

벼, 콩 및 채소류에 대한 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 토양-작물체간 전이계수*

최용호 · 김국찬 · 이창우 · 이강석 · 이정호

한국원자력 연구소

박찬걸 · 조용우

한국원자력안전기술원 방사능분석실

요 약

벼, 콩, 상치, 당근, 호박의 가식부위에 대하여 몇가지 토양에 있어서 토양-작물체간 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 전이계수를 포트 재배에 의한 방사성 추적자 흡수실험을 통하여 조사하였다. 핵종간 전이계수는 거의 모든 경우 $Zn-65 > Mn-54 > Cs-137 > Co-60$ 의 순이었다. 콩이 벼보다 전반적으로 한 자리 정도 높은 값을 보였고 채소류의 경우에는 대체로 상치에서 가장 높고 호박에서 가장 낮은 값을 보였다. 강산성 토양에서는 약산성 토양에서보다 전이계수가 훨씬 높았다. 본 조사결과에 입각하여 한국인의 섭식경로 피폭선량 평가에 이용하기 위한 각 핵종의 전이계수치가 작물별로 제안되었다.

중심어 : 전이계수, 방사성 핵종, 벼, 콩, 채소, 토양, 섭식경로

서 론

토양 속에 존재하는 핵종이 작물체에 흡수되어 가식부위로 전이. 농축되는 정도를 나타내는 전이계수(또는 농축계수)는 섭식경로를 통한 내부 피폭선량 평가 모델에서 식품중 핵종 농도를 예측하는 데 필요한 매개변수로서 건토중 핵종 농도에 대한 작물체 가식부위중 핵종 농도의 비로 정의된다[1, 2].

이러한 전이계수는 토양 조건을 비롯한 여러 가지 환경 요인에 의하여 동일 작물, 동일 핵종에 있어서도 최고 세 자리 정도까지의 변동을 나타내므로[3, 4] 보다 현실적인 평가를 위해서

는 국내 혹은 부지 고유치를 가능한 한 많이 확보하여 데이터 베이스로 이용해야 한다.

구미 각국에서는 일찍부터 방사성 낙진 및 원자력 시설의 환경영향평가와 관련하여 농작물에 의한 방사성 핵종 흡수 및 전이계수에 관한 연구가 많이 수행되어 오고 있으나[3, 5] 그들의 연구는 주요 자국의 주용 농작물을 대상으로 하였고 또한 토양과 같은 환경조건이 우리나라와는 다르므로 한국인의 피폭선량 평가에 이용하기에는 곤란한 점이 많다. 국내의 관련 연구보고로는 이 등[6], 이 등[7], 김[8] 및 최 등[9] 등의 보고가 거의 전부인 실정이다.

본 연구에서는 방사성 추적자를 이용한 온실

*이 보고는 과기처에서 시행한 특정연구과제의 일환으로 수행된 결과이다.

내 재배실험을 통하여 우리나라에서 가장 중요한 작물에 속하는 벼 및 콩과 함께 몇가지 채소류에 대하여 물리, 화학적 특성을 달리하는 다수의 토양에 있어서 주요 핵종들의 전이계수를 조사함으로써 KFOOD[10]와 같은 한국적 섭취 경로 평가코드의 데이터 베이스로 이용하고자 하였다.

재료 및 방법

벼, 콩, 당근, 상차, 호박들과 같은 주요 농작물에 대해 토양으로부터 가시부위로의 방사성 핵종 전이계수를 구하기 위하여 30평 규모의 온실내에서 포트 재배를 통하여 핵종 흡수 실험을 실시하였다.

작물별 공시품종은 각각 동진벼, 황금콩, 홍춘 5촌 당근, 뚝섬 청추면, 불암사철 애호박이었고 실험 대상 핵종은 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 네 가지로서 그 화학형은 모두 chloride형(carrier free)이었다. 재배 토양은 네 가지로서 그 물리, 화학적 특성은 표 1과 같다. 채소류에 있어서는 A와 B 두 토양에 대해서만 실험하였다.

재배용 포트는 윗내경 31cm, 아랫내경 22cm, 높이 29cm의 배수공이 없는 합성수지제로서 여기에 핵종 희석액, 비료 및 수분을 가한 토양(풍건토 기준으로 16kg내외)을 담고 일정 기간 숙성 시킨 후 파종 혹은 이식하였다.

핵종 처리는 네 핵종의 희석액을 동시에 표면에서 부터 15cm깊이 까지의 토양에 균일하게 혼합하였는데 각 핵종의 처리농도는 벼와 콩의 경우 건토 1kg당 1.3~1.4 μ Ci 정도였고 채소류의 경우에는 건토 1kg당 0.4~0.5 μ Ci정도였다.

