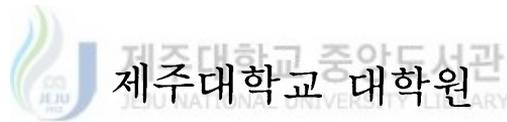


석사학위논문

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



제주대학교 대학원

농화학과

강 태 우

110.393

2000년 12월

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

지도교수 유 장 곁

강 태 우

이 논문을 농학 석사학위 논문으로 제출함



강태우의 농학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 \_\_\_\_\_ 印

위 원 \_\_\_\_\_ 印

위 원 \_\_\_\_\_ 印

제주대학교 대학원

2000년 12월

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

Tae-Woo Kang

(Supervised by Professor Zang-Kual U)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF AGRICULTURE

DEPARTMENT OF AGRICULTURAL CHEMISTRY  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

December 2000

# 목 차

## Summary

|   |    |
|---|----|
| <b>I. 서론</b> .....  | 1  |
| <b>II. 재료 및 방법</b> .....  | 4  |
| 1. 시료채취 및 전처리 .....   | 4  |
| 2. 표준시료 조제 및 효율교정 방법 .....  | 6  |
| 1) 표준시료(교정선원) .....   | 6  |
| 2) 표준시료 조제 .....  | 7  |
| 3) 효율교정 .....   | 7  |
| 3. 식물체와 토양시료중 $^{137}\text{Cs}$ 방사능 분석 및<br>토양시료중 화학적 특성 분석 ..... | 10 |
| <b>III. 결과 및 고찰</b> .....   | 14 |
| 1. $^{137}\text{Cs}$ 분석 신뢰도 검증결과 .....                            | 14 |
| 2. 감귤원 토양중 $^{137}\text{Cs}$ 농도와 화학적 특성 .....                     | 15 |
| 3. 감귤나무에서 $^{137}\text{Cs}$ 의 분포 .....                            | 18 |
| 4. 토양과 식물체 전이계수 .....   | 20 |
| 5. 토양중 pH, 치환성 K, 그리고 유기물 함량과<br>전이계수와의 관계 .....                  | 22 |
| 6. 예탁유효선량 평가 .....  | 27 |
| <b>IV. 요약</b> .....   | 28 |
| <b>V. 참고문헌</b> .....  | 29 |

## Summary

The mandarin fruits and leaves as well as the soil samples around each tree were collected at 6 mandarin orchards in Jeju Island. The transfer of  $^{137}\text{Cs}$  to mandarin trees was determined by HPGe  $\gamma$ -ray spectrometry, and the relationship between the transfer values and the soil chemical properties was investigated.

The results were as the followings ;

1. The higher organic matter content of soil, the higher  $^{137}\text{Cs}$  concentration of the soil.
2.  $^{137}\text{Cs}$  was not detected in mandarin trees when soil organic matter content was less than 8%. However  $^{137}\text{Cs}$  was found in the trees grown in the soil with high content (above 8%) of organic matter. The distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in trees was showed as the following order ; leaf > peel > fruit.
3. Transfer factors of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to mandarin for leaf, peel and fruit were  $2.15 \times 10^{-3} \sim 1.25 \times 10^{-2}$ ,  $7.28 \times 10^{-4} \sim 8.13 \times 10^{-3}$  and  $3.79 \times 10^{-4} \sim 3.08 \times 10^{-3}$ , respectively.
4. Transfer factors of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to mandarin were not affected by soil pH, but decreased at the high concentration of exchangeable K and organic matter.
5. The calculated value of annual effective dose equivalent was  $0.0048 \mu\text{Sv}$ , provided that annual intake of mandarin fruit was 20 kg per person. Considering that total (internal and external) annual effective dose equivalent in nature is  $2700 \mu\text{Sv}$ , we can suggest that  $^{137}\text{Cs}$  concentration of mandarin produced in Jeju is negligible.

# I. 서론

환경 중 존재하는 방사성 핵종에는 천연에 존재하는 것과 핵실험 및 원자력 발전소 사고 등에 의해서 환경에 인위적으로 함유되는 것으로 크게 구분될 수 있는데, 특히 핵실험 및 원자력 발전소 사고 등에 의해 대기에 분포된 방사능 핵종들은 낙진(fallout) 형태로 대기에 떠다니다가 기상환경의 변화에 의해서 토양에 흡착되게 된다. 이것들은 토양 내에서 식물뿌리에 의해 대사적으로 흡수되거나 엽질 표면을 통해 흡수되어 이동되며, 인간의 몸에는 이러한 식물체를 섭취함으로써 이동된다(International Commission on Radiological Protection, 1978). 토양에서 식물체로의 방사능 핵종들의 이동 관계는 방사능 핵종들로부터 체내피폭을 평가하는데 이용되는 중요한 부분중 하나이다. 일반적으로, 전이계수는 토양 특성, 식물체 종류 그리고 다른 환경 조건들과 같은 요인들에 의하여 커다란 변화를 가진다(International Atomic Energy Agency, 1982, 1994).

대기권 핵실험 및 원자력 발전소 사고 등에 의해 방출된 핵분열 생성물인  $^{137}\text{Cs}$ 은 주로 낙진(fallout) 형태로 토양에 도달하여 환경에 존재하게 되며, 비교적 긴 반감기(30.2 년)와 아주 강한 감마선(662 keV) 그리고 인간 몸체의 체내피폭을 평가하는데 아주 중요한 방사능 핵종이다.  $^{137}\text{Cs}$ 은 1950년에서 1980년 초 사이에 대기권 핵실험들과 1986년 Chernobyl 원전사고부터 유래된 중요한 핵종으로써 일본에서 보고되었고(Hirose 등, 1987 ; NIRS, 1979~1997), 일본의 경우 1990년 토양중  $^{137}\text{Cs}$  농도는 0.6~98 Bq/kg 정도로 보고되었다(NIRS, 1990). 그리고 한국에서 전국토 비경작지를 대상으로 조사한 결과  $^{137}\text{Cs}$  농도는 검출하한치(MDA : Minimum Detectable Activity) 이하에서 최고 252 Bq/kg · dry 정도이며, 특히 제주지역은 평균 49.6 Bq/kg · dry 정도로 타지역에 비해 가장 높았다(KINS, 1996~1997).

토양과 과실에서 방사성 핵종의 전이계수는 방사성 핵종의 종류, 농작물의 종류, 토양의 종류, 근권에서 거동, 공존원소의 종류와 농도, 방사성 핵종의 존재상태 그리고 시비조건에 따라 아주 다양하게 영향을 받는다. 특히, 토양과 식물체에서

$^{137}\text{Cs}$ 의 이동성은 토양특성, 식물체 종류 그리고 다른 환경 조건들과 몇몇의 요인들에 의해 의존한다고 보고하였다(International Atomic Energy Agency, 1982, 1994 ; International Union of Radioecologists, 1989).

Green 등(1997)은 양토, 사토, 이탄토 토양에서 재배된 사과와 딸기나무들의  $^{137}\text{Cs}$  전이계수가 양토에서 보다 사토에서 더 높았으며 이탄토에서 가장 높았고, Roussel 등(1984)이 사양토에서 사과, 배, 복숭아나무들을 이용한 전이계수 값과 비슷한 결과를 보였다고 하였다. Skarlou 등(1997)은 두 가지 다른 토양에서 올리브와 오렌지나무들의  $^{134}\text{Cs}$  전이계수는 석회질 미사질양토에서 보다 산성질 사양토에서 자란 올리브와 오렌지나무 모두 다 높다고 하였다. Ng 등(1982)은 포도와 딸기나무에서 Fredriksson 등(1969)에 의해 결정된  $^{137}\text{Cs}$  전이계수를 다시 결정하였고, 그 전이계수는 식양토에서보다 양토에서 두 배정도 높다고 하였다.

Green 등(1997)은 비슷한 식물체 특성을 가지는 사과, 까막까치밥나무, 거스베리나무, 메론, 대황 그리고 양딸기를 같은 실험적 조건에서 계산된  $^{137}\text{Cs}$  전이계수는 메론, 대황, 거스베리나무, 사과 그리고 양딸기 순으로 높았고, 까막까치밥나무에서 가장 높다고 하였다. 이런 결과들은 토양 특성보다는 식물체 종류들에서  $^{137}\text{Cs}$  전이계수에 의존함을 보여졌다.

