 두고 우리나라에서 비교적 흔한 산성 사질양토에서 감자에 대한 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 침적시기별 TF_a 값을 온실실험을 통하여 조사하였다. 또한 토양에 침적한 핵종은 장기적으로 작토층에 머무를 수 있으므로 파종 전 침적에 대해서는 3년 간 실험을 수행하여 TF_a 값의 변화를 추적하였다.

책임저자 : 최용호 yhchoi1@kaeri.re.kr, 한국원자력연구원 원자력환경안전연구부
대전광역시 유성 사서함 105

2. 재료 및 방법

2.1 감자 재배

가로, 세로, 높이가 각각 0.6 m, 0.6 m, 1.0 m인 철재 흙상자를 온실 내에 배치하고 감자를 재배하였다. 실험토양은 한국원자력연구원(대전광역시 유성구 덕진동 소재) 인근 야외에서 지표로부터 60 cm 깊이까지 상, 중, 하 층위별로 채취하였다. 층위별 토양의 물리ㆍ화학적 특성은 표 1과 같다. 흙상자는 바닥에서 20 cm 정도까지 쇄석으로 채우고 그 위에 차례로 위에 언급한 하부, 중부, 상부의 토양을 각각 30 cm, 30 cm, 20 cm 깊이로 채운 다음 충분히 급수하였다. 급수 후 흙상자의 지표면은 15 cm 정도 침강하였다[3,6].

감자의 파종 하루 전에 비료의 전량을 밑거름으로 상자당 요소 11.8 g, 용과린 27 g, 염화칼리 7.2 g(10 a 당 N 15.3 kg, P 6.6 kg, K 9.9 kg에 해당), 석회 36 g, 퇴비 360 g을 살포하고 표토와 섞어 주었다. 다음 날(4월 8일) 5~6 cm 깊이로 상자당 네 구멍을 파고 이등분된 씨감자를 구멍당 한 개씩 파종한 다음 복토하였다. 감자의 품종은 우리나라의 장려품종으로서 국토의 광범위한 지역에서 재배하기 알맞은 것으로 알려져 있는 수미였다.

파종 후 약 한 달 경과 시 구멍당 두 개체만 남기고 솎아 주었다. 표토와 작물체의 상태를 고려하여 2~3 일에 한 번씩 적당량의 물을 토양표면에 공급하였다. 병충해 방제를 위하여 살충제와 살균제를 각각 두 차례 및 세 차례 살포하였다. 온실의 창문은 최대한 열어 두어 온도상승을 가능한 한 억제하였다.

2.2 방사성 핵종 처리

감자의 파종 2 일 전 및 파종 후 4 일, 31 일 및 63 일에 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 무담체 혼합용액(0.5 M HCl 용액, 접종일 기준 ml 당 각 핵종 약 50,000 Bq 씩 함유)을 상자 당 64 ml씩 처리하였다. 지표를 균일하게 오염시키기 위하여 상자 당 가로, 세로 각각 여덟 개, 즉 총 64 개의 균등하게 분포하는 지점을 향하여 지점 당 1 ml씩의 용액을 마이크로피펫으로 적하하였다.

파종 전 처리의 경우 다음 날 비료와 함께 표토와 혼합되었다. 이 때 날의 길이가 약 15 cm인 모종용 삽을 이용하였다. 생육 중 처리시 작물체로 인하여 제 위치에 적하하는 것이 어려운 경우에는 작물체의 직접오염을 피하여 최대한 제 위치에 가까운 곳에 적하하였다. 생육 중 처리 후에는 인위적인 토양 교란이 없었다. 지표로부터 토양입자가 부유하거나 작물체의 지상부가 지표에 닿아 오염되는 것을 방지하기 위하여 파종 전 처리의 경우 작물의 생육 초기에, 생육 중 처리의 경우 처리 직후에 쇄석으로 지표면을 덮어 주었다.

2.3 시료의 채취, 처리 및 분석

파종 후 90 일, 즉 7월 7일에 잎, 줄기, 괴경육, 괴경껍질의 네 부위에 대하여 흙상자 당 네 구멍에서 구멍 별로 시료를 채취하였다. 흐르는 물로 괴경을 깨끗이 씻어 외부의 흙을 제거하고 휴지로 물기를 완전히 닦아낸 다음 과도를 이용하여 괴경육과 껍질을 분리하였다. 부위별 시료는 생체중을 측정한 다음 가위나 칼로 잘게 잘라 온실 내에서 3 주 정도 자연건조 시켰다.

건조된 시료는 지름 5 cm, 높이 10 cm의 방사선 계측용 플라스틱 용기에 담고 무게와 높이를 측정한 다음 감마스펙트로메트리를 실시하여 네 핵종을 동시에 분석하였다. 사용된 기기는 고순도 Ge 계측기(EG&G ORTEC, USA)였고 계측시간은 시료에 따라 0.5~2 시간 정도였다. 계측오차는 대체로 5%(2σ) 이내였다. 시료의 geometry에 대한 보정은 시료와 동일한 용기에 여러 가지 높이로 담은 방사성 수용액 시료에 대한 측정결과를 이용하여 실시하였고 밀도차에 따른 보정은 물과 식물체의 주요 구성 물질에 대한 질량감쇄계수를 이용하여 근사적으로 수행하였다.

2.4 전이계수 계산

방사성 핵종의 처리량과 시료내 농도를 이용하여 다음과 같이 토양-작물체 전이계수(TF_a, $m^2 kg^{-1}$-fresh)를 계산하였다[3,6].

$$TF_a = \frac{C_i}{A_i} \tag{1}$$

여기서, C_i: 수확시 작물체 부위별 핵종 i 농도 (Bq kg^{-1}-fresh)
A_i: 수확시 기준 단위면적 당 핵종 처리량 (Bq m^{-2})

Table 1. Physicochemical properties of the experimental soils in different layers.

