

## 제주도 토양의 감귤나무(*Citrus unshiu* Marc.)에서 $^{137}\text{Cs}$ 의 전이

강태우, 박원표<sup>1)</sup>, 송성준<sup>2)</sup>, 유장걸<sup>1)</sup>

제주대학교 농화학과, <sup>1)</sup>원예생명과학부  
환경생명공학전공, <sup>2)</sup>방사능이용연구소

### Transfer of $^{137}\text{Cs}$ to *Citrus unshiu* Marc. in Jeju soil

Tae-Woo Kang, Won-Pyo Park<sup>1)</sup>, Sung-Jun Song<sup>2)</sup>,  
Zang-Kual U.<sup>1)</sup>

Department of Agricultural Chemistry, <sup>1)</sup>Major of Plant Environment and Biotechnology, Faculty of Horticultural Life science, College of Agriculture, <sup>2)</sup>Applied Radioisotope Research Institute, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

#### ABSTRACT

To investigate transfer of  $^{137}\text{Cs}$  in the mandarin trees of Jeju Island, the fruits and leaves as well as the soil samples around each tree were collected from 6 mandarin orchards with different organic matter content.  $^{137}\text{Cs}$  concentration was measured by HPGe  $\gamma$ -ray spectrometry, the relationship between the transfer values and the soil chemical properties was investigated.  $^{137}\text{Cs}$  concentration in soil was in the range of 10.2~40.0 Bq/kg·dry and increased with increasing organic matter content.  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in each part of plant were in the range of MDA(minimum detectable activity)~46.8 mBq/kg·fresh(fruit), MDA~91.8 mBq/kg·fresh(peel) and MDA~235 mBq/kg·fresh(leaf), respectively. The distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in trees was showed as the following order; fruit<peel<leaf. Transfer factors of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to tree were in the range of  $2.68 \times 10^{-3}$ ~ $1.02 \times 10^{-2}$ ,  $9.07 \times 10^{-4}$ ~ $4.03 \times 10^{-3}$  and  $4.73 \times 10^{-4}$ ~ $2.04 \times 10^{-3}$  for leaf, peel and fruit, respectively. The transfer factors were as the following order;

fruit<peel<leaf.

The transfer factors of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to tree were not affected by soil pH, but decreased at the high concentration of exchangeable K and organic matter.

**Key words :**  $^{137}\text{Cs}$ , Soil, Organic matter, Mandarin tree, Transfer, Transfer factor, Annual effective dose equivalent, Jeju

#### 서 론

1950년 초기부터 대기권 핵실험과 원자력 사고로 인하여 방출된 방사성 핵종들은 여전히 환경 중에 존재하고 있으며, 앞으로 원자력 시설과 방사능동위원소 이용이 증대됨에 따라 방사성 물질이 환경으로 방출될 위험도가 늘어날 수 있다. 방사성 핵종에는 천연방사성 핵종과 핵실험 및 원자력 발전소 사고 등에 의한 인공방사성 핵종이 있다. 핵분열 생성물인 인공방사성 핵종  $^{137}\text{Cs}$ 은 비교적 긴 반감기(30.2 년)와 아주 강한 감마선(662 keV)을 가지며 그리고 인간 몸체의 체내 피폭을 평가하는데 아주 중요한 것으로 알려졌으며, 주로 낙진(fallout) 형태로 토양에 도달하여 존재한다. 그러므로 토양에 존재하는  $^{137}\text{Cs}$ 은 농작물에 의해 흡수되어 축적되고 더 나아가서는 사람의 섭취로 체내피폭을 일으킬 수 있다. 그래서 환경 중 방사능물질의 오염과 농작물에 의한 토양 중 방사성 핵종의 흡수, 이행, 축적 과정은 아주 중요하다<sup>1,2)</sup>.

방사성 핵종의 전이계수는 방사성의 핵종 종류, 농작물의 종류, 토양의 종류, 근권에서 거동, 공존원소의 종류와 농도, 방사성 핵종의 존재상태 그리고 시비조건에 따라 아주 다양하게 영향을 받는다<sup>3)</sup>. 그러므로 많은 연구자들이  $^{137}\text{Cs}$  전이계수와 토양 화학적 특성 및 물리적 특성에 대하여 보고되어,  $^{137}\text{Cs}$  전이계수는 점토 함량, K 함량, 치환성 양이온 용량, pH가 증가함에 따라서 감소한다고 하였고<sup>4-7)</sup>, 유기물 함량이 증가할수록 증가한다고 하였다<sup>5,8)</sup>. 또한 토양 pH, 점토 함량, 유기물 함량, 치환성 양이온과는 아무런 상관이 없다고 하였다<sup>6-9)</sup>.