시비는 기비의 경우 15cm 깊이까지 균일하게 사용하였고 추비의 경우에는 지표면에 사용하였다. 벼에는 포트당 기비로 요소 1.1g, 용성인비 2.9g, 염화칼리 0.6g, 석회 6.5g을, 추비로 요소 1.0g 및 염화칼리 0.6g을 주었고 콩에는 전량을 기비로 포트당 요소 0.4g, 용성인비 2.0g, 염화칼리 1.0g, 석회 6.5g을 주었다. 채소류에는 포트당 기비로 요소 1.4g, 용성인비 4.9g, 염화칼리 0.9g, 석회 10g을 사용하였고 추비로는 요소 1.4g과 염화칼리 0.8g을 사용하였다(요소, 용성인비, 염화칼리, 석회 1g은 10a 당 각각 7.3kg, 3.1kg, 9.2kg, 15.4kg에 해당).

파종은 채소류의 경우 1989년 4월 28일에 상차와 당근은 전면 산파하였고 호박은 포트당 다섯 구멍에 구멍당 세 립씩 점파하였다. 벼는 모를 1990년 5월 29일에 포트당 5주 3본식으로 이식하였고 콩은 같은 날에 포트당 다섯 구멍에 구멍당 세 립씩 점파하였다. 이상의 모든 파종은 한 포트를 한 반복으로 하여 세 반복으로 실시하였다. 벼를 제외하고는 파종후 0.5cm정도 복토하였으며 또한 생육 경과에 따라 적당하게 솟아 최종적으로 포트당 당근은 다섯 개체, 상

Table 1. Physico-chemical properties of the soils used in the experiment.

Soil	pH	O.M. ^a (%)	T.N. ^b (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	C.E.C. ^c (cmol/kg)	Silt (%)	Clay (%)	Sand (%)	Texture
A	4.37	0.94	0.07	310	6.7	20.6	8.0	71.4	SL
B	6.05	0.68	0.05	375	4.7	15.3	2.8	81.9	LS
C	5.62	0.93	0.07	59	5.4	20.9	7.2	71.9	SL
D	4.60	2.43	0.16	208	7.2	26.7	6.0	67.3	SL

SL : Sandy loam LS : Loamy sand

a. Organic matter

b. Total nitrogen

c. Cation exchange capacity.

Table 2. Transfer coefficients of Mn-54, Co-60, Zn-65 and Cs-137 for the unpolished seed of the rice grown in four different soils.

Soil	Transfer coefficient (Mean, S.D.) ^a							
	Mn-54		Co-60		Zn-65		Cs-137	
A	3.2E-01, 5.0E-02	6.0E-03, 9.2E-04	2.7E+00, 4.0E-01	6.1E-02, 4.5E-03				
B	2.3E-01, 3.7E-02	—	2.3E+00, 2.4E-01	1.8E-02, 1.9E-03				
C	1.2E-01, 2.0E-02	2.2E-03, 4.7E-04	5.8E-01, 7.8E-02	3.0E-02, 2.6E-03				
D	5.2E-01, 5.0E-02	5.9E-03, 4.5E-04	2.1E+00, 3.5E-01	1.0E-01, 9.4E-3				

a. $\frac{\text{Bq/g-dry unpolished rice seed}}{\text{Bq/g-dry soil}}$

a. Data from 3 replicates.

Table 3. Transfer coefficients of Mn-54, Co-60, Zn-65 and Cs-137 for the seed of the soybean grown in four different soils.

Soil	Transfer coefficient (Mean, S.D.) ^a							
	Mn-54		Co-60		Zn-65		Cs-137	
A	2.8E-00, 4.6E-01	5.0E-01, 6.0E-02	2.3E+01, 7.8E-01	2.8E-01, 2.7E-02				
B	2.6E-01, 2.8E-02	1.6E-01, 1.3E-02	5.9E+00, 2.4E-01	1.7E-01, 1.4E-02				
C	2.0E-01, 4.9E-02	4.9E-02, 1.5E-02	2.3E-00, 6.0E-01	1.3E-01, 2.8E-02				
D	1.4E-00, 4.0E-02	2.5E-01, 3.1E-02	1.1E+01, 1.8E-01	5.0E-01, 2.9E-02				

a. $\frac{\text{Bq/g-dry seed}}{\text{Bq/g-dry soil}}$

a. Data from 3 replicates.

치는 A 토양은 다섯 개체, B 토양은 세 개체, 호박과 콩은 두 개체씩 서게 하였다.