Layer	Depth* (cm)	pH (1:5)	OM† (%)	Ex. cation (cmol kg^{-1}) K	Ex. cation (cmol kg^{-1}) Ca	CEC‡ (cmol kg^{-1})	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture§
Top	0-20	5.2	0.91	0.12	1.84	4.2	79.0	17.0	4.0	LS
Middle	20-40	5.4	0.45	0.04	1.62	4.1	72.2	19.8	8.0	SL
Bottom	40-60	5.8	0.40	0.10	2.23	5.7	66.7	19.3	12.0	SL

*depths in an original field
†Organic matter
‡Cation exchange capacity
§LS: loamy sand, SL: sandy loam.

전이계수 값은 네 구멍 시료에 대한 평균과 표준편차로 나타내었다.

또한, 다음과 같은 식으로 핵종의 흡수율(U, %)을 계산하였다.

$$U = \frac{T_i}{B_i} \times 100 \qquad (2)$$

여기서, T_i: 상자 당 수확 작물체(뿌리 제외) 내 핵종의 총량 (Bq)
B_i: 수확시 기준 상자 당 핵종 처리량 (Bq)

3. 결과 및 논의

3.1 핵종의 흡수 및 작물체 내 분포

그림 1은 네 가지 방사성 핵종의 침적 시기에 따른 작물체 흡수율을 나타내고 있다. 이것은 토양에 침적된 핵종이 감자 수확을 통하여 얼마나 제거될 수 있는지를 보여 준다.

측정된 흡수율은 핵종의 종류 및 침적 시기에 따라 0.05~3.16%의 범위로 ^{85}Sr과 ^{54}Mn의 흡수율이 ^{60}Co와 ^{137}Cs보다 수~수십 배 높았다. 본 조사 대상에서 제외된 감자의 뿌리와 지상부 전체가 토양에 남는다고 보면 감자 재배를 통한 토양 내 핵종의 제거 정도는 대체로 무시할 만한 수준이라고 할 수 있다. 그러나 방사성 Sr과 Mn의 경우 수 십 년에 달하는 장기적인 평가에 있어서 작물체 수확에 의한 제거를 무시하면 침적의 영향을 과대평가할 가능성이 있으므로 주의할 필요가 있다.

네 핵종 모두 파종 전 침적시 세 번의 생육 중 침적보다 흡수율이 높았다. 이에 대해서는 파종 전 침적의 흡수 기간이 가장 길었던 것도 한 가지 이유가 될 수 있을 것이나 생육 초기(파종 후 4 일) 침적시의 흡수율과 비교해 볼 때 보다 중요한 이유가 있었던 것으로 판단된다. 그것은 토양혼합에 따른 뿌리흡수 및 괴경흡수의 증대일 가능성이 크다. 파종 전 침적 후에는 핵종과 표토를 섞어 주었기 때문에 지하 뿌리의 분포 범위 내로나 괴경의 발육 깊이까지 보다 많은 양의 핵종이 유입되어 뿌리나 괴경을 통한 흡수가 증대된 것으로 추정된다.

Melnikova와 Baranova[7]는 흑색 필름을 이용한 감자 괴경의 오염토로부터의 분리、생육 실험을 통하여 뿌리에 의해 흡수된 ^{90}Sr은 괴경으로 거의 이동하지 않으며 괴경 내 ^{90}Sr의 축적은 괴경에 의한 직접흡수에 크게 의존한다고 보고하였다. Srivastava[8]도 위와 유사한 종류의 실험을 수행하여 ^{32}P가 괴경을 통해 흡수될 수 있음을 확인하였다. 따라서 ^{54}Mn, ^{60}Co 및 ^{137}Cs에 대해서도 괴경흡수의 가능성을 배제할 수 없다고 하겠다.

세 번의 생육 중 침적에서는 네 핵종 모두 생육 초기 또는 중기(파종 후 31 일) 침적시 흡수율이 가장 높았고 생육 후기(파종 후 63 일) 침적시 대체로 가장 낮았다. 침적시기에 따른 흡수율의 변이 정도는 ^{54}Mn와 ^{60}Co의 경우 비교적 컸으나 ^{60}Co와 ^{137}Cs의 경우 매우 작았다. 생육후기 침적시 흡수율이 가장 낮은 것은 지표에 침적된 핵종이 뿌리나 괴경의 분포 깊이까지 도달하는 데 시간이 부족했고 흡수기간도 가장 짧았으며 또한 생육후기로 갈수록 작물체가 노쇠하여 흡수력이 약해졌기 때문인 것으로 사료된다.

표 2는 작물체에 흡수된 방사성 핵종의 침적시기에 따른 각 부위별 분포 백분율을 나타내고 있다. ^{54}Mn과 ^{85}Sr의 부위별 분포율은 대체로 잎>줄기>괴경육>괴경껍질의 순으로 경엽부에 90~95% 이상 분포하였다. ^{60}Co과 ^{137}Cs도 괴경보다 경엽부에 더 많이 분포하였으나 괴경육에서의 분포율이 각각 20% 및 30% 정도나 되어 ^{54}Mn나 ^{85}Sr보다 훨씬 높았다. Steffens 등[9]도 ^{60}Co와 ^{137}Cs의 괴경 분포율이 ^{90}Sr이나 ^{54}Mn보다 훨씬 높다는 것을 보여 주었고 Andersen[10]도 ^{137}Cs와 ^{89}Sr에 대해서 그와 같은 결과를 보고한 바 있다. 이런 것들로 볼