$^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수는 토양 중에서 화학적 특성과 물리적 특성들에 의해 영향을 받는다고 하였다.  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수는 토양 중 유기물 함량 증가로 증가하였으나(Van Bergeijk 등, 1992 ; Lonsjo와 Haak, 1996), 토양의 점토함량(Kuhn 등, 1984 ; Lonsjo와 Haak, 1996), K 함량(Kuhn 등, 1984 ; Wang 등, 1997 ; Tsukada와 Nakamura, 1999), 치환성 양이온 용량(Lonsjo와 Haak, 1996) 그리고 pH(Kuhn 등, 1984 ; Lonsjo와 Haak, 1996 ; Wang 등, 1997)가 증가함에 따라서 감소한다고 보고하였다. 하지만, 이런 연관성들은 항상 동일한 결과를 나타내는 것은 아니고 몇몇 다른 연구에서는 pH(Van Bergeijk 등, 1992), 점토함량(Smolders 등, 1997 ; 최 등, 1999), 유기물 함량(최 등, 1999 ; Tsukada와 Nakamura, 1999 ; Wang 등, 2000) 그리고 치환성 양이온(최 등, 1999)은 전이계수에 영향을 주지 않는다고 하였다.

제주도는 화산폭발시 형성된 화산토로서 화산회를 모체로 생성된 토양이다. 제주도의 총면적은 186,561 ha로서 농경지로 이용되고 있는 면적은 약 39.6%인 54,197

ha이고 이중 감귤재배면적은 21,479 ha이다(제주도농업기술원, 1994).

제주도 토양은 토색에 따라 암갈색토, 농암갈색토, 흑색토, 갈색산림토로 나누고, 일반적으로 암갈색토를 비화산회토, 나머지 3개 토양을 화산회토라 불리워지고 있다(송, 1998). 특히, 화산회토는 알로판(Allophane)이 주 점토광물이며 용적밀도가 낮아 공극이 크고 투수성이 양호하여 양·수분 보유력이 높다. 양이온치환용량이 높으나 내부 전하가 작아  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$  보유력이 약하여 강우에 의해 양분이 용탈되기 쉽다. 그리고 토양표층에 유기물이 다량 집적되어 다양한 함량분포를 나타낸다(제주도농업기술원, 1998).

따라서, 본 연구는 유기물 함량이 다양한 제주도 감귤원으로부터 채집된 토양과 감귤나무중의  $^{137}\text{Cs}$  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.



## II. 재료 및 방법

### 1. 시료채취 및 전처리

본 실험에 사용된 시료는 2000년 수확기(10월~11월)에 제주도 감귤원이 밀집되어 있는 대부분 미사질 양토인 한림읍 귀덕리(N 24' 39", E 18' 10"), 남원읍 위미리(N 16' 38", E 40' 12"), 안덕면 덕수리(N 16' 08", E 18' 47"), 제주시 오라동(N 29' 49", E 30' 19"), 서귀포시 서홍동(N 14' 57", E 32' 45") 그리고 성산읍 온평리(N 24' 23", E 53' 41") 6개 지역의 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.

토양시료는 풍건하여 2 mm 체를 통과시켜 준비한 다음 일부는 토양화학 특성 분석에 사용하였고, 나머지는 105 °C 건조기에서 건조한 다음 아주 미세하게 분쇄하여 폭 55 mm와 높이 70 mm 감마 계측용 시료용기에(Mizuho Chemical Co., Japan) 충전한 후 측정하였다. 감귤과 잎은 깨끗한 물로 이물질을 제거한 후 감귤은 껍질을 벗겨서 가식 부위와 비가식 부위로 나누었고, 각각의 시료는 생중량을 칭량하였다. 그리고 감귤의 가식부위, 비가식부위 그리고 잎 시료는  $^{137}\text{Cs}$ 의 손실을 피하기 위하여 450 °C 보다 낮은 온도에서 완전히 회화한 후 감마 계측용 시료용기에 충전하여 분석시료로 하였다.

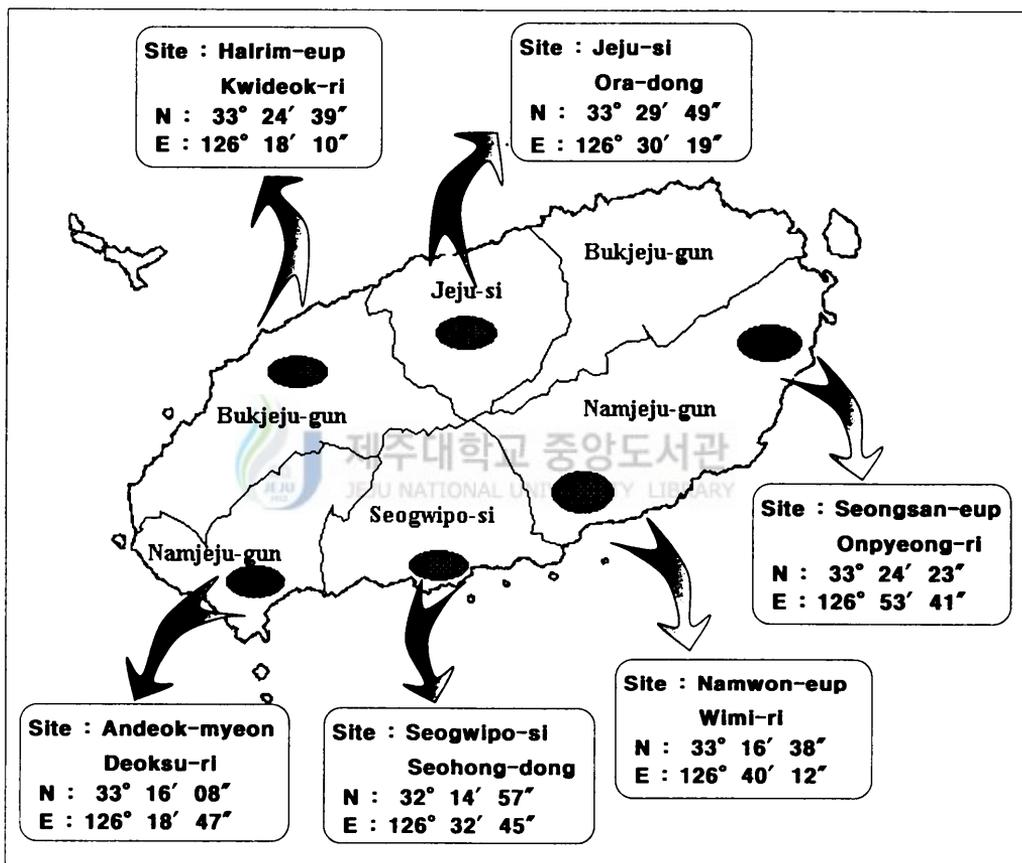


Fig. 1. Sampling sites in Jeju Island.

## 2. 표준시료 조제 및 효율교정 방법

### 1) 표준시료(교정선원)

환경시료의 감마 방사능 분석에서 감마선 에너지는 약 50 keV에서 3 MeV 정도의 감마 핵종을 분석대상으로 한다. 따라서, 표준시료는 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. 본 실험에서는 Table 1과 같이 표준선원을 사용하여 에너지 교정 및 peak 효율교정을 수행하였다.

Table 1. Standard source(QCY44, Amersham) used for analysis of HPGe detector

| Nuclear           | Energy (keV) | Yield  | Half-life (day) |
|-------------------|--------------|--------|-----------------|
| $^{109}\text{Cd}$ | 88.03        | 0.0363 | 462.6           |
| $^{57}\text{Co}$  | 122.06       | 0.8560 | 271.79          |
| $^{139}\text{Ce}$ | 165.86       | 0.7987 | 137.64          |
| $^{203}\text{Hg}$ | 279.2        | 0.8148 | 46.595          |
| $^{115}\text{Sn}$ | 391.7        | 0.6489 | 115.09          |
| $^{85}\text{Sr}$  | 514.01       | 0.9840 | 64.849          |
| $^{137}\text{Cs}$ | 661.66       | 0.8510 | 11012.7         |
| $^{88}\text{Y}$   | 898.04       | 0.9400 | 106.63          |
| $^{60}\text{Co}$  | 1173.24      | 0.9986 | 1924.2          |
| $^{60}\text{Co}$  | 1332.5       | 0.9998 | 1924.2          |
| $^{88}\text{Y}$   | 1836.06      | 0.9936 | 106.63          |

## 2) 표준시료 조제

표준시료 조제는 감마 방출 핵종이 혼합된 표준 용적선원 QCY44를 1 M HCl 용액으로 적당히 희석한 후, 이를 시료용기(diameter 50mm, hight 70 mm ; Mizuho Chemical Co., Japan)에 무게를 달고 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. 시료자체흡수(self-absorption effect)에 의한 영향에 대해 밀도 보정을 하기 위하여 각각의 무게를 정확히 정량하였다.