그리고 우리 나라에서도 일부 농작물에 대해 연구가 수행되었으나, 아직까지 과실에 대해서는 보고된 예를 찾아보기가 힘들다. 감귤은 우리 나라에서 주요 과실중의 하나로써 제주도에서만 재배된다. 제주도 면적의 약 39.6%인 54,197 ha가 농경지로 이용되고 있으며, 이중 감귤 재배면적은 21,479 ha으로 아주 광범위하게 재배되고 있다<sup>10)</sup>. 그리고 제주도는 원자력 시설이 없는 지역으로 방사성 낙진으로 유도된 방사능 핵종의 이동을 관찰하기에 아주 적합하며, 또한 토양 특성은 유기물 함량이

다양하게 분포되어 있어 방사능 핵종의 흡착 또는 이동에 관한 연구를 수행하는데 유리한 지역이다.

따라서, 본 연구는 유기물 함량이 다양한 제주도 감귤원으로부터 채집된 토양과 감귤나무 중의  $^{137}\text{Cs}$  농도와 전이계수를 분석하였고, 토양화학적 특성인 pH, 치환성 K 그리고 유기물 함량과 전이계수와의 관계를 조사하였다. 또한 우리 나라 국민 1인당 감귤의 섭취에 따른 체내피폭선량의 값을 평가함으로써 만일의 원자력사고로 인한 방사능 오염에 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

### 재료 및 방법

#### 시료채취 및 전처리

##### 시료채취

본 실험에 사용된 시료는 2000년 수확기(10월~11월)에 제주도 감귤원이 밀집되어 있는 대부분 미사질 양토인 감귤원에서 채취하였다(Fig. 1). 좌표 측정은 지리정보시스템(GPS : Global Positioning System, Korea GPS Co.)을 이용하여 지리적 좌표를 확인하였다. 그리고 토양시료는 감귤나무 근권 부분에서 0~5 cm, 5~10 cm 그리고 10~20 cm 토양 깊이별로 채취하였고, 감귤(*Citrus unshiu* Marc.)과 잎도 동일한 지점에서 채취하였다.

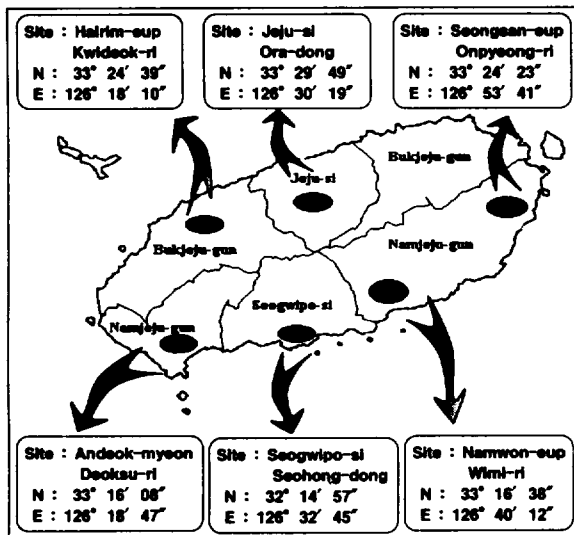


Fig. 1. Sampling sites in Jeju Island.

##### 전처리

토양시료는 풍건하여 2 mm 체를 통과시켜 준비한 다음 일부는 토양화학 특성 분석에 사용하였고, 나머지는

105℃ 건조기에서 건조한 다음 아주 미세하게 분쇄하여 계측용 시료용기(너비 50mm, 높이 70mm ; Mizuho Chemical Co., Japan)에 충전하였다. 감귤과 잎은 깨끗한 물로 이물질을 제거한 후 감귤은 껍질을 벗겨서 가식부위와 비가식 부위로 나누었고, 각각의 시료는 생중량을 칭량하였다. 그리고 감귤의 가식부위, 비가식부위 그리고 잎 시료는  $^{137}\text{Cs}$ 의 손실을 피하기 위하여 450℃ 보다 낮은 온도에서 완전히 회화한 후 계측용 시료용기에 충전하여 분석시료로 하였다.

#### 표준시료 조제 및 효율교정 방법

##### 표준시료 조제

본 실험에서 사용된 표준시료는 감마선 에너지가 100 keV에서 2 MeV 사이에 감마선을 방출하는  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{115}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{60}\text{Co}$  감마 핵종이 혼합되어 있는 감마 교정용 표준 용적선원(QCY44, Amersham Co.)을 사용하였다.

표준시료 조제는 표준 용적선원을 1 M HCl 용액으로 적당히 희석한 후, 이를 시료용기에 무게를 달고 희석된 방사능 농도를 계산하였다. 환경시료의 경우 높이를 일정하게 채우기가 곤란하기 때문에 효율 및 에너지 교정용 시료는 약 5 mm 간격의 높이별로 1 M HCl 용액으로 2.5 mm에서 50 mm까지 11개의 표준 용적선원을 제조하였다.