관리는 가능한 한 관행에 준하였고 온실의 벽면은 우천시 외에는 개방하여 실내의 온도상승을 최소한으로 하였다. 벼는 등숙 중기까지 4~5cm 깊이의 관개 상태를 유지하였으며 나머지 작물은 거의 매일 작물체와 표토의 상태를 고려하여 충분히 급수하였다.

상치는 1989년 6월 20일에, 호박은 동년 6월 28일에서 7월 20일 사이에, 당근은 동년 7월 31일에, 벼와 콩은 1990년 9월 27일에 가식부위를 수확하여 생체중을 재고 천일건조한 다음 80°C 정도로 조절된 건조기내에서 다섯 시간 더 건조시켜 건조중을 재었다. 작물 수확 직후 토양 표면에서부터 15cm 깊이 사이에서 1kg 정도의 토양 시료를 채취하고 풍건한 후 110°C 정도로 조절된 건조기내에서 15시간 더 건조시켰다.

방사능 측정은 작물체의 경우 적당량의 건조

시료를 토양의 경우 50g의 건조시료를 직경 10 cm의 petri dish에 담아 Ge(Li) 반도체 검출기 (ORTEC)에 의한 γ -spectrometry법으로 실시하였다. 작물체 시료와 토양 시료내 방사능을 측정된 후 다음과 같은 식으로 전이계수(B_{iv})를 결정하였다.

$$B_{iv} = \frac{\text{작물체 가식부위중 핵종 } i \text{의 농도 (Bq/g - fresh or dry)}}{\text{건토중 핵종 } i \text{의 농도 (Bq/g-dry)}}$$

결과 및 고찰

온실내에서 포트 재배에 의한 방사성 추적자 실험을 통하여 우리나라의 주요 작물인 벼와 콩의 종실에 대하여 토양-작물체간 Mn-54, Co-60, Zn-65 및 Cs-137의 전이 계수를 토양별로 조사한 결과는 각각 표 2 및 3과 같다.

두 작물 공히 가장 높은 전이계수를 보인 핵

중은 어느 토양에서나 Zn-65였고 그다음으로는 대체로 Mn-54 > Cs-137 > Co-60의 순으로 나타났다. Zn-65와 Co-60간에는 토양에 따라 벼의 경우 2~3자리 정도의 차이를 보였고 콩의 경우 1~2자리 정도의 차이를 보며 핵종간 전이계수의 차는 벼가 콩보다 다소 큰 것으로 나타났다.

토양간 각 핵종의 전이계수를 비교해 보면 벼의 경우 Mn-54는 D토양 > A토양 > B토양 > C토양의 순이었고 Co-60는 A토양 > D토양 > C토양, Zn-65는 A토양 > B토양 > D토양 > C토양, Cs-137은 D토양 > A토양 > C토양 > B토양의 순이었는데 대체로 A 또는 D토양에서 B 또는 C토양에서보다 핵종에 따라 1.5~6배 정도 높은 값을 보여주었다. 콩의 경우에는 Mn-54, Co-60, Zn-65는 A토양 > D토양 > B토양 > C토양의 순이었고 Cs-137은 D토양 > A토양 > B토양 > C토양의 순이었는데 대체로 A 또는 D 토양에서 B 또는 C토양에서보다 핵종에 따라 1.5~14배정도 높은 값을 나타내어 전이계수의 토양간 변이 정도가 벼보다 다소 컸다고 하겠다. 또한 벼의 경우 Cs-137이, 그리고 콩의 경우에는 Mn-54가 비교적 큰 토양간 변이를 보였다.

두 작물간에 전이계수치는 전반적으로 콩이 벼보다 한 자리 정도 높은 값을 보이고 있는데 가장 차이가 큰 핵종은 Co-60으로서 토양에 따라 20~80배 정도의 차이를 보였으며 가장 차이가 작은 핵종은 Mn-54로서 토양에 따라 1~9배 정도의 차이를 보였다.

Coughtrey와 Thorne[5]은 Co가 콩과작물의 질소 고정에 필수적인 원소[11]라고 하면서 이러한 사실이 콩과작물이 목초류나 다른 곡류에 비해 높은 Co농도를 보이는 것과 관계가 있을 것으로 보았다.

프르라 등[12]이 pH 6.1의 식질 양토에서 여러 가지 시비 수준에 있어서의 현미에 대한 Cs-137 전이계수를 포트재배(포트당 약 5 μ Ci의 Cs-137 용액을 3kg의 토양에 전충 균일 처리)로 조사한 바에 의하면 포트당 퇴비 300g 첨가구에서 5.9×10^{-3} 으로 가장 낮았고 칼리 무시

용구에서 0.24로 가장 높았으며 대조구 및 석회 5~10g 첨가구에서는 대체로 0.02~0.03 정도의 값을 보여 전반적으로 본 실험과 비슷한 수준이었다. 그러나 여러 가지 실험 조건의 차이로 볼 때 이러한 값들을 가져 오게 한 요인들에 있어서는 서로 다른 점이 많았다고 볼 수 있다. 핵종의 전이계수에 미치는 환경 요인들의 영향을 정확히 분석하기 위해서는 차후보다 세밀하고 체계적인 실험이 요망되는 바이다.