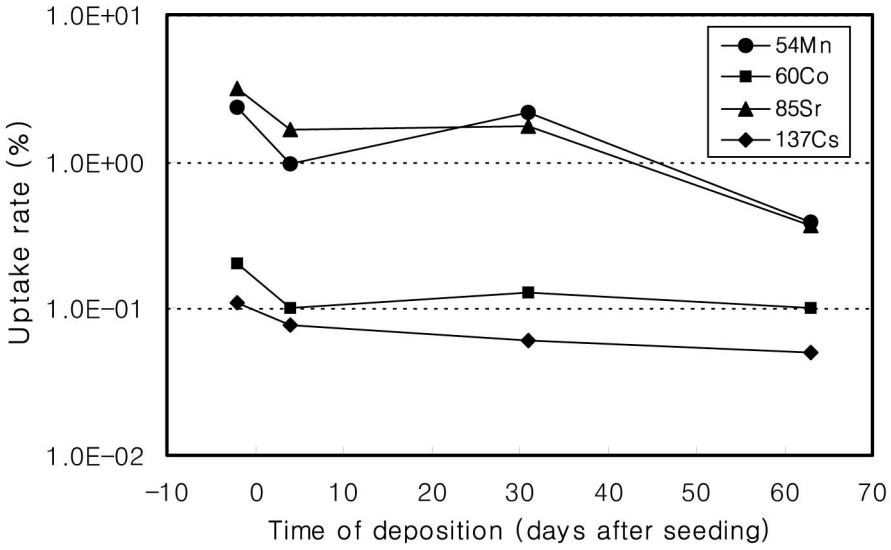

Fig. 1. Uptake rates of ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs by plants following radionuclide depositions at different growth stages of potato. Radioactivities contained in the roots are not included.

Table 2. Distribution of ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs among plant compartments following radionuclide depositions at different growth stages of potato.

Radionuclide	Time of deposition*		Percent distribution in each compartment			
	(DAS)	(DTH)	Leaf	Stem	Tuber skin	Tuber flesh
^{54}Mn	-2	92	71.7±0.9	25.9±1.0	0.8±0.2	1.6±0.3
	4	86	67.1±3.0	27.6±1.0	1.2±0.8	4.0±1.7
	31	59	71.9±3.4	24.3±1.5	1.4±1.2	2.4±0.8
	63	27	52.7±3.4	42.9±5.3	1.5±1.1	2.8±1.4
^{60}Co	-2	92	41.2±6.0	38.7±5.4	2.9±0.3	17.2±0.6
	4	86	51.2±7.2	30.3±6.0	3.1±1.5	15.4±5.4
	31	59	43.6±9.2	34.1±2.4	3.0±1.9	19.3±7.9
	63	27	29.0±8.0	43.5±6.0	3.4±0.9	24.0±4.8
^{85}Sr	-2	92	57.9±1.4	38.2±1.4	1.4±0.2	2.5±0.4
	4	86	52.4±5.1	43.7±3.4	1.6±1.3	2.3±1.9
	31	59	55.3±5.4	36.7±0.2	2.9±2.6	5.2±2.9
	63	27	42.1±3.0	52.8±6.3	2.7±1.8	2.4±1.6
^{137}Cs	-2	92	38.1±4.2	14.9±2.4	7.8±0.3	39.2±2.3
	4	86	54.3±6.6	12.5±2.8	5.6±1.1	27.5±5.2
	31	59	47.0±18.2	12.9±2.0	7.1±5.4	33.0±16.3
	63	27	79.0±6.9	12.9±5.0	2.8±1.0	5.4±1.6

*DAS: days after seeding, DTH: days to harvest
Minus signs denote a pre-seeding deposition.

때 방사성 Co와 Cs가 방사성 Mn이나 Sr보다 작물체내 이동성이 높아 흡수 후 괴경 부위로 비교적 용이하게 이동하여 괴경에 상대적으로 많이 축적되는 것으로 볼 수 있다. 벼, 밀, 보리, 콩 등의 종실에 대해서도 유사한 경향들이 보고되어 있다[11-14]. 한편, ^{137}Cs를 제외하고는 파종 전 침적시의 괴경 분포율이 생육 중 침적에 비해 높은 편이 아니었다. 이것은 앞에서 언급된 파종 전 침적시의 높은 흡수율(그림 1)이 괴경흡수의 증대보다는 뿌리흡수의 증대에 더 크게 의존하고 있다는 것을 암시하는 것 일 수 있다.

생육 후기 침적시 ^{137}Cs의 괴경 분포율은 나머지 핵종들과는 달리 타 침적 시기에 비해 훨씬 낮았고 잎 분포율은 그만큼 높았다. 이것은 이때가 괴경의 비대가 많이 진행된 상태로서 ^{137}Cs이 흡수된 후 괴경으로 효과적으로 이동하지 못했던 결과인 것으로 볼 수 있다. 반면에 침적 후 수확까지 대체로 괴경의 발육기 전체를 포함하게 되는 파종 전이나 생육 초기 및 중기 침적시에는 ^{137}Cs의 괴경 분포율이 매우 높았다. 또한 여기서 괴경의 형성이 시작되기 훨씬 전인 파종 전과 생육 초기 침적에서도 생육 중기 침적 못지않게 높았다. 따라서 ^{137}Cs의 괴경으로의 이동·축적은 괴경이 왕성하게 비대할 때 특히 활발하며 뿌리로부터 줄기를 통한 괴경으로의 직접전류뿐만 아니라 일단 잎에 축적되었다가 괴경의 비대와 함께 괴경으로 이동하는 간접전류도 중요한 것으로 추정된다.

3.2 토양-작물체 전이계수

^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs를 감자의 생육단계별로 토양에 처리하여 각 핵종의 토양-작물체 전이계수(m^2 kg^{-1}-fresh)를 조사하였고 파종 전 처리에 대해서는 처리 후 3 년에 걸쳐 전이계수의 변화를 관찰하였다.