##### 효율교정 방법

조제된 표준시료는 고순도게르마늄 검출기(GEM-30185, EG&G Ortec, USA)와 다중과고분석기(Model 92X, EG&G Ortec, USA)으로 구성된 감마분광계에서 각 80,000초 동안 계측을 수행하였다. 계측된 스펙트럼은 효율과 에너지 교정식 및 분해능을 갖도록 Aptec program(Aptec Co.)으로 분석하였고, 감마선 에너지와 높이에 대한 내삽적인 관계식을 구하여 2.5 mm에서 50 mm까지 1 mm 간격으로 효율과 에너지 및 분해능을 갖는 교정 spectrum을 만들었다. 그리고 시료의 물질과 감마선이 상호작용을 일으켜 시료의 자체흡수효과(self-absorption effect)를 나타내기 때문에 표준 용적선원과 시료의 겉보기 밀도가 다를 경우 계측효율이 감소하는 경향이 있다<sup>11)</sup>. 따라서, 시료의 자체흡수효과 보정은 한국원자력안전기술원의 분석방법에 따라서 수행하였다<sup>12)</sup>.

#### 식물체와 토양시료중 $^{137}\text{Cs}$ 방사능 분석 및 토양시료중 화학적 특성 분석

**<sup>137</sup>Cs 방사능 분석**

회화된 식물체와 건조된 토양 시료는 고순도게르마늄 검출기(GEM-30185, EG&G Ortec, USA)와 다중과고분석기(Model 92X, EG&G Ortec, USA)로 구성된 감마분광계로 <sup>137</sup>Cs을 분석하였다.

계측시간은 토양 시료의 경우 50,000초 동안, 식물체 시료의 경우 200,000 ~ 300,000초 동안 계측하였다. 계측된 스펙트럼은 Aptec software(Aptec Co.)를 사용하여 감마 핵종 <sup>137</sup>Cs을 분석한 후 각각의 시료에 대해 자체 흡수에 의한 밀도 보정을 수행하였다. 토양시료의 최소 검출하한치(MDA : Minimum Detectable Activity)는 1.12 Bq/kg · dry이었고, 식물체 시료는 5.75 mBq/kg · fresh이었다.

**화학적 특성 분석**

토양시료 중 화학적 특성 분석인 경우, 토양 pH는 1:5 법(Mclean, 1982), 유기물 함량은 Walkley-Black 법(Nelson & Sommers, 1982)으로 분석하였다. 그리고 치환성 양이온은 1N Ammonium acetate 법(Thomas, 1982)으로 추출하여 유도결합플라즈마 방출 분광계(JV138ULTRACE, Jobin Yvon, France)를 사용하여 측정하였다.

**결과 및 고찰**

**토양의 화학적 특성과 <sup>137</sup>Cs 농도**

Fig. 2는 토양 중 유기물 함량과 <sup>137</sup>Cs 농도와 관계를 나타내었다. 유기물 함량이 증가할수록 <sup>137</sup>Cs의 농도는 증가하였고 직선성은  $y=1.123x+8.965$ 이었으며, 이때 상관계수  $r$ 은 0.706\*\*으로 아주 높은 상관성을 보였다. 이런 결과는 높은 유기물 함량을 가지는 제주도 화산회토 특성 때문에 <sup>137</sup>Cs이 유기물에 강하게 흡착한 결과라고 판단된다. 그리고 김 등(1995), 이 등(1997) 그리고 김 등(1999)에 의해 보고된 상관계수  $r$ 은 0.77\*\*, 0.78\*\* 그리고 0.68\*\*와 일치한 경향을 보였다<sup>13-15)</sup>.

**감귤나무에서 <sup>137</sup>Cs의 분포**

Fig. 3은 토양 유기물과 감귤나무 부위별 <sup>137</sup>Cs 분포와의 관계를 나타내었다. 식물체 중 <sup>137</sup>Cs 농도는 가식부위의 경우는 검출하한치 이하~46.8 mBq/kg · fresh, 껍질은 검출하한치 이하~91.8 mBq/kg · fresh, 잎은 검출하한치 이하~235 mBq/kg · fresh의 범위이었다. 감귤나무 <sup>137</sup>Cs의 분포는 유기물 함량에 따라 달라지는데 유기물 함량이 8%이상으로 비교적 높은 서홍동, 덕수리, 온평리

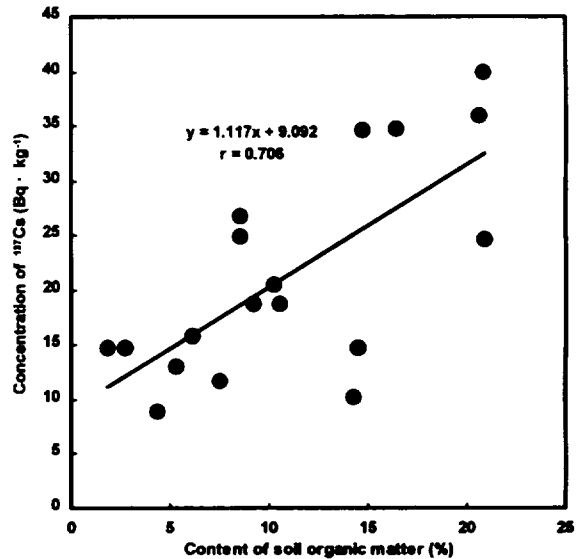


Fig. 2. The relationship between contents of soil organic matter and concentrations of <sup>137</sup>Cs in citrus orchard soils.