우리나라의 주요 채소류인 당근, 상치, 호박의 가식부위에 대하여 두가지 토양에 있어서의 토양-작물체간 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 전이계수를 조사한 결과는 표 4와 같다.

핵종간 전이계수를 비교해 보면 벼와 콩에서와 같이 전반적으로 Zn-65 > Mn-54 > Cs-137 > Co-60의 순으로 Zn-65와 Co-60간에는 대체로 두 자리 정도의 차이를 보였는데 호박이 타작물에 비해 차이가 다소 작았다.

재배토양간에는 전체적으로 A토양이 B 토양보다 높았는데 Mn-54, Co-60, Zn-65는 대체로 한 자리 정도의 차이를 보였으나 Cs-137의 경우에는 두 토양간에 큰 차이가 없었다. 앞의 세 핵종의 경우 상치에서 토양간 차이가 가장 컸고 호박에서 가장 작았으며 Cs-137의 경우에는 당근에서 토양간 차이가 비교적 컸다.

세 작물간 전이계수는 Mn-54의 경우 상치 > 당근 > 호박의 순으로 최고 한 자리 정도의 비교적 큰 차이가 있었고 Co-60과 Zn-65의 경우는 상치와 당근간에는 큰 차이가 없었고 호박이 그들보다 다소 낮은 값을 보였으며 Cs-137의 경우 상치가 가장 높았고 당근과 호박은 서로 큰 차이가 없이 상치보다 다소 낮은 값을 보였다. 전체적으로 보면 전이계수는 엽채류인 상치가 가장 높았고 과채류인 호박이 가장 낮았는데 엽채류에서 높은 것은 생육초기부터 흡수, 축적된 방사능이 그대로 남아 가식부위의 농도에 기여하기 때문이고 과채류에서 낮은 것은 축적기간이 짧을 뿐만 아니라 축적의 전단계로 경엽부분부터의 이행과정을 거쳐야 하는 등 핵종의 축적

Table 4. Transfer coefficients of Mn-54, Co-60, Zn-65 and Cs-137 for the edible parts of the carrot, lettuce, and squash grown in two different soils.

Crop	Soil	Transfer coefficient (Mean, S.D.) ^a							
		Mn-54		Co-60		Zn-65		Cs-137	
Carrot	A	5.6E-01, 5.1E-02	5.4E-02, 2.2E-03	2.1E+00, 2.7E-01	3.1E-02, 7.0E-03				
	B	5.5E-02, 1.4E-02	7.9E-03, 2.1E-03	6.3E-01, 8.3E-02	1.7E-02, 1.6E-03				
Lettuce	A	2.7E+00, 2.4E+00	6.7E-02, 6.3E-02	3.4E+00, 2.1E+00	5.0E-02, 2.9E-02				
	B	1.2E-01, 1.5E-03	6.7E-03, 1.1E-03	4.4E-01, 5.6E-03	4.2E-02, 1.9E-03				
Squash	A	1.2E-01, 4.9E-02	1.9E-02, 6.1E-03	5.4E+01, 1.2E-01	3.9E-02, 8.5E-03				
	B	1.7E-02, 2.7E-03	4.6E-03, 3.5E-04	2.4E+01, 2.5E-02	2.5E-02, 3.2E-03				

a. $\frac{\text{Bq/g-fresh edible part}}{\text{Bq/g-dry soil}}$

a. Data from 3 replicates.

과정이 비교적 복잡하기 때문인 것으로 사료된다.

Ng등[3]이 여러 연구자들[13-21]의 보고를 정리하여 발표한 사토에서 양토에 이르는 토양에 있어서 당근과 상치의 각 핵종별 전이계수는 표 5와 같다. 본 실험치들은 이 표의 값들에 비해 대체로 Zn의 경우 한 자리정도, Cs의 경우 수배 정도 높았고 Mn과 Co의 경우 A토양에 있어서는 수배정도 높았으나 B토양에 있어서는 수배 정도 낮거나 비슷하였다. 따라서 전체적으로 볼 때 본 실험 결과가 다소 높았다고 할 수 있겠는데 이것은 아래에서 설명하는 바와 같이 본 실험에 사용한 토양이 pH가 낮은 약산성 또는 강산성 토양이라는 사실에 크게 기인하고 있다고 본다. 한편 표 5에서도 본 연구 결과와 마찬가지로 Mn과 Zn이 Co나 Cs보다 한 자리 정도 큰 값을 보였고 또한 전이계수의 작물간 차이도 본 연구와 비슷한 경향이였다.