## 3) 효율교정

조제된 표준시료는 Table 2와 같은 특성을 가지는 고순도게르마늄 검출기(GEM-30185, EG&G Ortec, USA)와 다중과고분석기(Model 92X, EG&G Ortec, USA)으로 구성된 감마분광계에서 각각 80,000초 동안 계측을 수행하였다. 계측된 스펙트럼은 효율과 에너지 교정식 및 분해능을 갖도록 Aptec program(Aptec Co.)으로 감마선 에너지와 높이에 대한 내삽적인 관계식을 구하여 2.5 mm에서 50 mm까지 1 mm 간격으로 효율과 에너지 및 분해능을 갖는 교정 spectrum을 만들었다. 표준 용적선원 중에 포함되어 있는  $^{60}\text{Co}$ 와  $^{88}\text{Y}$  핵종은 각각 1173.24 keV와 1332.5 keV 그리고 898.04 keV와 1836.06 keV의 감마선을 방출하는 동시에 또 다른 감마선 2505.74 keV와 2734.1 keV을 방출하는 동시합산효과(summing effect)를 나타내기 때문에 계측효율이 감소된다(Fig. 2). 또한 시료의 밀도는 시료의 물질과 감마선이 상호작용을 일으켜 시료의 자체흡수효과(self-absorption effect)를 나타내기 때문에 표준선원과 시료의 겉보기 밀도가 다를 경우 계측효율이 감소하는 경향이 있다. 따라서, 동시합산효과(summing effect)와 시료의 자체흡수효과(self-absorption effect)를 보정하였다(Ronald 등, 1993 ; Begona & Francisco, 1995 ; Ramos-Lerate 등, 1998 ; KINS, 1998-2000).

Table 2. Properties of HPGe(High-Purity Germanium) detector

| Properties  |          |
|---|----------|
| Resolution(FWHM) at 1.33 MeV, $^{60}\text{Co}$    | 1.85 keV |
| Peak-to-Compton ratio, $^{60}\text{Co}$           | 58/1     |
| Relative efficiency at 1.33 MeV, $^{60}\text{Co}$ | 30 %     |
| High voltage                                      | 3200 V   |
| Crystal diameter                                  | 57.7 mm  |
| Crystal length                                    | 75.3 mm  |
| End cap to crystal                                | 3 mm     |

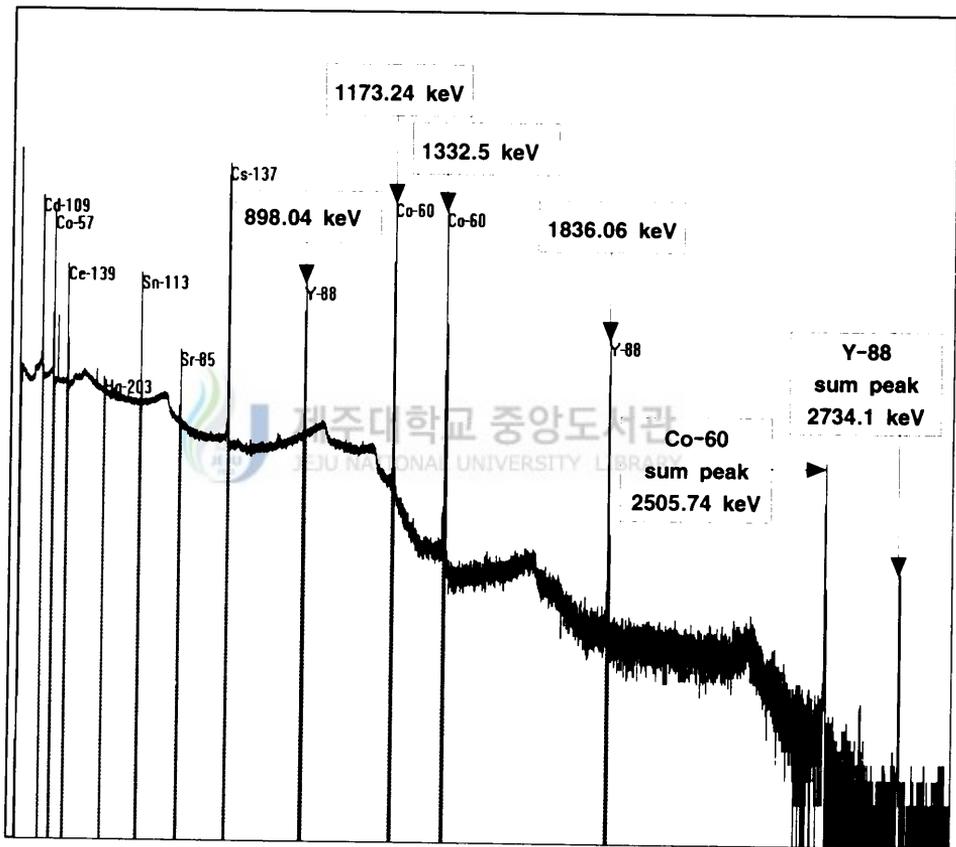


Fig. 2. Gamma-ray spectrum of standard source by HPGe detector.

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

회화된 식물체 시료와 건조된 토양시료는 고순도게르마늄 검출기(GEM-30185, EG&G Ortec, USA)와 다중과고분석기(Model 92X, EG&G Ortec, USA)로 구성된 감마분광계로  $^{137}\text{Cs}$ 을 분석하였다.

$^{137}\text{Cs}$  붕괴 도식은 Fig. 3과 같이 최대 에너지가 514 keV와 1176 keV 두 가지 베타선을 방출한다. 이들의 붕괴비율은 각각 94.4%와 5.6%이다. 그런데  $^{137}\text{Cs}$ 은 1176 keV 베타선의 방출로 직접  $^{137}\text{Ba}$ 으로 되거나 514 keV 베타선이 방출하여  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 이 된 후 방출율이 82.3%인 662 keV 감마광자를 방출하여  $^{137}\text{Ba}$ 이 된다. 이때 방출되는 662 keV를 이용하여  $^{137}\text{Cs}$ 을 검출하였다.

계측시간은 토양시료의 경우 50,000초 동안 계측하였고(Fig. 4), 식물체 시료의 경우 200,000 ~ 300,000초 동안 계측하였다(Fig. 5). 계측된 스펙트럼은 Aptec software(Aptec Co.)를 사용하여 감마 핵종  $^{137}\text{Cs}$ 을 분석한 후 각각의 시료에 대해 자체흡수에 의한 밀도 보정을 수행하였다. 토양시료의 최소검출하한치(MDA : Minimum Detectable Activity)는 1.12 Bq/kg · dry이었고, 식물체 시료는 5.75 mBq/kg · fresh이었다.

토양시료중 화학적 분석은 토양의 pH는 1:5법(Mclean, 1982), 유기물 함량은 Walkley-Black 법(Nelson & Sommers, 1982)으로 분석하였다. 그리고 유효인산 함량은 Bray No. 1법(Olsen & Sommers, 1982), 치환성 양이온은 1N Ammonium acetate 법(Thomas, 1982)으로 유도결합플라즈마 방출 분광계를 사용하여 측정하였다.

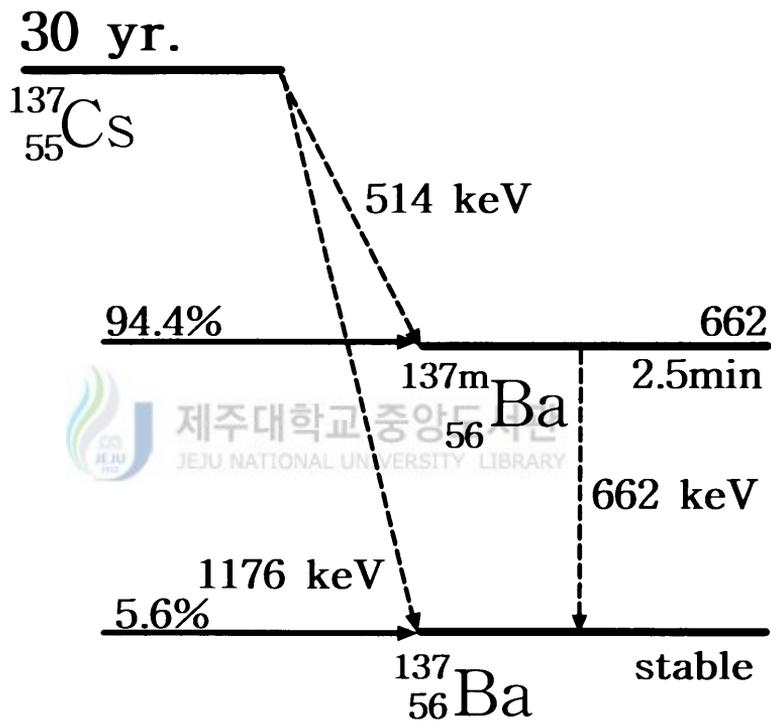


Fig. 3. Decay scheme of  $^{137}\text{Cs}$ (half-life : 30 yr.).