그리고 위미리 지역에서는 감귤의 잎, 껍질 그리고 가식 부위에서 모두 검출되었으나, 8% 이하인 오라동과 귀덕리에서는 검출되지 않았다.

감귤나무 부위별 <sup>137</sup>Cs함량은 지역에 따라 다른 경향을 보였다. 잎의 <sup>137</sup>Cs함량은 다른 지역에 비해 서홍동은 2배 이상이었으나, 껍질과 가식부위는 지역간의 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 부위별 함량정도는 잎, 껍질, 가식부위로 갈수록 <sup>137</sup>Cs의 함량이 적어지는 경향을 나타내었다.

감귤나무의 <sup>137</sup>Cs 뿌리흡수는 뿌리의 발육상태, 뿌리 주위의 <sup>137</sup>Cs의 분포 그리고 토양특성에 따라 달라질 것으로 판단되어진다. 특히, 서홍동 지역의 감귤나무에서 잎의 <sup>137</sup>Cs함량이 매우 높게 나타나는 것은 다른 지역에 비해 잔뿌리가 매우 발달되어 양분흡수율이 많이 하게 된 결과라고 판단된다.

부위별 함량정도가 잎, 껍질, 가식부위로 갈수록 적어지는 경향을 보였는데, 이는 Skarlou 등(1999)의 오렌지 나무를 이용한 실험에서 식물체내에서의 <sup>137</sup>Cs 이동은 잎에서 <sup>137</sup>Cs이 과포화 상태로 인하여 가식부위로 이동된다는 예상과 상반되는 결과였다<sup>16)</sup>. 그러므로 이것을 명확히 규명하기 위해서는 앞으로 더 많은 자료를 수집하여 상세한 실험을 행할 필요가 있다.

**토양과 식물체의 <sup>137</sup>Cs 전이계수**

토양과 식물체 전이계수는 토양과 식물체중에 포함된 방사능 핵종의 농도 비율이며, 전이계수 계산방법은 토

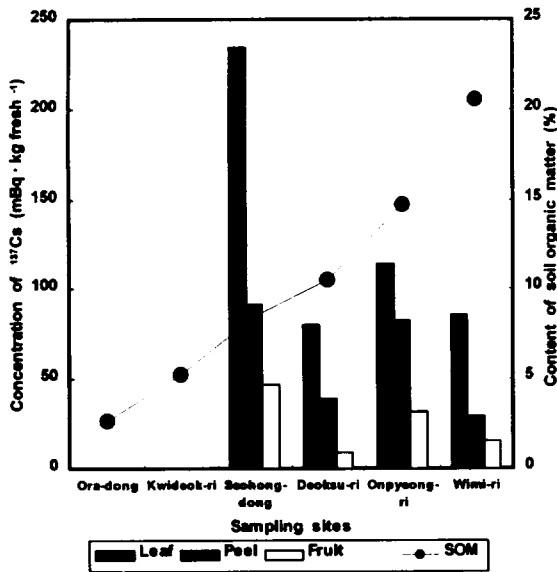


Fig. 3. The relationship between contents of soil organic matter and distributions of <sup>137</sup>Cs on citrus trees.

양의 단위무게 또는 단위면적에 대한 식물체의 생체중량 또는 건조중량의 방사능 양의 비율로 표현되어 질 수 있다. 본 연구에서는 전이계수를 식 (1)과 같이 토양의 단위무게 당 방사능 양에 대한 식물체의 생체중량 당 방사능의 양으로 계산하였다<sup>17)</sup>.

$$TF(\text{Transfer Factor}) = \frac{\text{Concentration in plant (Bq/kg·fresh)}}{\text{Concentration in soil (Bq/kg·dry)}} \quad (1)$$

식 (1)에 의해서 계산된 전이계수 값들은 Table 1에 나타내었다. 토양 중 유기물 함량이 높은 서흥동, 덕수리, 온평리 그리고 위미리 지역에서 잎, 껍질 그리고 가식부위의 전이계수 값들은 각각  $2.68 \times 10^{-3} \sim 1.02 \times 10^{-2}$ ,  $9.07 \times 10^{-4} \sim 4.30 \times 10^{-3}$  그리고  $4.73 \times 10^{-4} \sim 2.04 \times 10^{-3}$  범위를 나타내었다. 또한 유기물 함량이 낮은 오라동과 귀덕리 지역에는 식물체 중에 <sup>137</sup>Cs가 검출되지 않아서 전이계수를 계산할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 유기물 함량이 8% 이상일 경우에만 전이계수를 계산할 수 있었다.