이상에서 벼와 콩 및 채소류 공히 Mn-54와 Zn-65의 전이계수가 비교적 높게 나타난 것은 작물체의 생육에 있어서 필수 미량원소인 Mn과 Zn에 대한 작물체의 선택적 흡수와 무관하지 않을 것으로 생각되나 정확한 해석을 위해서는 작물생리학적 및 토양학적 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 본다.

또한 거의 모든 경우에 A와 D 토양에서 B와

C토양에서 보다 전이계수가 높게 조사된 것은 주로 A와 D 토양의 pH가 각각 극산성 및 매우 강한 산성으로 분류되는[22], 4.37 및 4.60으로서 약산성인 B와 C토양의 pH보다 상당히 낮았기 때문인 것으로 사료된다. 일반적으로 토양의 pH가 높으면 불용성의 침전이 형성되어 불가급태로 존재하는 핵종이 많아져 전이계수가 낮아지고 pH가 낮으면 토양에 흡착된 핵종이 수소이온에 의해 치환되어 가급태로 되므로 전이계수가 높아지게 된다[2].

한편 pH와 함께 토성도 전이계수에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데[2, 4] 공시된 네 가지 토양의 토성은 모두 모래가 주성분인 사토 계통이었으나 우리나라의 논. 밭중에는 점토 함량이 높은 식토계통의 토양도 적잖이 분포하고 있으므로[22] 이러한 토양에서의 조사도 수행되어야 할 것으로 본다. 일반적으로 점토 함량이 높은 식토계통의 토양에서는 사질토양에 비해 원소의 흡착율이 높기 때문에 전이계수가 낮아지는 경향이 있다[2]. 따라서 본 연구결과만을 이용한다면 실제보다 다소 과대평가할 가능성이 있을 것으로 보인다. 표 2에서 B토양보다 pH가 낮은 C토양에서의 전이계수가 대체로 낮게 나타난 것은 두 토양간 점토 함량의 차이에 크게 기인하는 것으로 사료된다.

전이계수는 핵종의 화학형에 따라서도 달라진

Table 5. Transfer coefficients of Mn, Co, Zn, and Cs for carrot and lettuce reported by Ng *et al.* with reference to other investigators.

Nuclide ^a	Chemical form	Crop	Soil ^b type	Cultured ^c at	Transfer ^d coefficient	Reference
Mn-S	—	Carrot	FSL	Pot	1.8E-01	[13]
Mn-54	Chloride	Lettuce	S	Pot	2.0E+00	[14]
Mn-54	Chloride	Lettuce	S	Lysimeter	4.8E-01	[15]
Mn-54	Chloride	Lettuce	SL	Pot	6.7E-01	[14]
Mn-54	Chloride	Lettuce	SL	Lysimeter	2.8E-01	[15]
Co-60	—	Carrot	SL	Field plot	2.1E-02	[16]
Co-60	Chloride	Lettuce	S	Pot	1.1E-02	[14]
Co-60	Chloride	Lettuce	S	Lysimeter	7.4E-03	[15]
Co-60	Chloride	Lettuce	SL	Pot	2.3E-02	[14]
Co-60	Chloride	Lettuce	SL	Lysimeter	3.7E-03	[15]
Zn-S	—	Carrot	FSL	Pot	8.8E-02	[13]
Zn-S	—	Lettuce	L	Field Pot	1.4E-01	[17]
Zn-S	—	Lettuce	L	Field Pot	2.6E-01	[17]
Cs-137	—	Carrot	SL	Pot	1.4E-02	[18]
Cs-137	—	Carrot	SL	Pot	1.8E-03	[18]
Cs-137	Nitrate	Carrot	SL	Pot	2.8E-02	[19]
Cs-137	Nitrate	Carrot	L	Pot	8.3E-03	[19]
Cs-137	—	Carrot	L	Field Plot	1.8E-02	[20]
Cs-137	—	Lettuce	SL	Pot	1.2E-02	[18]
Cs-137	Nitrate	Lettuce	SL	Pot	3.4E-02	[19]
Cs-137	Nitrate	Lettuce	L	Pot	9.4E-03	[19]
Cs-137	Chloride	Lettuce	SL	Box	3.5E-02	[21]
Cs-137	Chloride	Lettuce	S	Pot	4.0E-02	[14]
Cs-137	Chloride	Lettuce	S	Lysimeter	1.8E-02	[14]

a : S denotes stable.

b : F, S and L are abbreviations of Fine, Sandy and Loam, respectively.

c : Pot cultures were made in the greenhouse and the others, outdoors.

d : All data were on the basis of plant fresh weight.