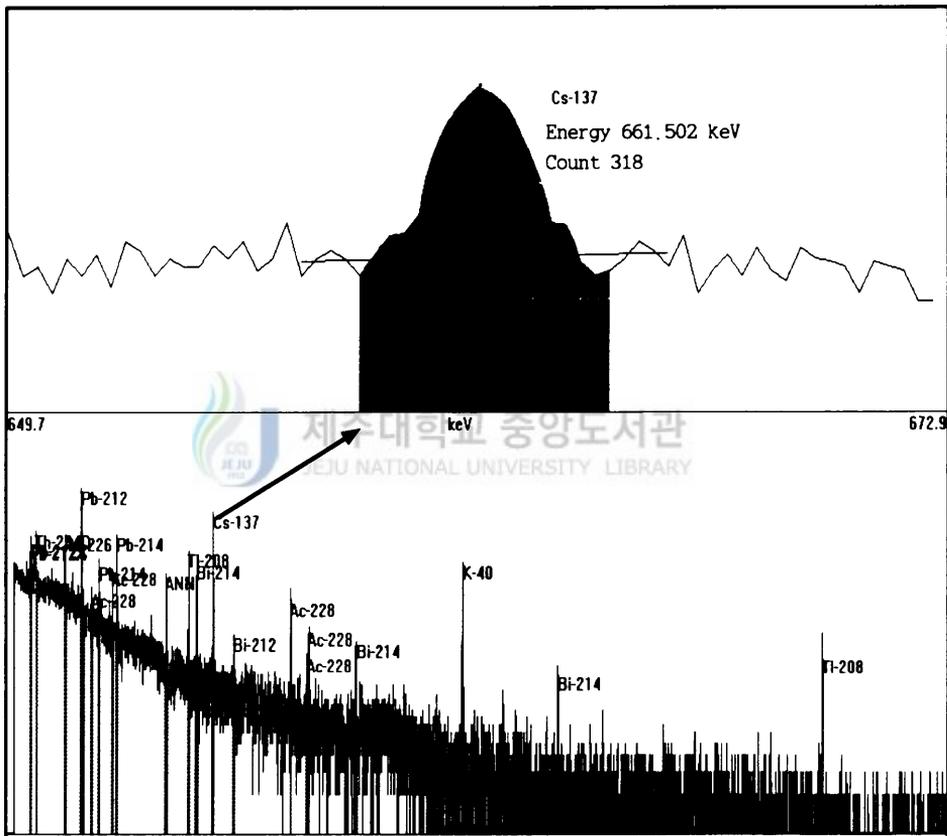


Fig. 4. Gamma-ray spectrum of the soil sample.

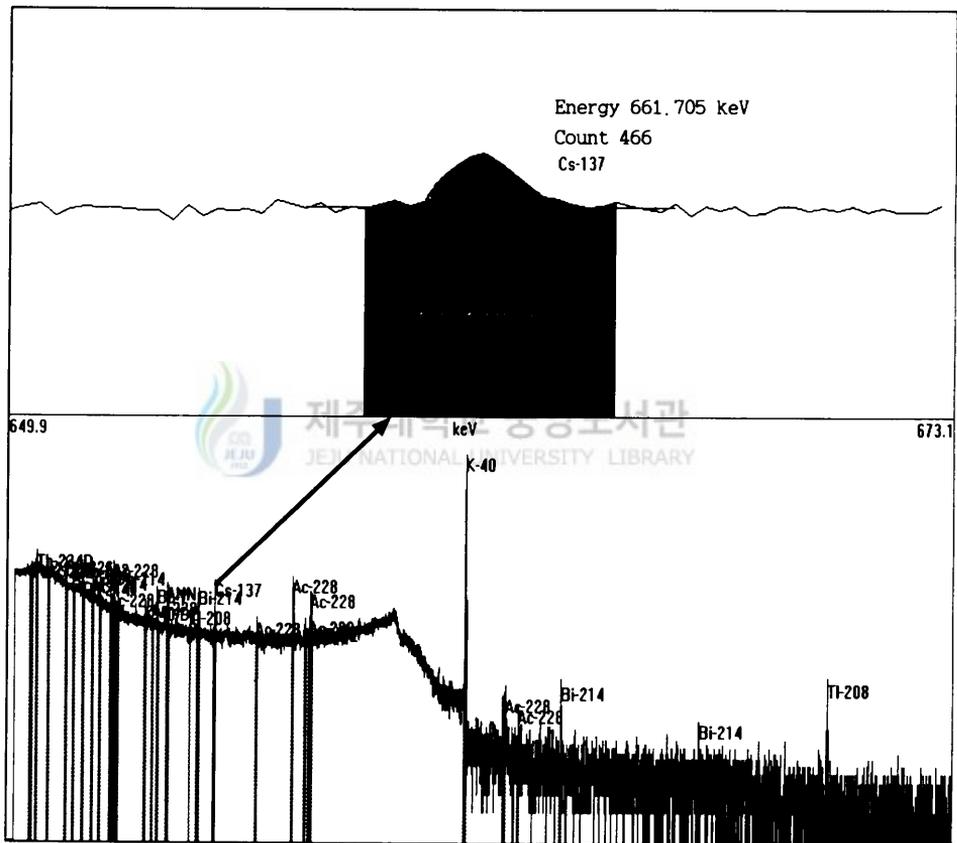


Fig. 5. Gamma-ray spectrum of plant sample.

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. $^{137}\text{Cs}$ 분석 신뢰도 검증결과.

Table 3은 1998년에서 2000년까지 한국원자력안전기술원에서 제공하는 비교시료 중의  $^{137}\text{Cs}$ 의 분석 결과를 나타내었다. 이들 값은 토양시료의 감마핵종 비교분석 평가기준인 원자력위원회(IAEA)의 AQCS(Analytical Quality Control Service)의 평가방법에 따라 설정된 기준값과 거의 일치하여, 본 실험의 분석자료에 대한 신뢰도를 인증받았다(KINS, 1998-2000).

Table 3. Analysis results of  $^{137}\text{Cs}$  for KINS reference materials

| Year | Material | Soil            |                  |                     |
|------|----------|-----------------|------------------|---------------------|
|      |          | Measured values | Reference values | Confidence interval |
| 1998 |          | $28.8 \pm 1.0$  | 29.4             | 26.5 ~ 32.3         |
| 1999 |          | $53.5 \pm 2.6$  | 53.4             | 48.1 ~ 58.7         |
| 2000 |          | $130 \pm 6$     | 130              | 117 ~ 143           |

Confidence Interval : 10~20% ranges of reference value

KINS : Korean Institute Nuclear Safety

## 2. 감귤원 토양중 $^{137}\text{Cs}$ 농도와 화학적 특성

Table 4는 제주도 감귤원 토양에 대한  $^{137}\text{Cs}$  농도와 화학적 특성을 나타내었다. 모든 시료채취 지역에서는 토양 pH, 유기물 함량, 유효인산, 치환성 양이온이 표토에서보다 심토에서 대체적으로 낮은 함량을 보이고 있다. 토심에 따른  $^{137}\text{Cs}$ 의 함량 분포는 토심이 깊어질수록 오라동과 온평리 지역은 감소하고 덕수리와 위미리 지역은 증가하는 경향을 보이며, 반면 귀덕리와 서홍동 지역은 별 다른 경향이 없었다.

Fig. 6은 토양 중 유기물 함량과  $^{137}\text{Cs}$  농도와의 관계를 나타내었다. 유기물 함량이 증가할수록  $^{137}\text{Cs}$ 의 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  $^{137}\text{Cs}$ 이 유기물에 강하게 흡착한 결과라고 판단된다. 그리고 여러 연구자들에 의해 보고된 상관계수  $r$ 은  $0.77^{**}$ ,  $0.78^{**}$  그리고  $0.68^{**}$ 와 일치한 경향을 보였다(김 등, 1995 ; 이 등, 1997 ; 김 등, 1999).