Skarlou 등(1999)은 오렌지 나무의 <sup>137</sup>Cs 전이계수는 잎, 껍질 그리고 가식부위에서 각각  $1.2 \times 10^{-3} \sim 4.99 \times 10^{-2}$ ,  $8 \times 10^{-4} \sim 6.47 \times 10^{-2}$  그리고  $7 \times 10^{-4} \sim 9.06 \times 10^{-2}$  로 본 실험의 결과와는 약간의 차이를 보였다<sup>16)</sup>. 일반적으로 토양에서 <sup>137</sup>Cs의 고정 정도에 따른 가급태 존재비율의 차이는 경작지에서의 포장실험과 포트실험에서 다른 경향을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구는 감귤원 포장에서 채취한 시료를 이용하여 조사하였고, Skarlou 등(1999)은 포트실험에서 조사하였기 때문에 다른 경향을 보이고 있는 것이라고 판단된다.

Table 1. Transfer factors of <sup>137</sup>Cs from soil to plant

Sampling site	OM (%)	Transfer factor			
		Leaf	Peel	Fruit	Total
Ora-dong	3.55	-	-	-	-
Kwideok-ri	5.71	-	-	-	-
Seohong-dong	8.74	$1.02 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-3}$	$2.04 \times 10^{-3}$	$1.63 \times 10^{-2}$
Deoksu-ri	11.8	$4.52 \times 10^{-3}$	$2.13 \times 10^{-3}$	$5.25 \times 10^{-4}$	$7.18 \times 10^{-3}$
Onpyeong-ri	15.1	$5.92 \times 10^{-3}$	$4.30 \times 10^{-3}$	$1.63 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-2}$
Wimi-ri	20.8	$2.68 \times 10^{-3}$	$9.07 \times 10^{-4}$	$4.73 \times 10^{-4}$	$4.06 \times 10^{-3}$

대부분 방사능 전이계수는 경작지에서 방사능 동위원소의 사용이 어렵기 때문에 lysimeter 또는 포트 사용으로 방사능 추적자 실험에 의해 수행되어져 왔다. 따라서, 경작지에서 일정한 환경적 조건을 유지하는 것은 포트에서 수행하는 것보다 아주 어렵기 때문에, 경작지에서의 포장실험과 포트실험에서의 결과들이 다소 차이를 보이고 있었다.

최 등(1999)은 한국 논과 밭토양에서 벼와 배추의 전이계수가  $5.7 \times 10^{-3}$  및  $4.2 \times 10^{-3}$ 으로 계산되었는데, 최 등(1991) 및 이 등(1991)에 의한 온실 내 포트 실험 결과  $3.8 \times 10^{-2}$  및  $1.1 \times 10^{-1}$ 와 비교하여 <sup>137</sup>Cs 전이계수 차이가 실험적 방법에서 기인되었다고 하였다<sup>9,18-19)</sup>.

### 토양의 화학적 특성과 전이계수와의 관계

#### 토양 pH

Fig. 4는 토양 pH와 전이계수와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 토양 pH와 전이계수와의 유의 상관 관계를 알 수 없었으며, van Bergeijk 등(1992)의 결과와 유사한 경향을 보였다<sup>8)</sup>. 그러나 Kuhn 등(1984), Lonsjo와 Haak(1996) 그리고 Wang 등(1997)은 토양 중의 pH가 증가하면 <sup>137</sup>Cs 전이계수 값이 감소한다고 하였다<sup>4-6)</sup>. 이러한 경향은 pH의 변이폭이 좁았기 때문이라 판단되며, 이를 규명하기 위해서는 앞으로 조사 자료 수를 늘려 보다 상세한 실험을 행할 필요가 있다.

#### 치환성 K

Fig. 5는 치환성 K와 전이계수와의 관계를 나타낸 것이다. <sup>137</sup>Cs의 전이계수가 계산되지 않은 두 지점을 제외하고는 치환성 K 함량이 증가함에 따라 전이계수는 감소하는 경향을 보였다. 이것은 토양중 치환성 K 함량이

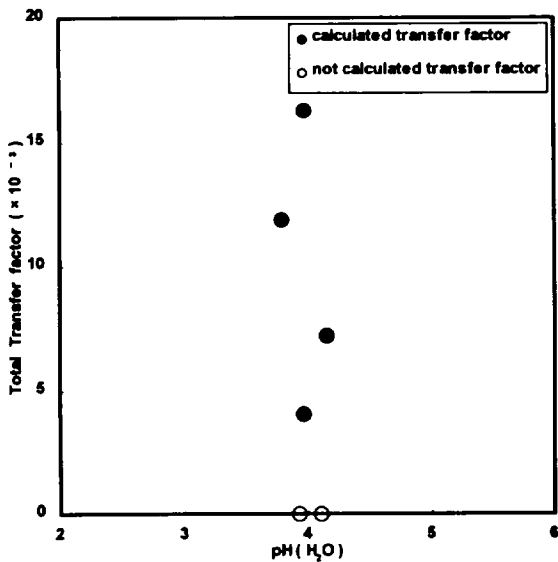


Fig. 4. The relationship between transfer factor and soil pH in soil.