다. 본 실험에 사용한 핵종들의 화학형은 전부 chloride형이었는데 표 5에서 보는 바와같이 방사성 추적자 실험에서는 주로 chloride형이 사용되며 때로 nitrate형이 사용되고 있다. 이것은 동위원소 용액이 대부분 이러한 형태로 제조되기 때문이다. Schulz등[23]은 사양토 및 양토에서 재배된 밀에 있어서 Pu-239, 240 및 Am

-241의 전이계수가 토양간에는 약 일곱 배의 차이를 보였으나 chloride형과 nitrate형 간에는 두 배 미만의 차이밖에 보이지 않았다고 하였으며 Zach[4]는 두 화학형간의 이러한 차이가 여러 동위원소들에 있어서 상당히 전형적인 것으로 보았다. 또한 표 5에서도 두 화학형간에 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었다. 실제 재배 포

장에서의 화학형은 방출 당시의 화학형 그리고 대기중에서의 반응 등에 따라 다르고 또한 토양 내에서도 각종 반응에 의해 변하므로 실험목적에 가장 적합한 화학형을 선택하기 위해서는 평가 부지별로 대표적인 화학형을 직접 조사하는 것이 최상의 방법이라고 하겠다. 따라서 보다 현실적인 평가를 위해서는 차후 여기에 대해서도 자세히 연구해 볼 필요가 있다고 본다.

이상과 같은 조사 결과로 한국인의 피폭선량 평가에 이용하기 위한 전이계수치를 제안하기 위해서는 우리나라 농경지의 pH와 같은 주요한 농업환경 요인을 검토할 필요가 있다. 1973년에 조사된 우리나라 논토양 pH의 평균범위는 4.4~6.8로, 평균, 5.5로 조사되었으며 밭에 있어서도 1964~1973년에 걸쳐 평균이 5.4~5.7로 조사되어[22] 논과 거의 같은 수준이었다. 또한 1976~1981년 사이 논토양의 pH는 평균 5.6~5.8정도인 것으로 조사[24]된 바 있어 년차적 변화가 거의 없음을 보여 주고 있다. 따라서 우리나라 농토는 중간 내지 약한 산성 토양이 주종을 이룬다고 하겠다.

이러한 pH 수준으로 볼때 벼와 콩에 대한 네 토양에서의 전이계수치중 A토양과 D토양에서의 값을 모두 고려하여 제안치를 결정하면 너무 과대한 값을 얻게 될 것으로 예상되므로 극히 낮은 pH를 보인 A토양을 제외한 세 토양에서의 측정치로 제안치를 결정하는 것이 적당할 것

으로 사료된다. 한편 채소류에 있어서는 A와 B 두 토양에서의 측정치 밖에 없으므로 두가지 측정치를 그대로 이용하는 것이 최선의 방법이라고 하겠다.

그런데 동일 작물, 동일 핵종에 있어서 전이계수치는 대체로 log-normal 분포를 보이는 것으로 알려져 있으므로[25,26] 다수의 값에 대한 대표치로는 기하평균값을 사용해야 한다. 따라서 본 연구에서도 토양별 전이계수치의 기하평균을 취하여 제안치로 삼고자 하였다.

위와같은 방법으로 각 작물에 대해 핵종별로 전이계수치를 제안하면 표 6과 같다. 그러나 이러한 제안치는 소수의 자료에 입각한 것으로 다양한 환경조건을 반영하고 있지 못하므로 대표성이 충분하지 못하다. 따라서 새로운 측정치가 얻어지는 대로 값을 계속 수정·보완해 나가야 할 것이며 그렇게 하기 위해서는 농작물의 핵종 흡수에 관한 광범위한 기초실험을 지속적으로 수행할 필요가 있다.

표 6과 같은 제안치를 KFOOD[10]와 같은 실제의 평가모델에서 이용하고자 할때는 모델이 분류하고 있는 식품군별로 적당한 값을 결정하여야 한다. KFOOD에서는 농작물을 벼, 곡류, 두류, 엽채류, 근채류, 과채류 등으로 분류하고 있는데 이중 벼와 두류에 대해서는 표 6의 제안치중 각각 벼와 콩에 대한 값을 적용하면 될 것 이나 엽채류, 근채류, 과채류에 대해서는 각각

Table 6. Proposed values for soil-to-plant transfer coefficients of Mn-54, Co-60, Zn-65, and Cs-137 for the use in Korean radiation dose assessment.