$^{137}\text{Cs}$ 은 대부분 화학적 이동은 하지 않고, 물리적인 요인에 의해서만 이동된다. 본 연구에 사용된 토양은 대부분 약 30년 전에 조성된 감귤원이기 때문에 Table 4에서 보는 바와 같이 토심 20 cm까지  $^{137}\text{Cs}$ 이 분포하는 이유는 토양 표층에 존재하던  $^{137}\text{Cs}$ 이 경운으로 인한 물리적 이동으로 이루어진 것이라고 판단된다. Tsukada와 Nakamura(1999)는 감자 경작지 토양에서 토심 20 cm까지  $^{137}\text{Cs}$ 이 분포하는 것이 관찰되었다고 보고하였으며, Klas 등(1999)은 비경작지 토양에서 대부분이 표층 5 cm 이내에서 관찰되었다고 하였다.

Table 4. The concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  and chemical properties in citrus orchard soils

| Sampling site | Depth (cm) | pH (H <sub>2</sub> O) | OM (%) | Ava.-P (mg · kg <sup>-1</sup> ) | Exch. Cations (cmol · kg <sup>-1</sup> ) |      |      |      | $^{137}\text{Cs}$ Con. (Bq · kg <sup>-1</sup> dry) |
|---------------|------------|-----------------------|--------|---------------------------------|--|------|------|------|--|
|               |            |                       |        |                                 | K  | Ca   | Mg   | Na   |  |
| Ora-dong      | 0-5        | 4.49                  | 6.09   | 682                             | 0.18                                     | 1.78 | 0.60 | 0.06 | 15.9   |
|               | 5-10       | 3.97                  | 2.70   | 621                             | 0.14                                     | 0.81 | 0.26 | 0.07 | 14.8   |
|               | 10-20      | 3.85                  | 1.87   | 483                             | 0.12                                     | 0.50 | 0.14 | 0.07 | 14.7   |
| Kwideok-ri    | 0-5        | 4.29                  | 7.52   | 805                             | 0.79                                     | 4.72 | 1.55 | 0.34 | 11.6   |
|               | 5-10       | 3.81                  | 5.28   | 496                             | 0.41                                     | 1.27 | 0.43 | 0.24 | 12.7   |
|               | 10-20      | 3.70                  | 4.34   | 80                              | 0.34                                     | 0.73 | 0.28 | 0.17 | 8.63   |
| Seohong-dong  | 0-5        | 4.25                  | 9.19   | 177                             | 0.36                                     | 1.43 | 0.52 | 0.08 | 18.7   |
|               | 5-10       | 3.86                  | 8.50   | 31                              | 0.17                                     | 0.21 | 0.09 | 0.02 | 26.8   |
|               | 10-20      | 3.83                  | 8.52   | 8                               | 0.14                                     | 0.11 | 0.04 | 0.02 | 24.8   |
| Deoksu-ri     | 0-5        | 4.68                  | 14.5   | 666                             | 0.41                                     | 3.89 | 1.49 | 0.18 | 14.8   |
|               | 5-10       | 3.90                  | 10.5   | 88                              | 0.17                                     | 0.44 | 0.18 | 0.06 | 18.6   |
|               | 10-20      | 3.88                  | 10.3   | 216                             | 0.19                                     | 0.71 | 0.37 | 0.07 | 20.3   |
| Onpyeong-ri   | 0-5        | 3.83                  | 16.4   | 351                             | 0.38                                     | 0.91 | 0.25 | 0.15 | 34.8   |
|               | 5-10       | 3.80                  | 14.7   | 34                              | 0.31                                     | 0.50 | 0.14 | 0.08 | 34.6   |
|               | 10-20      | 3.75                  | 14.3   | -                               | 0.34                                     | 0.38 | 0.10 | 0.09 | 10.2   |
| Wimi-ri       | 0-5        | 3.98                  | 20.9   | 429                             | 0.54                                     | 3.58 | 0.64 | 0.22 | 24.6   |
|               | 5-10       | 4.05                  | 20.6   | 132                             | 0.43                                     | 2.51 | 0.46 | 0.18 | 35.9   |
|               | 10-20      | 3.85                  | 20.8   | 56                              | 0.31                                     | 2.66 | 0.45 | 0.19 | 40.0   |

- : N.D (not detectable)

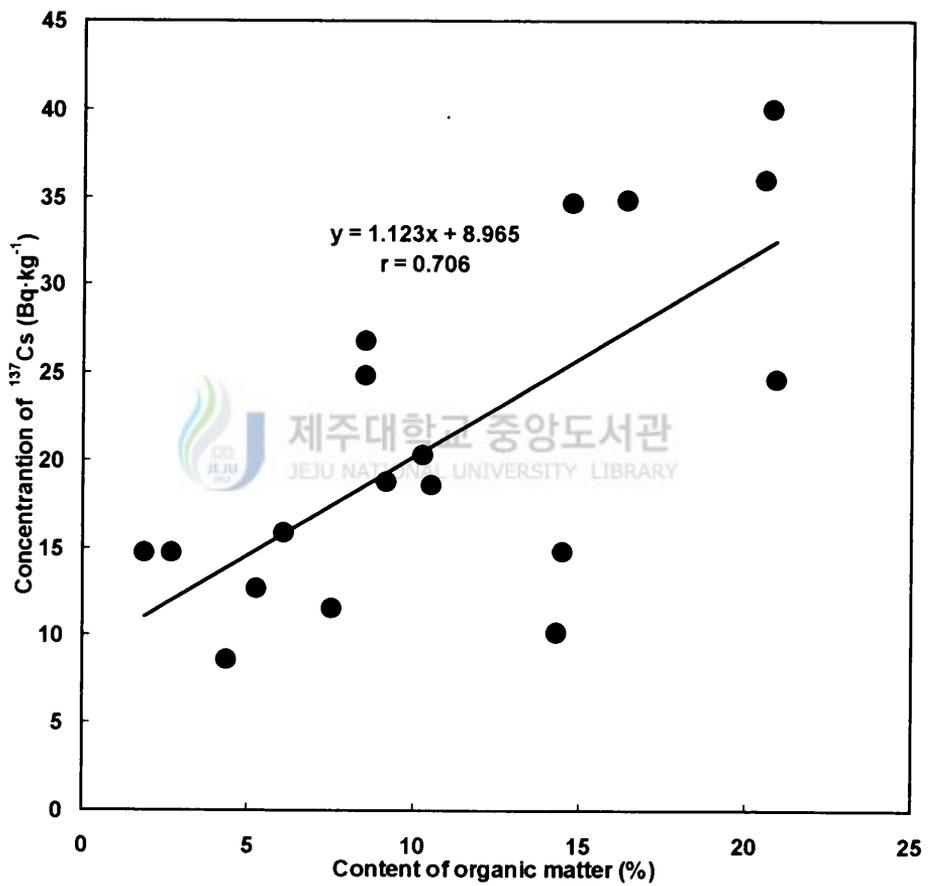


Fig. 6. The relationship between contents of organic matter and concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  in citrus orchard soils.

### 3. 감귤나무에서 $^{137}\text{Cs}$ 의 분포

Fig. 7은 토양 유기물과 감귤나무 부위별  $^{137}\text{Cs}$  분포와의 관계를 나타내었다. 감귤나무  $^{137}\text{Cs}$ 의 분포는 유기물 함량에 따라 달라지는데 유기물 함량이 8%이상으로 비교적 높은 서흥동, 덕수리, 온평리 그리고 위미리 지역에서는 감귤의 잎, 껍질 그리고 가식 부위에서 모두 검출되었으나, 8% 이하인 오라동과 귀덕리에서는 검출되지 않았다.

감귤나무 부위별  $^{137}\text{Cs}$ 함량은 지역에 따라 다른 경향을 보였다. 잎의  $^{137}\text{Cs}$ 함량은 다른 지역에 비해 서흥동은 2배 이상이었으나, 껍질과 가식부는 지역간의 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 부위별 함량정도는 잎, 껍질, 가식부위로 갈수록  $^{137}\text{Cs}$ 의 함량이 적어지는 경향을 나타내었다.

감귤나무의  $^{137}\text{Cs}$  뿌리흡수는 뿌리의 발육상태, 뿌리 주위의  $^{137}\text{Cs}$ 의 분포 그리고 토양특성에 따라 달라질 것으로 판단되어진다. 특히, 서흥동 지역의 감귤나무에서 잎의  $^{137}\text{Cs}$ 함량이 매우 높게 나타나는 것은 다른 지역에 비해 잔뿌리가 매우 발달되어 양분흡수를 많이하게 된 결과라고 판단된다.