3.2.1 침적 당년도 전이계수

핵종의 토양침적 시기에 따른 침적 당년도 핵종별 및 작물체 부위별 전이계수는 표 3과 같다. 조사 핵종 간에 전이계수는 대체로 ^{85}Sr≥^{54}Mn>^{60}Co≥^{137}Cs의 순이었고 부위 간에는 대체로 잎>줄기>괴경껍질>괴경육의 순이었으나 ^{137}Cs의 경우 괴경껍질이 줄기보다 다소 높았다. 이처럼 방사성 핵종의 전이계수 또는 농도가 경엽부에서 괴경보다 높은 것은 Andersen[10], Evans와 Dekker[15], Gerzabek[16], Steffens 등[9]의 실험에서도 나타났다.

^{54}Mn과 ^{85}Sr 전이계수는 어느 침적시기에서나 부위에 따른 변이가 수 십 배에 달하였으나 이동성이 높은 ^{60}Co와 ^{137}Cs은 대체로 10 배 이내였다. 각 부위에서의 핵종 간 변이는 대체로 잎과 줄기의 경우 수 십 배에 달하였으나 괴경육과 껍질의 경우 10 배 이내였다. 이것은 흡수율이 낮았던 ^{60}Co와 ^{137}Cs이 흡수율이 높았던 ^{54}Mn과 ^{85}Sr보다 작물체내 이동성이 높아 괴경으로의 전류가 훨씬 활발했던 결과인 것으로 보인다.

Table 3. Soil-to-plant transfer factors of ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs for four compartments of potato plants as influenced by the time of radionuclide deposition.

Radionuclide	Time of deposition*		TF_a values for each compartment (m^2 kg^{-1} fresh)			
	(DAS)	(DTH)	Leaf	Stem	Tuber skin	Tuber flesh
^{54}Mn	-2	92	$1.5\times10^{-2}\pm3.1\times10^{-3}$	$5.9\times10^{-3}\pm1.0\times10^{-3}$	$9.4\times10^{-4}\pm3.9\times10^{-4}$	$1.9\times10^{-4}\pm3.3\times10^{-5}$
	4	86	$7.0\times10^{-3}\pm2.2\times10^{-3}$	$2.5\times10^{-3}\pm8.5\times10^{-4}$	$3.1\times10^{-4}\pm5.4\times10^{-5}$	$1.2\times10^{-4}\pm4.5\times10^{-5}$
	31	59	$1.4\times10^{-2}\pm5.2\times10^{-3}$	$5.0\times10^{-3}\pm1.9\times10^{-3}$	$9.1\times10^{-4}\pm5.1\times10^{-4}$	$1.8\times10^{-4}\pm1.9\times10^{-5}$
	63	27	$2.1\times10^{-3}\pm4.9\times10^{-4}$	$1.7\times10^{-3}\pm4.1\times10^{-4}$	$2.7\times10^{-4}\pm1.4\times10^{-4}$	$5.0\times10^{-5}\pm1.9\times10^{-5}$
^{60}Co	-2	92	$7.5\times10^{-4}\pm1.9\times10^{-4}$	$7.5\times10^{-4}\pm1.4\times10^{-4}$	$2.9\times10^{-4}\pm5.4\times10^{-5}$	$1.8\times10^{-4}\pm2.7\times10^{-5}$
	4	86	$5.8\times10^{-4}\pm3.0\times10^{-4}$	$2.8\times10^{-4}\pm1.1\times10^{-4}$	$8.2\times10^{-5}\pm1.4\times10^{-5}$	$5.1\times10^{-5}\pm2.1\times10^{-5}$
	31	59	$5.2\times10^{-4}\pm7.4\times10^{-5}$	$4.5\times10^{-4}\pm1.8\times10^{-4}$	$1.4\times10^{-4}\pm7.7\times10^{-5}$	$9.0\times10^{-5}\pm3.2\times10^{-5}$
	63	27	$2.9\times10^{-4}\pm6.5\times10^{-5}$	$4.5\times10^{-4}\pm7.9\times10^{-5}$	$1.7\times10^{-4}\pm2.6\times10^{-5}$	$1.1\times10^{-4}\pm1.8\times10^{-5}$
^{85}Sr	-2	92	$1.6\times10^{-2}\pm1.9\times10^{-3}$	$1.1\times10^{-2}\pm1.2\times10^{-3}$	$2.1\times10^{-3}\pm2.3\times10^{-4}$	$4.0\times10^{-4}\pm7.1\times10^{-5}$
	4	86	$9.4\times10^{-3}\pm2.7\times10^{-3}$	$6.8\times10^{-3}\pm2.3\times10^{-3}$	$6.4\times10^{-4}\pm2.6\times10^{-4}$	$1.1\times10^{-4}\pm5.2\times10^{-5}$
	31	59	$9.0\times10^{-3}\pm2.6\times10^{-3}$	$6.1\times10^{-3}\pm1.7\times10^{-3}$	$1.6\times10^{-3}\pm9.8\times10^{-4}$	$3.1\times10^{-4}\pm1.1\times10^{-4}$
	63	27	$1.6\times10^{-3}\pm3.6\times10^{-4}$	$2.0\times10^{-3}\pm3.5\times10^{-4}$	$4.7\times10^{-4}\pm2.5\times10^{-4}$	$4.0\times10^{-5}\pm2.4\times10^{-5}$
^{137}Cs	-2	92	$3.7\times10^{-4}\pm1.3\times10^{-4}$	$1.5\times10^{-4}\pm1.8\times10^{-5}$	$3.9\times10^{-4}\pm7.4\times10^{-5}$	$2.1\times10^{-4}\pm3.3\times10^{-5}$
	4	86	$4.7\times10^{-4}\pm2.9\times10^{-4}$	$9.0\times10^{-5}\pm4.6\times10^{-5}$	$1.2\times10^{-4}\pm5.6\times10^{-5}$	$6.9\times10^{-5}\pm3.4\times10^{-5}$
	31	59	$2.5\times10^{-4}\pm5.3\times10^{-5}$	$7.7\times10^{-5}\pm3.5\times10^{-5}$	$1.5\times10^{-4}\pm7.8\times10^{-5}$	$7.0\times10^{-5}\pm3.5\times10^{-5}$
	63	27	$3.8\times10^{-4}\pm2.0\times10^{-4}$	$5.7\times10^{-5}\pm2.2\times10^{-5}$	$5.8\times10^{-5}\pm5.2\times10^{-6}$	$1.1\times10^{-5}\pm2.4\times10^{-6}$

* DAS: days after seeding, DTH: days to harvest.
Minus signs denote a pre-seeding deposition.