Crop	Edible Plant part	Transfer coefficient ^a			
		Mn-54	Co-60	Zn-65	Cs-137
Rice	Seed ^b	2.4E-01	3.6E-03	1.4E+00	3.8E-02
Soybean	Seed	4.1E-01	1.2E-01	5.3E+00	2.3E-01
Carrot	Root	1.8E-01	2.1E-02	1.2E+00	2.3E-02
Lettuce	Leaf	5.5E-01	2.1E-02	1.2E+00	4.6E-02
Squash	Fruit	4.6E-02	9.4E-03	3.6E+01	3.1E-02

a. For rice and soybean, on the dry weight basis, for the rest, on the fresh weight basis.
 b. Unpolished rice seed.

상치, 당근 호박이 저기에 속하지만 각 작물군을 대표하기에는 생산과 소비면에서 비중이 낮으므로 표의 값을 그대로 적용하는 것은 문제가 있다. 따라서 우리나라에서 엽채류와 근채류의 대표적인 작물이라고 할 수 있는 배추와 무우 등에 대한 실험이 많이 수행되어야 할 것으로 본다.

결 론

온실내에서 포트 재배에 의한 추적자 실험을 통하여 얻은 몇가지 토양에서의 조사치에 입각하여 우리나라의 주요 식량작물인 벼, 콩, 당근, 상치, 호박에 대한 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 토양-작물체간 전이계수가 제안되었다.

이 제안치들은 한국인의 섭식경로 피폭선량 평가에 이용될 수 있겠으나 다양한 환경조건을 반영하고 있지 못하므로 대표성이 충분하지 못하다. 따라서 앞으로 광범위한 환경조건에 대해 실험을 계속적으로 수행하여 국내 혹은 부지 고유치에 관한 데이터 베이스를 확충함과 동시에 보다 대표성이 높은 값을 도입하여야 한다.

또한 우리의 식생활에서 중요한 위치를 차지하고 있는 배추나 무우를 비롯한 여러 다른 농작물에 대해서도 실험을 실시하여 평가모델에서 분류하고 있는 식품군을 충분히 대표할 수 있는 값을 얻을 수 있도록 해야 할 것이다.

REFERNECES

1. R. Zach, *FOOD II : An Interactive code for Calculation Concentrations of Radionuclides in Food Products*, AECL-6305, WNRE, (1978).
2. U.S.NRC, *Radiological Assessment : a Textbook on Environmental Dose analysis*, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, (1983)
3. Y.C. Ng, C.S. Colsher, and S.E. Thompson, *Soil-to-Plant Concentration Factors for Radiological Assessments*, Report NUREG/CR-2975, UCID-19463, Lawrence Livermore Lab. (1982).
4. R. Zach, *Transfer Coefficients to Terrestrial Food Products in Equilibrium Assessment Models for Nuclear Installations*, AECL-6449, WNRE(1980).
5. P.J. Coughtrey and M.C. Thorne, *Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial Ecosystems-A Critical Review of Data*, Vol.1, A.A. Balkema, Rotterdam(1983).
6. 이서래, 방사성 물질의 환경내 행동 및 영향 평가, KAERI/RR-282/81, 한국에너지연구소(1982)
7. 이정호, 원자력시설 주변의 환경영향평가연구(II), KAERI/RR-386-1/82, 한국에너지연구소(1983).
8. 김재성, Strontium-90과 Cesium-137의 답 토양별 흡. 탈착과 수도체의 흡수양상에 관한 연구, 고려대학교 박사학위 논문(1985).
9. 최용호, 정규희, 천기정, 김삼량, 이정호, "보리의 토양 Sr-90흡수 및 토양-작물체 전이계수", 대한방사선방어학회지, 16(1), 33-42(1991).
10. 이정호, 섭식경로 및 호흡에 의한 방사선내 부피폭선량 평가 코드개발, KAERI/RR-820/89, 한국에너지연구소, 과학기술처(1989).
11. E. Epstein, *Mineral Nutrition of Plants : Principles and Perspective*, John Wiley Sons, New York(1972).
12. 쓰무라 아키토, 코마무라 미사코, 코바야시 히로노부, 토양 및 토양-작물계에 있어서 방사성 스트론튬과 세시움의 거동에 관한 연구, 농기연보 B, 제36호(1984).
13. A.K. Furr, W.C. Kelly, C.A. Bache,