부위별 함량정도가 잎, 껍질, 가식부위로 갈수록 적어지는 경향을 보였는데, 이는 Skarlou 등(1999)의 오렌지 나무를 이용한 실험에서 식물체내에서의  $^{137}\text{Cs}$  이동은 잎에서  $^{137}\text{Cs}$ 이 과포화 상태로 인하여 가식부위로 이동된다는 예상과 상반되는 결과였다. 그러므로 이것을 명확히 규명하기 위해서는 앞으로 더 많은 자료를 수집하여 상세한 실험을 행할 필요가 있다.

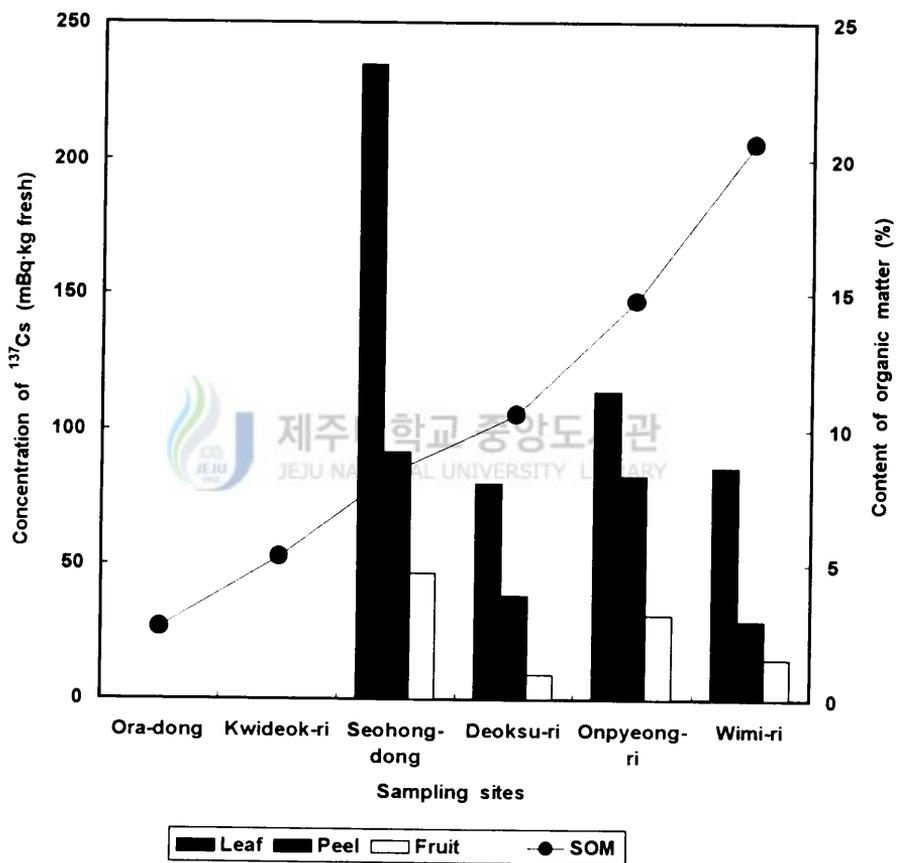


Fig. 7. The relationship between contents of soil organic matter and distributions of  $^{137}\text{Cs}$  on citrus trees.

#### 4. 토양과 식물체 전이계수

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

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

식 (1)에 의해서 계산된 전이계수 값들은 Table 5에 나타내었다. 토양 중 유기물 함량이 높은 서흥동, 덕수리, 온평리 그리고 위미리 지역에서 잎, 껍질 그리고 가식부위의 전이계수 값들은 각각  $2.15 \times 10^3 \sim 1.25 \times 10^2$ ,  $7.28 \times 10^4 \sim 8.13 \times 10^3$  그리고  $3.79 \times 10^4 \sim 3.08 \times 10^3$  범위를 나타내었다. 또한 유기물 함량이 낮은 오라동과 귀덕리 지역에는 식물체 중에  $^{137}\text{Cs}$ 가 검출되지 않아서 전이계수를 계산할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 유기물 함량이 8% 이상일 경우에만 전이계수를 계산할 수 있었다.

Skarlou 등(1999)은 오렌지 나무의  $^{137}\text{Cs}$  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. 일반적으로 토양에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 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.

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 나왔는데, 온실 내 포트 실험 결과(최 등, 1991 ; 이 등, 1991)  $3.8 \times 10^{-2}$  및  $1.1 \times 10^{-1}$ 와 비교하여  $^{137}\text{Cs}$  전이계수 차이가 실험적 방법에서 기인되었다고 하였다.

Table 5. Transfer factors of  $^{137}\text{Cs}$  from soil to plant

| Sampling site | Depth (cm) | OM (%) | Transfer factor       |                       |                       |                       |
|---------------|------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|               |            |        | Leaf                  | Peel                  | Fruit                 | Total                 |
| Ora-dong      | 0-5        | 6.09   | -                     | -                     | -                     | -                     |
|               | 5-10       | 2.70   | -                     | -                     | -                     | -                     |
|               | 10-20      | 1.87   | -                     | -                     | -                     | -                     |
| Kwideok-ri    | 0-5        | 7.52   | -                     | -                     | -                     | -                     |
|               | 5-10       | 5.28   | -                     | -                     | -                     | -                     |
|               | 10-20      | 4.34   | -                     | -                     | -                     | -                     |
| Seohong-dong  | 0-5        | 9.19   | $1.25 \times 10^{-2}$ | $4.90 \times 10^{-3}$ | $2.50 \times 10^{-3}$ | $1.99 \times 10^{-2}$ |
|               | 5-10       | 8.50   | $8.74 \times 10^{-3}$ | $3.42 \times 10^{-3}$ | $1.75 \times 10^{-3}$ | $1.39 \times 10^{-2}$ |
|               | 10-20      | 8.52   | $9.44 \times 10^{-3}$ | $3.69 \times 10^{-3}$ | $1.89 \times 10^{-3}$ | $1.50 \times 10^{-2}$ |
| Deoksu-ri     | 0-5        | 14.5   | $5.40 \times 10^{-3}$ | $2.55 \times 10^{-3}$ | $6.28 \times 10^{-4}$ | $8.58 \times 10^{-3}$ |
|               | 5-10       | 10.5   | $4.25 \times 10^{-3}$ | $2.01 \times 10^{-3}$ | $4.94 \times 10^{-4}$ | $6.76 \times 10^{-3}$ |
|               | 10-20      | 10.3   | $3.90 \times 10^{-3}$ | $1.84 \times 10^{-3}$ | $4.53 \times 10^{-4}$ | $6.20 \times 10^{-3}$ |
| Onpyeong-ri   | 0-5        | 16.4   | $3.28 \times 10^{-3}$ | $2.38 \times 10^{-3}$ | $9.03 \times 10^{-4}$ | $6.57 \times 10^{-3}$ |
|               | 5-10       | 14.7   | $3.29 \times 10^{-3}$ | $2.39 \times 10^{-3}$ | $9.06 \times 10^{-4}$ | $6.59 \times 10^{-3}$ |
|               | 10-20      | 14.3   | $1.12 \times 10^{-2}$ | $8.13 \times 10^{-3}$ | $3.08 \times 10^{-3}$ | $2.24 \times 10^{-2}$ |
| Wimi-ri       | 0-5        | 20.9   | $3.49 \times 10^{-3}$ | $1.18 \times 10^{-3}$ | $6.16 \times 10^{-4}$ | $5.29 \times 10^{-3}$ |
|               | 5-10       | 20.6   | $2.40 \times 10^{-3}$ | $8.11 \times 10^{-4}$ | $4.23 \times 10^{-4}$ | $3.63 \times 10^{-3}$ |
|               | 10-20      | 20.8   | $2.15 \times 10^{-3}$ | $7.28 \times 10^{-4}$ | $3.79 \times 10^{-4}$ | $3.26 \times 10^{-3}$ |

- : Not calculated due to no detection of  $^{137}\text{Cs}$  transfer, Total : Leaf + Peel + Fruit

## 5. 토양중 pH, 치환성 K, 그리고 유기물 함량과 전이계수와의 관계.

Fig. 8은 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. 그러나 Kuhn 등(1984), Lonsjo와 Haak(1996) 그리고 Wang 등(1997)은 토양 중의 pH가 증가하면  $^{137}\text{Cs}$  전이계수 값이 감소한다고 하였다. 이러한 경향은 pH의 변이폭이 좁았기 때문이라 판단되며, 이를 규명하기 위해서는 앞으로 조사 자료 수를 늘려 보다 상세한 실험을 행할 필요가 있다.