파종 전 침적시 전이계수는 어느 경우나 흡수율에서와 같이 생육 중 침적보다 높았다. 가장 큰 차이를 보인 것은 ^{137}Cs의 괴경육 전이계수로서 파종 전 침적과 생육 후기 침적 간에 20 배 정도의 차이를 나타내었다. 이것은 두 침적시기 간 ^{137}Cs의 흡수율(그림 1)과 괴경 분포율(표 2)의 차이에 따라 예상될 수 있는 결과이다.

세 번의 생육 중 침적에서는 괴경부(괴경육과 껍질)의 경우 ^{54}Mn, ^{85}Sr, ^{137}Cs 전이계수는 중기 침적 시에 제일 높았고 후기 침적 시에 제일 낮았으나 ^{60}Co 전이계수는 후기 침적 시 중기 침적보다 약간 높았다. 이처럼 괴경부 전이계수가 대체로 중기 침적에서 가장 높은 것은 중기 침적에서 흡수율이 가장 높았거나(그림 1) 또는 이때부터 괴경이 비대하기 시작하여 흡수된 핵종이 활발하게 괴경으로 전류되었기 때문인 것으로 추정된다. 한편, 생육 중기 침적 ^{85}Sr의 괴경 전이계수는 초기 및 후기 침적이나 타 핵종에 비해 크게 높았다. 이것은 위에서 언급된 ^{90}Sr의 괴경흡수 용이성이 어느 정도 반영된 결과인 것으로 해석될 수 있다. 생육 중 침적 시 경엽부에 있어서는 ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 경우 대체로 침적시기가 이를수록 전이계수가 높았으나 ^{54}Mn의 경우에는 흡수율이 특히 높았던 중기 침적에서 전이계수가 가장 높았고 후기 침적에서 가장 낮았다.

감자의 괴경은 조리 및 식생활 습관에 따라 껍질을 벗겨내기도 하고 그대로 두기도 한다. ^{54}Mn과 ^{85}Sr의 괴경껍질 전이계수는 괴경육 전이계수보다 처리시기에 따라 각각 3~5 배 및 5~12 배 정도까지 높았으나 ^{60}Co 경우 차이가 2 배 이내였고 ^{137}Cs의 경우도 후기 처리만 제외하면 차이가 최고 2 배 정도였다. 따라서 감자의 껍질을 벗겨내면 특히 방사성 Sr의 인체흡수를 꽤 크게 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

우리나라에서는 본 연구 외에 감자의 토양-작물체 전이계수가 조사된 사례를 찾아보기 어렵다. 최 등[3]이 작물의 가식부위가 감자와 비교적 유사한 무에 대해서 본 연구와 거의 동일한 방법으로 실험한 결과에 의하면 무 뿌리의 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs 전이계수(TF_a, m^2 kg^{-1}-fresh)는 침적시기에 따라 각각 9.4×10^{-5}~3.0×10^{-4}, 1.1×10^{-4}~5.3×10^{-5}, 4.1×10^{-2}~2.1×10^{-3}, 7.0×10^{-6}~4.3×10^{-5}의 범위로 ^{137}Cs만 괴경 전이계수(괴경육과 껍질을 함께 고려)보다 다소 낮았을 뿐 대체로 괴경과 큰 차이가 없었다.

해외의 경우 Knatko 등[17]이 1995 년 벨라루스 내 325 곳에서 토양과 감자의 괴경 시료를 채취하여 체르노빌 사고에 기인한 ^{137}Cs의 전이계수(TF_a, m^2 kg^{-1}-fresh)를 측정한 결과를 보면 대부분의 값이 2.1×10^{-4} 이하였고 최빈치는 2.0×10^{-5} 정도였다. 본 연구의 파종 전 침적에서 이 값보다 10 배 이상 높

게(괴경육과 껍질을 함께 고려할 때) 측정된 것은 침적 후 9년이 경과한 그들의 조사에 비해 본 연구에서 ^{137}Cs의 토양에 의한 고정 정도가 훨씬 낮았던 것과 어느 정도 관련이 있을 것으로 보인다. 또한 토양의 특성과 품종에 따른 차이가 포함된 것일 수도 있다.

Gerzabek 등[16]이 네 가지 토양으로 포트실험을 수행하고 보고한 바에 의하면 감자 잎과 괴경에 대한 건조중 기준의 ^{60}Co TF_m값의 중위수는 각각 7.3×10^{-2} 및 1.4×10^{-2}이었고 ^{137}Cs TF_m값의 중위수는 각각 1.6×10^{-1} 및 8.9×10^{-2}이었다. 이 네 값들에 대해 생체중 대 건조중의 비로 0.2[2,18]를 적용하면 생체중 기준의 TF_m 값은 차례로 1.5×10^{-2}, 2.8×10^{-3}, 3.2×10^{-2}, 1.8×10^{-2}가 된다. Tsukada와 Nakamura[18]는 1991 년부터 1994 년까지 일본 아오모리 일대 26 곳의 밭에서 토양과 감자 괴경을 채취하여 조사한 괴경육의 ^{137}Cs TF_m값이 건조중 기준으로 3.7×10^{-3}~1.6×10^{-1}(기하평균: 3.0×10^{-2})의 범위인 것으로 보고하였다. 이것도 위와 같이 생체중 기준으로 환산하면 7.4×10^{-4}~3.2×10^{-2}(기하평균: 6.0×10^{-3})가 된다.