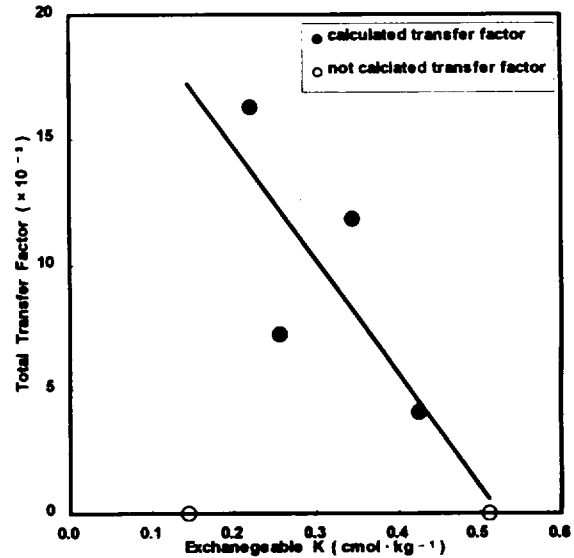


Fig. 5. The relationship between transfer factor and exchangeable K in soil.

높아지면 상대적으로 치환성  $^{137}\text{Cs}$  함량이 낮아져 식물 체로의  $^{137}\text{Cs}$  전이되는 양도 낮아졌기 때문이라고 사료되며, Kuhn 등(1984), Wang 등(1997), 그리고 Tsukada와 Nakamura(1999)가 여러 가지 작물에서의  $^{137}\text{Cs}$  전이 계수 값은 토양 중 K 함량이 증가함에 따라 감소한다는 것과 유사한 경향이 나타났다<sup>4,6-7</sup>. 박과 한(1997) 및 Oughton 등(1992)은  $^{137}\text{Cs}$ 이 1가 양이온이고 알칼리금속류로서 K와 물리화학적 구조 및 전하가 유사한 점을 이용하여 순차적 추출 방법으로 토양 중  $^{137}\text{Cs}$ 의 수착특성에 대한 연구를 하였다<sup>20-21</sup>. 대부분  $^{137}\text{Cs}$ 은 비가역적으로 매질 내부격자에 강하게 결합하여 이온교환이 주된 수착유형을 보이며, Cs<sup>+</sup>는 비슷한 크기와 전하를 가진 K<sup>+</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>에 의해 치환되므로 KCl로 추출할 때 탈착된다고 하였다. 반면에 최 등(1999)에 의해서 치환성 양이온은  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수에 영향을 주지 않았다고 하였고<sup>9</sup>, Lonsjo와 Haak(1996)에 의해서는 치환성 양이온 용량이 증가함에 따라서 감소한다고 하였다<sup>5</sup>.

#### 유기물 함량

Fig. 6은 유기물 함량과 전이계수와와의 관계를 나타낸 것으로, 유기물 함량이 증가할수록  $^{137}\text{Cs}$  전이계수가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 제주도 토양 특성과 깊은 관계가 있는 것으로 생각되는데, 치환성 양이온 용량이 높고 유기물 함량이 많은 알로판(allophane)이 제주도 토양의 주 점토광물이기 때문에  $^{137}\text{Cs}$ 은 토양 입자와 유기물에 강하게 흡착되어 치환이 불가능한 상태로 존재하는 것으로 추정된다<sup>22</sup>. 그러나 최 등(1999),

Tsukada와 Nakamura(1999), Wang 등(2000)에 의해서 유기물 함량은 전이계수에 영향을 주지 않는다고 하였고<sup>6-7,9</sup>, Van Bergeijk 등(1992) 및 Lonsjo와 Haak(1996)은 토양 중 유기물 함량이 증가하면  $^{137}\text{Cs}$  전이 계수 값이 증가한다고 하였다<sup>5,8</sup>.