Fig. 9는 치환성 K와 전이계수와의 관계를 나타낸 것이다.  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수가 계산되지 않은 두 지점을 제외하고는 치환성 K 함량이 증가함에 따라 전이계수는 감소하는 경향을 보였다. 이것은 토양중 치환성 K 함량이 높아지면 상대적으로 치환성  $^{137}\text{Cs}$  함량이 낮아져 식물체로의  $^{137}\text{Cs}$  전이되는 양도 낮아졌기 때문이라고 사료되며, Kuhn 등(1984), Wang 등(1997), 그리고 Tsukada와 Nakamura(1999)가 여러 가지 작물에서의  $^{137}\text{Cs}$  전이계수 값은 토양 중 K 함량이 증가함에 따라 감소한다는 것과 유사한 경향이 나타났다. 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. 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 치환성 양이온은  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수에 영향을 주지 않거나(최 등, 1999), 치환성 양이온 용량이 증가함에 따라서 감소한다고 하였다(Lonsjo & Haak, 1996).

Fig. 10은 유기물 함량과 전이계수와의 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 추

정된다. 그러나 유기물 함량은 전이계수에 영향을 주지 않는다(최 등, 1999 ; Tsukada & Nakamura, 1999 ; Wang 등, 2000)는 보고도 있으며, Van Bergeijk 등 (1992) 및 Lonsjo와 Haak(1996)은 토양 중 유기물 함량이 증가하면  $^{137}\text{Cs}$  전이계수 값이 증가한다고 하였다.



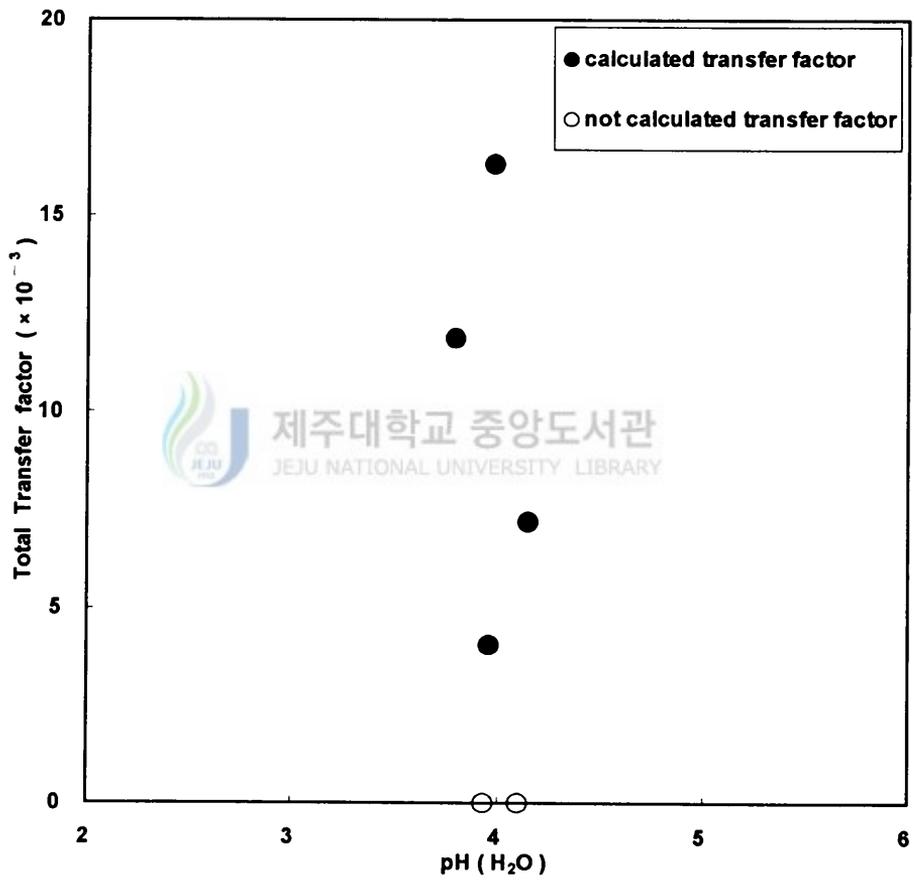


Fig. 8. The relationship between transfer factor and soil pH in soil.

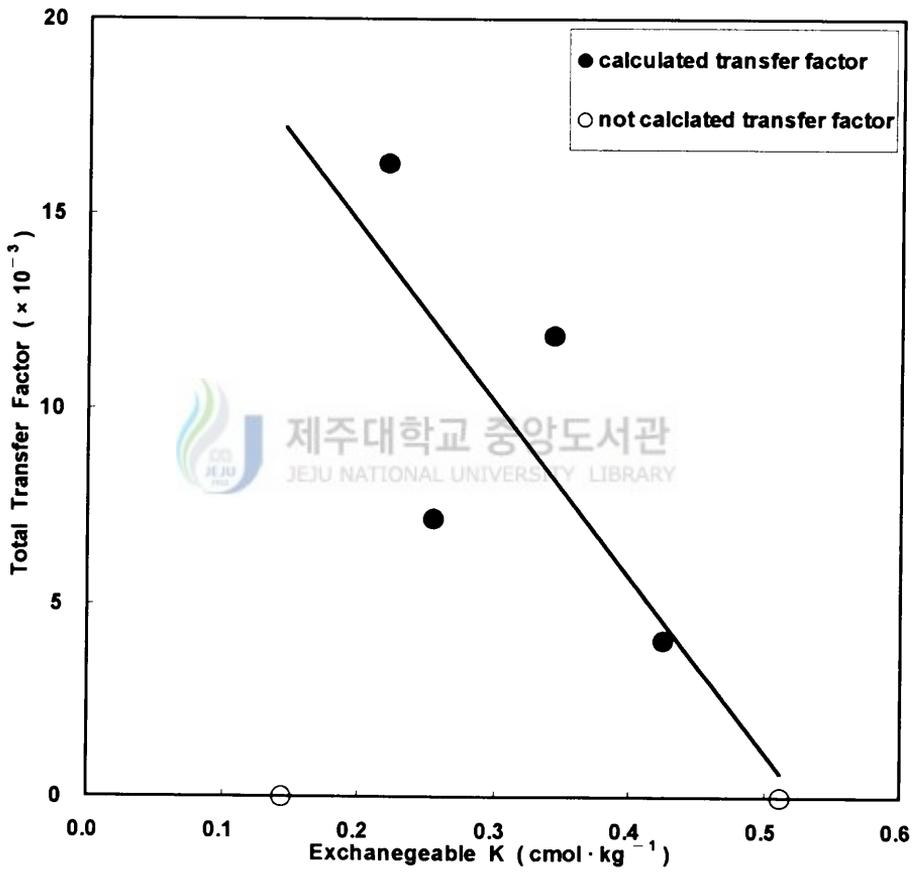


Fig. 9. The relationship between transfer factor and exchangeable K in soil.