본 실험으로 얻은 파종 전 침적 시 TF_a 값을 위와 같은 TF_m 값과 비교하기 위해서는 TF_a 값을 단위가 없는 TF_m 값으로 환산해야 한다. 이는 근사적으로 TF_a값에 m^2 당 깊이 15 cm까지의 토양 무게, 즉 180 kg^2(토양의 가비중을 1.2로 가정)를 곱해 주면 된다[3,6,12]. 이렇게 하면 잎과 괴경육의 ^{60}Co TF_m값은 각각 1.4×10^{-1} 및 3.2×10^{-2}이 되고 ^{137}Cs TF_m값은 각각 6.7×10^{-2} 및 3.8×10^{-2}이 된다. 이러한 값들은 같은 종류의 값들끼리 비교할 때 Tsukada와 Nakamura의 값보다는 수 십 배까지 높았고 Gerzabek 등의 값보다는 ^{137}Cs의 경우 2배 가량 높았으나 ^{60}Co의 경우 10 배 정도나 높았다.

Tsukada와 Nakamura의 전이계수가 본 조사치보다 낮은 것은 그들의 값이 고정이 많이 진행된 낙진 ^{137}Cs에 대한 것이었다는 점과 어느 정도 관련이 있을 수 있다. 본 실험과 같이 방사성 용액을 토양에 처리하여 구한 Gerzabek 등의 값과 본 조사치가 수 배 정도 차이가 나는 것은 세부적 실험방법, 토양 특성 및 작물 품종 등의 차이에 크게 기인하는 것으로 추정된다. 또한 상기와 같은 환산은 단순화된 가정에 기초한 것이므로 실제와 다를 수 있다는 점을 염두에 둘 필요가 있다.

3.2.2 전이계수의 연차변화

감자의 파종 전 침적 후 3 년에 걸쳐 연차적으로 조사한 부위별 전이계수는 표 4에서 보는 바와 같다. 침적 2 년차 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs 전이계수는 침적 1 년차 전이계수에 비해 각각 작물체 부위에 따라 50~65%, 50~65%, 30~45%, 30~60% 정도 감소하였다. ^{54}Mn와 ^{60}Co 전이계수는 침적 3 년차에도 비교적 크게 감소하여 각각 부위에 따라 침적 1 년차 전이계수의 10~25% 및 20~25% 정도에 불과하였다. 이에 반해 ^{137}Cs 전이계수는 침적 3 년차에는 거의 감소하지 않아 침적 3 년차와 2 년차 전이계수가 비슷하였다. 위와 같은 핵종간 감소 정도의 차이에 의해 침적 3 년차 괴경 전이계수는 ^{137}Cs이 ^{54}Mn나 ^{60}Co보다 2~3 배 정도 높았다.

방사성 핵종의 침적 후 재배 년차에 따라 흡수가 감소되게 하는 주된 요인 중 하나는 토양에 의해 흡착、고정되는 핵종이 점점 증가하는 것이다. 이러한 효과가 큰 핵종으로서 가장 널리 알려져 있는 핵종은 ^{137}Cs이다[19-21]. 그러나 본 연구

Table 4. Soil-to-plant transfer factors of ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs for four compartments of potato plants in three consecutive years following a pre-seeding deposition.

Radionuclide	Year of culture	Annual TF_a values for each compartment (m^2 kg^{-1} fresh)*			
		Leaf	Stem	Tuber skin	Tuber flesh
^{54}Mn	1st	$1.5\times10^{-2}\pm3.1\times10^{-3}$	$5.9\times10^{-3}\pm1.0\times10^{-3}$	$9.4\times10^{-4}\pm3.9\times10^{-4}$	$1.9\times10^{-4}\pm3.3\times10^{-5}$
	2nd	$5.6\times10^{-3}\pm1.7\times10^{-3}$	$3.1\times10^{-3}\pm1.3\times10^{-3}$	$4.0\times10^{-4}\pm1.0\times10^{-4}$	$7.9\times10^{-5}\pm1.7\times10^{-5}$
	3rd	$3.3\times10^{-3}\pm1.9\times10^{-3}$	$1.3\times10^{-3}\pm6.1\times10^{-4}$	$1.0\times10^{-4}\pm2.2\times10^{-5}$	$4.7\times10^{-5}\pm2.1\times10^{-5}$
^{60}Co	1st	$7.5\times10^{-4}\pm1.9\times10^{-4}$	$7.5\times10^{-4}\pm1.4\times10^{-4}$	$2.9\times10^{-4}\pm5.4\times10^{-5}$	$1.8\times10^{-4}\pm2.7\times10^{-5}$
	2nd	$2.6\times10^{-4}\pm2.9\times10^{-5}$	$3.4\times10^{-4}\pm1.1\times10^{-4}$	$1.2\times10^{-4}\pm1.9\times10^{-5}$	$9.3\times10^{-5}\pm1.9\times10^{-5}$
	3rd	$1.6\times10^{-4}\pm1.1\times10^{-4}$	$1.7\times10^{-4}\pm1.1\times10^{-4}$	$6.6\times10^{-5}\pm4.2\times10^{-5}$	$4.5\times10^{-5}\pm3.5\times10^{-5}$
^{85}Sr	1st	$1.6\times10^{-2}\pm1.9\times10^{-3}$	$1.1\times10^{-2}\pm1.2\times10^{-3}$	$2.1\times10^{-3}\pm2.3\times10^{-4}$	$4.0\times10^{-4}\pm7.1\times10^{-5}$
	2nd	$8.7\times10^{-3}\pm5.3\times10^{-4}$	$7.7\times10^{-3}\pm1.8\times10^{-3}$	$1.3\times10^{-3}\pm3.8\times10^{-4}$	$2.7\times10^{-4}\pm5.5\times10^{-5}$
^{137}Cs	1st	$3.7\times10^{-4}\pm1.3\times10^{-4}$	$1.5\times10^{-4}\pm1.8\times10^{-5}$	$3.9\times10^{-4}\pm7.4\times10^{-5}$	$2.1\times10^{-4}\pm3.3\times10^{-5}$
	2nd	$1.4\times10^{-4}\pm2.1\times10^{-5}$	$1.1\times10^{-4}\pm1.7\times10^{-5}$	$2.3\times10^{-4}\pm4.0\times10^{-5}$	$1.5\times10^{-4}\pm2.9\times10^{-5}$
	3rd	$1.4\times10^{-4}\pm7.6\times10^{-5}$	$8.9\times10^{-5}\pm2.2\times10^{-5}$	$2.3\times10^{-4}\pm9.5\times10^{-5}$	$1.4\times10^{-4}\pm6.1\times10^{-5}$