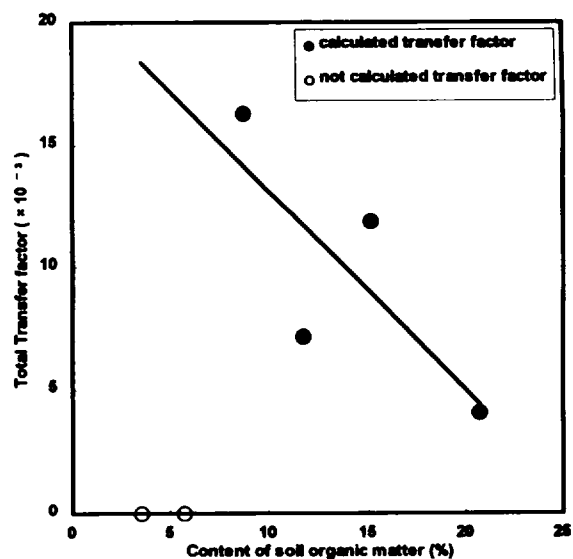


Fig. 6. The relationship between transfer factor and organic matter in soil.

#### 예탁 유효선량 평가

예탁 유효선량 평가 목적은 음식물 섭취로부터 체내피폭을 평가하기 위함이고 음식물을 통한 방사능 핵종의

종류와 피폭 받은 인체의 조직에 따라 감수성의 정도가 다르다. 따라서, 본 연구에서는  $^{137}\text{Cs}$ 의 방사능 핵종을 가지고 인체 조직의 감수성을 배제하여 식 (2)에 의해 계산하였다<sup>23-24)</sup>.

$$H_{50}(\text{mSv}) = A(\text{mSv/Bq}) \times B(\text{kg}) \times C(\text{Bq/kg} \cdot \text{fresh}) \quad (2)$$

A : 경구섭취에 따른 선량당량 환산계수

$$(^{137}\text{Cs} : 1.4 \times 10^{-5})$$

B : 연간 섭취량

C : 식물체중  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도

본 연구에서 조사된 감귤(가식 부위)중  $^{137}\text{Cs}$ 의 평균 농도 17.11 mBq/kg · fresh와 우리 나라 국민의 일년동안 감귤을 20 kg을 섭취한다고 가정하여  $^{137}\text{Cs}$ 에 의한 피폭선량을 산출하였다. 일년간 우리 나라 국민 피폭선량은 0.0048  $\mu\text{Sv}$ 와 같이 계산되었으며, 이들 값들은 자연계에서 받는 연간 유효 선량당량인 2700  $\mu\text{Sv}$ 와 체내에서  $^{40}\text{K}$ 에 의한 피폭선량 17  $\mu\text{Sv}$  보다 아주 낮았다<sup>23-24)</sup>. 그리고 Kimura와 Yamoki에 의해 삼백초를 섭취할 경우보다 0.06 ~ 12  $\mu\text{Sv}$  보다 더 낮았고<sup>23)</sup>, Wang 등(2000)이 일본과 대만에서 고구마를 일년간 섭취할 경우의 예탁 유효선량인 0.00429  $\mu\text{Sv}$ 과 0.0237  $\mu\text{Sv}$  보다 더 낮은 값으로 계산되었다<sup>24)</sup>. 그러므로 감귤 중  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도는 매우 낮으므로 이를 섭취한다고 해도 체내 피폭선량은 거의 무시할 수 있는 수준이었다.

## 요 약

본 연구는 제주도 토양 감귤나무에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이를 조사하기 위하여 유기물 함량이 서로 다른 제주도내 6개 지역의 감귤원에서 채취한 감귤과 토양시료를 감마분광계로  $^{137}\text{Cs}$  농도를 측정하였고, 또한 토양화학 특성과의 관계를 조사하였다. 토양 중  $^{137}\text{Cs}$  농도는 10.2 ~ 40.0 Bq/kg dry 범위로, 유기물 함량이 높을수록 높은 경향을 보였다. 식물체 중  $^{137}\text{Cs}$  농도는 가식부위의 경우는 검출하한치 이하 ~ 46.8 mBq/kg · fresh, 껍질은 검출하한치 이하 ~ 91.8 mBq/kg · fresh, 잎은 검출하한치 이하 ~ 235 mBq/kg · fresh의 범위로 가식부위, 껍질 그리고 잎 순으로 높았다. 토양에서 식물체로의  $^{137}\text{Cs}$  전이계수는 잎, 껍질 그리고 가식부위에서 각각  $2.15 \times 10^{-3}$  ~  $1.25 \times 10^{-2}$ ,  $7.28 \times 10^{-4}$  ~  $8.13 \times 10^{-3}$  그리고  $3.79 \times 10^{-4}$  ~  $3.08 \times 10^{-3}$  범위로 가식부위, 껍질 그리고 잎 순으로 높았다. 토양 pH에 따른  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수는 서로 상관성

이 없었으나, 치환성 K와 토양 유기물 함량이 높을수록 전이계수는 낮아지는 경향이 있었다. 우리 나라 국민 1인당 20 kg의 감귤을 섭취한다고 가정했을 때 이상의 결과로부터 산출된 흡수선량인 0.0048  $\mu\text{Sv}$ 은 연간 예탁 유효 선량 당량 값인 2.48 mSv에 비해서 거의 무시할 수 있는 수준이라고 생각된다.