- W.H. Gutenmann, and D.J. Disk, "Multielement uptake by vegetables and millet grown in pots on fly ash amended soil", *J. Agr. Food Chem.*, **24**, 885-888, (1976).
14. W. Steffens, F. Fuehr, and W. Mittelstaedt, "Evaluation of small scale laboratory and pot experiments to determine realistic transfer factors for the radionuclide Sr-90, Cs-137, Co-60 and Mn-54", in: *Radiation Protection, A Systematic Approach to Safety*, Proc. of the 5th Congress of the International Radiation Protection Society, Jerusalem, March 1980, Vol. 2, pp 1135-1138, Pergamon Press(1980).
 15. W. Steffens, W. Mittelstaedt, and F. Fuehr, "The transfer of Sr-90, Cs-137, Co-60 and Mn-54 from soils to plants -results from Lysimeter experiments", in: *Radiation Protection, A Systematic Approach to Safety*, Proc. of the 5th Congress of the International Radiation Protection Society, Jerusalem, March 1980, Vol. 2, pp 1139-1143, Pergamon Press(1980).
 16. W.E. Grummitt, "Transfer of Cobalt-60 to plants from soils treated with sewage sludge", in: *Radioecology and Energy Resources*, Proc. of the Fourth National Symposium on Radioecology, May 12-14, 1975, Oregon State University, Corvallis, Oregon, pp 331-335, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., Stroudsburg, Pa(1975).
 17. W.J. Garcia, C.W. Blessin, G.E. Inglett, and W.F. Kwolek, "Metal accumulation and crop yield for a variety of edible crops grown in diverse soil media amended with sewage sludge", *Env. Sci. Tech.*, **15**, 793-804(1981).
 18. J.W. Neel, J.H. Olafson, A.J. Steen, B.E. Gillooly, H. Nishita, and K.H. Larson, *Soil-Plant Interrelationships with Respect to the Uptake of Fission Products: I. The Uptake of Sr-90, Cs-137, Ru-166, Ce-144, and Y-91*, UCLA-247, University of California at Los Angeles, CA(1953).
 19. E.M. Romney, J.W. Neel, H. Nishita, J.H. Olafson, and K.H. Larson, "Plant uptake of Sr-90, Y-91, Ru-106, Cs-137, and Ce-144 from soils", *Soil Sci.*, **83**, 369-376(1957).
 20. L. Fredriksson, H. LoensJoe, and A. Eriksson, *Studies on Plant Accumulation of Fission Products under Swedish Conditions X. Absorption of Sr-90 and Cs-137 from Soil by Vegetable Crops*, C-4387-28, Research Institute of National Defence, Dept. 4, Stockholm, Sweden (1969).
 21. J.D. Sartor, W.B. Lane, and J.J. Allen, *Uptake of Radionuclide by Plants*, AD-649009, Stanford Research Institute, Menlo Park, Ca(1966).
 22. 조백현, 신고토양학, 향문사, 서울(1980).
 23. R.K. Schulz, G.M. Tompkins, and K. L. Babcock, "Uptake of plutonium and americium by plants from soils", in: *Transuranium Nuclides in the Environment*, Proc. of the Symposium on Transuranium Nuclides in the Environment, San Francisco, CA, 17-21 Nov. 1975, IAEA, Vienna, pp 303-310(1976).
 24. 이은웅, 4정 수도작, 향문사, 서울(1988).
 25. C.F. Baes III, D.E. Dunning, Jr., D.

E. Fields, F.O. Hoffman, *A Statistical Analysis of Selected Parameters for Predicting Food Chain Transport and Internal dose of Radionuclides*, NUREG/CR-1004, ORNL/NUREG/TM-282, (1979).

26. C.F. Baes III, R.D. Sharp, A.L. Sjoreen, and R.W. Shor, *A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture*, ORNL-5786 (1984)

Soil-to-Plant Transfer Coefficients of Mn-54, Co-60, Zn-65 and Cs-137 for Rice, Soybean and Vegetables

Yong-Ho Choi, Kug-Chan Kim, Chang-Woo Lee, Kang-Suk Lee, Jeong-Ho Lee
Environmental Research Division, KAERI

Chan-Kirl Pak, Yong-Woo Cho
Radioactivity Analysis Laboratory, KINS

ABSTRACT

Soil-to-plant transfer coefficients of Mn-54, Co-60, Zn-65, and Cs-137 were estimated for the edible parts of the rice, soybean, lettuce, carrot, and squash grown in different soils by radiotracer uptake experiments using pot cultures. The transfer coefficients of radionuclides were in the order of Zn-65 > Mn-54 > Cs-137 > Co-60 in most of the cases studied. The coefficients for soybean were roughly an order of magnitude higher than those for rice. Among vegetables, lettuce mostly showed the highest value and squash, the lowest. In the strongly acidic soils, transfer coefficients were much higher than in the moderately acidic soils. From the data obtained, crop-specific transfer coefficients of the four nuclides were proposed for the use in Korean food-chain radiation dose assessment.

Key words : *Transfer coefficient, Radionuclide, Rice, Soybean, Vegetables, Soil, Food chain.*