* The TF_a values for the first year are those for a pre-seeding deposition in Table 3.

에서는 위에서 본 바와 같이 ^{137}Cs 전이계수의 감소 정도는 비교적 낮은 편이었다. 한편, 방사성 Sr처럼 지하 이동성이 큰 핵종의 경우 비교적 빠르게 지하로 침투하여 작물체에 의한 흡수 깊이를 벗어나는 핵종이 증가하는 것도 주요한 요인이 될 수 있다[22,23].

본 연구에서 ^{137}Cs 전이계수의 감소 정도가 비교적 낮았던 이유에 대해서는 설명하기 어려우나 이와 어느 정도 일치하는 연구 결과가 Noordijk 등[20]에 의해서도 보고된 바 있다. 즉 그들이 식토, 양토, 사토에 방사성 동위원소를 처리하고 7 년 간 일곱 가지 작물에 대해 조사한 방사성 Cs의 전이계수는 처리 후 2~4 년 경과시 평균 2.5 배, 4~7 년 경과시에는 평균 4 배 정도 감소하였으나 여기서도 감자의 연차별 방사성 Cs 전이계수의 차이는 최대 2 배에 불과해 전체적인 감소에 대한 기여는 미미한 수준인 것으로 나타났다.

4. 결 론

감자의 재배 기간 중 토양에 침적한 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{85}Sr의 토양-작물체 전이계수(TF_a, $m^2 kg^{-1}$-fresh)는 핵종, 작물체의 부위 및 침적시기에 따라 상당한 변이를 나타내었다. 따라서 감자의 재배기간 중 사고로 인한 단기적인 침적시에는 핵종 및 작물체 부위별로 침적시기에 적합한 TF_a 값을 적용하여 작물체 내 핵종 농도를 예측하는 것이 중요하다.

파종 전 침적시에는 침적 후 표토를 혼합함에 따라 생육 중 침적에 비해 TF_a 값이 크게 높았다. 이는 파종 전 침적 시에는 침적 후 파종하기까지의 밭갈이 일정이 중요하게 고려될 필요가 있음을 나타낸다. 괴경의 껍질은 괴경육에 비해 TF_a 값이 대체로 수 배 정도 높았으므로 껍질을 벗기고 먹으면 인체의 핵종 흡수를 어느 정도 줄일 수 있을 것이다. ^{54}Mn과 ^{60}Co의 TF_a 값은 재배년차에 따라 비교적 크게 감소하였으나 토양 입자에 의해 쉽게 고정되는 것으로 잘 알려져 있는 ^{137}Cs의 경우 비교적 작게 감소하였다. 이는 감자의 경우 장기적인 평가에서 ^{137}Cs의 전이에 대하여 연차효과를 과도하게 적용하지 않도록 유의할 필요가 있음을 시사한다. 감자의 핵종 흡수율은 최고 3% 정도로서 작물체를 통한 토양 핵종의 제거는 대체로 무시할 수 있는 수준이었다.