## 참고문헌

1. International Atomic Energy Agency(1982). Genetic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine release. Safety Series No. 57, IAEA, Vienna, pp. 61-65.
2. International Atomic Energy Agency(1994). Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. Technical Report Series No. 364, IAEA, Vienna, pp. 14-26
3. International Union of Radioecologists(1989). Sixth report of the working group. Soil-to-plant transfer factors. RIVM, Bilthoven, The Netherlands.
4. Kuhn W., Handl J., Schuller P.(1984). The influence of soil parameters on  $^{137}\text{Cs}$ -uptake by plants from long-term fallout of forest clearings and grassland. Health Phys., 46, pp. 1083-1093.
5. Lonsjo H., Haak E.(1996). Soil factors influencing the long-term transfer of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  to arable crops. Mitt. Osterr. Bodenkundl Ges., 53, pp. 119-127.
6. Wang J., Lai S., Wang J., Lin Y.(1997). Transfer of radionuclides from soil to grass in northern Taiwan. Appl. Radiat. Isot., 48, pp. 301-303.
7. Tsukada H. & Nakamura Y.(1998). Transfer factors of 31 elements in several agricultural plants collected from 150 farm fields in Aomori, Japan. J. Radioanal. Nucl. Chem., 236, pp. 123-132.
8. van Bergeijk KE., Noordijk H., Lem brechts J., Frissel MJ.(1992). Influence of pH, soil organic matter content on soil-to-plant transfer of radiocesium and strontium as analyzed by a non-parametric method. J. Environ. Radioact., 15, pp. 265-276.
9. 최용호, 임광목, 이명호, 최근식, 정규희(1999). 한국

- 의 논과 밭에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 토양-작물체 전이계수. 한국 환경농학회지, vol. 18, No. 2, pp. 164-168.
10. 제주도농업기술원(1994), 감귤의 경쟁력 제안을 위한 토양관리와 시비기술, pp 97-121
  11. Ronald M. W. Overwater, Peter Bode and Jeroen J. M. de Goeij(1993). Gamma-ray spectroscopy of voluminous sources Corrections for source geometry and self-attenuation. Nucl. Instru. and Methods in Phys. Research A324, pp. 209-218.
  12. 한국원자력안전기술원(1998-2000), 지방 측정소 측정요원 교육.
  13. Kye-Hoon Kim, Ju-Yong Yun and Sun-Ho Yoo(1995). Distribution of Cs-137 and K-40 in Korean Soils. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert., Vol. 28, No. 1, pp. 33-40.
  14. M. H. Lee, C. W. Lee(1997). Distribution and Characteristics of  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the Soil of Korea. J. Environ. Radioact., Vol. 37, No. 1, pp. 1-16.
  15. 김철수(1999). 한국 표층 토양중  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  및 Pu 동위원소의 분포에 관한 연구. 한국과학기술원 석사학위 논문, pp. 1-45.
  16. V. Skarlou, C. Nobeli, J. Anoussis, C. Haidouti, E. Papanicolaou(1999). Transfer factors of  $^{134}\text{Cs}$  for olive and orange trees grown on different soils. J. Environ. Radioact., Vol. 45, pp. 139-147.
  17. F. Carini(1999). Radionuclides in plants bearing fruit : an overview. J. Environ. Radioact., Vol. 46, pp. 77-97.
  18. Choi, Y. H., Kim, K. C., Lee, C. W., Lee, K. S., Lee, J. H., Pak, C. K. and Cho, Y. W.(1991). Soil-to-plant transfer coefficients of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{137}\text{Cs}$  for rice, soybean and vegetables. J. Korean Asso. Radiat. Prot., 16, 55-64.
  19. Lee, J. H., Lee, C. W. and Choi, Y. H.(1991). A Development of Computer Code for Evaluating Internal Radiation Dose through Ingestion and Inhalation Pathways. KAERI/RR-998/90, Korea Atomic Energy Research Institute.
  20. 박정균, 한필수(1997). 사질토에 대한  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 수작유형 분석. 한국화학공학회, Vol. 35, No. 4, pp. 463-467.
  21. Oughton DH., Salbu B., Riise G., Lien H., Østby G., Nøren A.(1992). Radionuclide mobility and bioavailability in Norwegian and Soviet soils. Analyst, 117, pp. 481-486.
  22. 송관철(1989). 제주도 대표토양의 Andic Properties에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 1-98
  23. Shoujiro Kimura & Rumi Yamaoki(1997). Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in Environmental Soil and Cruge. Jpn. J. Toxicol. Environ. Health, Vol. 43, No. 6, pp. 349-358.
  24. Chih-Jung Wang, Jeng-Jong Wang, Chih-Yu Chiu, Shu-Ying Lai, Yu-Ming Lin(2000). Transfer factors of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  from soil to the sweet potato collected in Taiwan. J. Environ. Radioact., vol. 47, pp. 15-27.