본 연구결과는 감자의 재배 기간중 방사성 핵종의 단기 침적시 영향을 예측하거나 관련 모델을 검증하는 데 활용할 수 있다. 그러나 실험이 장소, 토양, 품종, 재배법 등에 있어서 단일 조건에서만 실시되어 결과가 다양한 환경조건을 대표하지 못하고 있으므로 일반화하는 데는 문제가 있을 수 있다. 따라서 대표성이 충분한 데이터가 생산될 수 있도록 앞으로 많은 실험들이 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기연구 사업에 대한 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Ng YC, Colsher CS, Thompson SE. Soil-to-plant concentration factors for radiological assessments. Report NUREG/CR-2975, UCID-19463. Lawrence Livermore Lab., USNRC. 1982.
2. International Atomic Energy Agency. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. IAEA. Vienna. 1994.
3. Choi YH, Lee CW, Kim SR, Lee JH, Jo JS. Effects of application time of radionuclides on their root uptake by Chinese cabbage and radish. J. Environ. Radioactivity, 1998;39:183-198.
4. Choi YH, Lim KM, Park HG, Park DW, Kang HS, Lee HS. Transfer of 137Cs to rice plants from various paddy soils contaminated under flooded conditions at different growth stages. J. Environ. Radioactivity, 2005;80:45-58.
5. 농림부. 농림통계연보 2007:98-99.
6. Choi YH, Park HG, Kim SB, Choi GS, Lee JH. Soil-to-plant transfer factors and migration of radionuclides applied onto soil during growing season of cucumber. Kor. J. Environ. Agri., 1997;16:304-310.
7. Melikova MK, Baranova ZA. On the mechanism of Ca and Sr uptake (on the example of radiocalcium and radiostrontium) by potato tubers. In: Averg B, Hungate FP, eds. Radioecological Concentration Processes, Proc. Int. Sympo., Stockholm, 1966:409-413.
8. Srivastava SC, Absorption and translocation of phosphate through potato tubers. In: Radioisotopes in Soil-Plant Nutrition Studies, Proc. Int. Sympo., Bombay, IAEA, Vienna, 1962:393-396.
9. Steffens W, Führ F, Mittelstädt W. Evaluation of small scale laboratory and pot experiments to determine realistic transfer factors for the radionuclides ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{60}Co and ^{54}Mn. In: Radiation Protection - A Systematic Approach to Safety, Proc. 5th Congress Int. Radia. Protec. Soc., Jerusalem, 1980:1135-1138.
10. Andersen AJ. Investigation on the plant uptake of fission products from contaminated soils 1, Influence of plant species and soil types on the uptake of radioactive strontiumand caesium. Riso Report 170, DAEC Resercah Establishment, Riso, 1967.
11. Abbazov MA, Dergunov ID, Mikulin RG. Effect of soil properties on the accumulation of ^{90}Sr and ^{137}Cs in crops. Soviet Soil Science, 1978;10:52-56.
12. Choi YH, Jo JS, Lee CW, Hong KH, Lee JH. Root uptake of ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs deposited at different times during the growing season of rice. J. Korean Asso. Radia. Prot., 1995;20:255-263.
13. D'Souza TJ, Mistry KB. Uptake and distribution of gamma-emitting activation products ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{54}Mn and ^{65}Zn in plants. Environ. Exp. Bot., 1979;19:193-200.
14. Nisbet AF, Shaw S. Summary of a five-year lysimeter study on the time dependent transfer of ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239,240}Pu$ and ^{241}Am to crops from three contrasting soil types, 2. Distribution between different plant parts. J. Environ. Radioactivity, 1994;23:171-187.
15. Evans EJ, Dekker AJ. Comparative ^{90}Sr content of agricultural crops grown in a contaminated soil. Can. J. Plant Science, 1962;42:252-258.
16. Gerzabek MH, Strebl F, Temmel B. Plant uptake of radionuclides in lysimeter experiments. Environ. Pollu., 1998;99:93-103.
17. Knatko VA, Ageets VU, Shmigelskaya IV, Ivashikevich II. Soil-to-potato transfer of ^{137}Cs in an area of Belarus: regression analysis of the transfer factor against ^{137}Cs deposition and soil characteristics. J. Environ. Radioactivity, 2000;48:171-181.
18. Tsukada H, Nakamura Y. Transfer of ^{137}Cs and stable Cs from soil to potato in agricultural fields. Sci. Total Environ., 1999;228:111-120.

19. Cremers A, Elsen A, De Preter P, Maas A. Quantitative analysis of caesium retention in soils. Nature, 1988;335:247-249.
20. Noordijk H, Van Bergeijk KE, Lembrechts J, Frissel MJ. Impact of ageing and weather conditions on soil-to-plant transfer of radiocesium and radiostrontium. J. Environ. Radioactivity, 1992;15:277-286.
21. Squire HM, Middleton LJ. Behaviour of ^{137}Cs in soils and pastures: a long-term experiment. Radiat. Botany, 1966;6:413-425.
22. Choi YH, Kang HS, Jun I, Keum DK, Park HK, Choi GS, Lee HS, Lee CW. Transfer of ^{90}Sr to rice plants after its acute deposition onto flooded paddy soils. J. Environ. Radioactivity, 2007;93:157-169.
23. Squire HM. Long-term studies of ^{90}Sr in soils and pastures. Radiat. Botany, 1966;6:49-67.

Soil-to-Plant Transfer of ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs Deposited during the Growing Season of Potato

Yong-Ho Choi, Kwang-Muk Lim, In Jun and Dong-Kwon Keum
Nuclear Environment Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - To measure the soil-to-plant transfer factors (TF_a, m^2 kg^{-1}-fresh) of radionuclides deposited during the growing season of potato, a radioactive solution containing ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs was applied to the soil surfaces in soil boxes 2 d before seeding and three different times during the plant growth. For the pre-seeding application (PSA), radionuclides were mixed with the topsoil (loamy sand and 5.2 in pH). The plant parts investigated were leaves, stems, tuber skin and tuber flesh. The TF_a values of ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr and ^{137}Cs from the PSA were in the ranges of 1.9×10^{-4}~1.5×10^{-2}, 1.8×10^{-4}~7.5×10^{-4}, 4.0×10^{-4}~1.6×10^{-2}, 1.5×10^{-4}~3.9×10^{-4}, respectively, for different plant parts. The TF_a values from the growing-time applications were on the whole a few times lower than those from the PSA. For ^{54}Mn, ^{85}Sr and ^{137}Cs, the TF_a values from the early- or middle-growth-stage application were higher than those from the late-growth-stage application, whereas the opposite was true for ^{60}Co. Leaves and tuber flesh had the highest and lowest TF_a values, respectively, in most cases. The total uptake from soil by the four plant parts was in the range of 0.05~3.16%. In the third year following the PSA, the TF_a values of ^{54}Mn, ^{60}Co and ^{137}Cs were 11~25%, 21~25% and 38~67% of those in the first year, respectively, depending on the plant parts. The present results can be used for estimating the radiological impact of an acute radioactive deposition during the growing season of potato and for testing the validity of relevant food-chain models.

Keywords : Potato, Soil, Radionuclide, Transfer factor, Growing season, Acute deposition