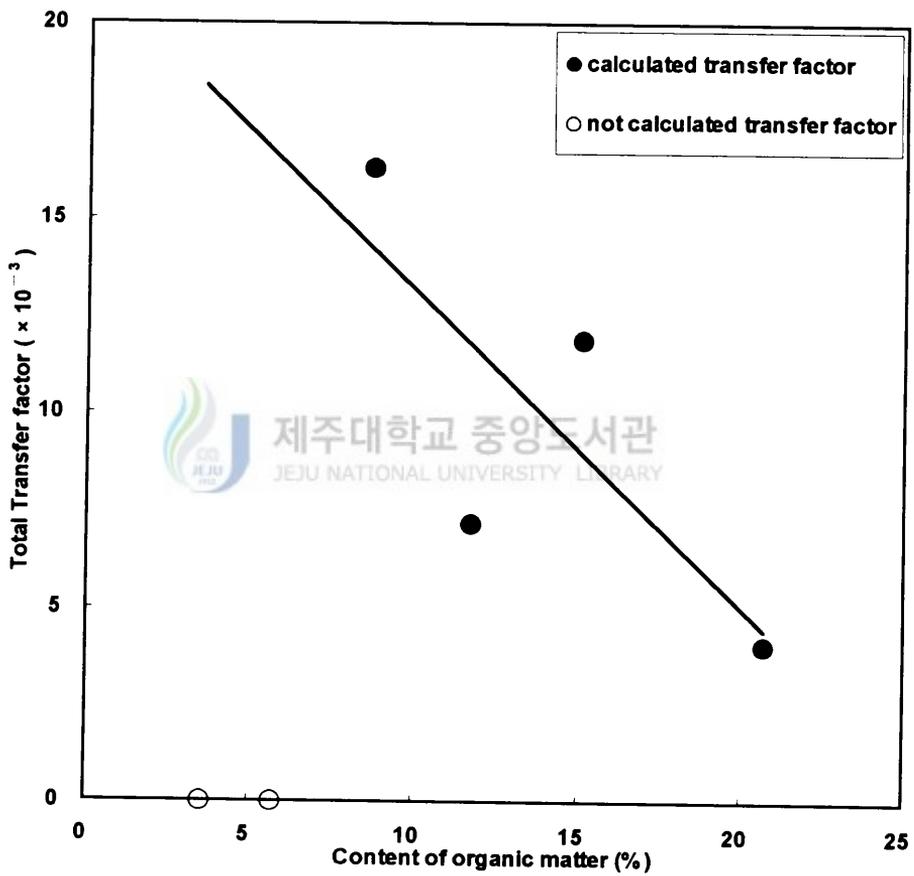


Fig. 10. The relationship between transfer factor and organic matter in soil.

## 6. 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.

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

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  $17.11 \text{ mBq/kg} \cdot \text{fresh}$ 와 우리 나라 국민의 일년동안 감귤을  $20 \text{ kg}$ 을 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. 그리고 Kimura와 Yamoki에 의해 삼백초를 섭취할 경우보다  $0.06 \sim 12 \mu\text{Sv}$  보다 더 낮았고, 일본과 Taiwan에서 고구마를 일년간 섭취할 경우의 예탁 유효선량인  $0.00429 \mu\text{Sv}$ 과  $0.0237 \mu\text{Sv}$ 보다 더 낮은 값으로 계산되었다(Wang 등, 2000). 그러므로 감귤 중  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도는 매우 낮으므로 이를 섭취한다고 해도 체내 피폭선량은 거의 무시할 수 있는 수준이었다.

## IV. 요약

본 연구는 제주도 토양 감귤나무에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이를 조사하기 위하여 도내 6개 지역의 감귤원에서 채취한 감귤과 토양시료를 이용하여 감마분광계로  $^{137}\text{Cs}$  농도를 측정하고, 또한 토양화학 특성과의 관계를 규명하고자 수행하였다.

1. 토양 중  $^{137}\text{Cs}$  농도는 유기물 함량이 높을수록 높은 경향을 보였다.
2. 토양 유기물 함량이 낮은 곳에서는 식물체 중에서  $^{137}\text{Cs}$ 이 검출되지 않았으나, 유기물 함량이 높은 지역에서는 검출되었고, 그 함량은 가식부위, 껍질 그리고 잎 순으로 높았다.
3. 토양에서 식물체로  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수는 잎, 껍질 그리고 가식부위에서 각각  $2.15 \times 10^{-3} \sim 1.25 \times 10^{-2}$ ,  $7.28 \times 10^{-4} \sim 8.13 \times 10^{-3}$  그리고  $3.79 \times 10^{-4} \sim 3.08 \times 10^{-3}$  범위를 보였고, 가식부위, 껍질 그리고 잎 순으로 높았다.
4. 토양 pH에 따라  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수는 서로 상관성이 없었으나, 치환성 K와 토양 유기물 함량이 높을수록 전이계수는 낮아지는 경향이 있었다.
5. 연간 예탁 유효 선량당량은  $0.0048 \mu\text{Sv}$ 로 체내 피폭선량은 거의 무시할 수 있는 수준이었다.

## V. 참고문헌

- Begona Quintana & Francisco Fernandez(1995). An Empirical Method to Determine Coincidence-Summing Corrections in Gamma Spectrometry. Appl. Radiat. Isot., Vol. 46, No. 9, pp. 961-964.
- 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.
- Chisato Takenaka, Yuichi Onda, Yasunori Hamajima(1998). Distribution of cesium-137 in Japanese forest soils : Correlation with the contents of organic carbon. Sci. Total Environ., Vol. 222, pp. 193-199.
- C. Papastefanou, M. Manolopoulou, S. Stoulos, A. Ioannidou, E. Gerasopoulos(1999). Soil-to-plant transfer of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^7\text{Be}$ . J. Environ. Radioact., Vol. 45, pp. 59-65.
- 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.
- Fredriksson, L., Lonsjo, H., & Eriksson, A.(1969). Studies on plant accumulation of fission products under Swedish conditions. Absorption of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  from soil by vegetable crops. C-4387-28. Research Institute of National Defense, Dept. 4, Stockholm, Sweden.

- F. Carini(1999). Radionuclides in plants bearing fruit : an overview. J. Environ. Radioact., Vol. 46, pp. 77-97.
- Green, N., Wilkins, B. T., & Hammond, D. J. (1997). Transfer of radionuclides to fruit. J. Radioanal. and Nucl. Chem., 226(1-2), pp. 195-200
- Hirose K., Aoyama M., Katsuragi Y., Sugimura Y.(1987). Annual deposition of Sr-90, Cs-137 and Pu-239, 240 from the 1961-1980 nuclear explosions : a simple model. J. Meteor. Soc. Japan, 65, pp. 259-277.
- Hirofumi Tsukada, Hisashi Shibata & Hideo Sugiyama(1998). Transfer of Radiocaesium and Stable Caesium from Substrata to Mushrooms in a Pine Forest in Rokkasho-mura, Aomori, Japan. J. Environ. Radioact., Vol. 39, No. 2, pp. 149-160.
- Hirofumi Tsukdad & Yuji Nakamura(1999). Transfer of <sup>137</sup>Cs and stable Cs from soil to potato in agricultural fields. Sci. Total Environ., vol. 228, pp. 111-120.
- International Commission on Radiological Protection(1978). Radionuclide release into the environment : Assessment of doses to man. ICRP Publication 29, Pergamon Press, Oxford, pp. 2-10.
- 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.
- International Union of Radioecologists(1989). Sixth report of the working group.

Soil-to-plant transfer factors. RIVM, Bilthoven, The Netherlands.

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

I. Ramos-Lerate, M. Barrera, R. A. Ligeró, M. Casas-Ruiz(1998). A New Method for Gamma-efficiency Calibration of Voluminal Samples in Cylindrical Geometry. J. Environ. Radioact., Vol. 38, No. 1, pp. 47-57.

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.

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.

Klas Rosen, Ingrid Oborn, Hans Lonsjo(1999). Migration of radiocaesium in Swedish soil profiles after the Chernobyl accident, 1987-1995. J. Environ. Radioact., 46, pp. 45-66.

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.

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.

- 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.
- Ng, Y. C., Colsher, C. S., & Thompson, S. E. (1982). Soil-to-plant concentration factors for radiological assessments. NUREG/CR-2975, UCID-19463.
- National Institute of Radiological Science(1979-1997). Radioactivity survey data in Japan. Nos. 48-112, NIRS, Chiba.
- 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.
- Roussel, S., Ottavi, L. & Marchand, S.(1984). Facteurs de transfert sol-plante : Mesures in situ ( $^{90}\text{Sr}$  et  $^{137}\text{Cs}$  - Mesures de points zeros). In IIIrd Report of the workgroup on Soil-to-Plant Transfer Factors. Prepared by RIVM, Bilthoven, The Netherlands, pp. 81-87.
- 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.
- RHO, Byung-Hwan, et al. Radiological Environmental Department 10 Regional Radiation Monitoring Stations(1996-1997). Environmental Radioactivity Survey Data in Korea. Korean Institute Nuclear Safety, Vol. 28-29
- Shoujiro Kimura & Rumi Yamaoki(1997). Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in Environmental

Soil and Crude Drugs. Jpn. J. Toxicol. Environ. Health, Vol. 43, No. 6, pp. 349-358.

Smolders E., Van den Brande K., Merckx R.(1997). Concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  and K in soil solution predict the plant availability of  $^{137}\text{Cs}$  in soils. Environ. Sci. Technol., 31, pp. 3432-3438.

S. Askbrant & J. Sandalls(1998). Root Uptake of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  by Rye-grass on Various Soils in the CIS. J. Environ. Radioact., Vol. 38, No. 1, pp. 85-95.

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.

Y. H. Choi, C. W. Lee, S. R. Kim, J. H. Lee & J. S. Jo(1998). Effect of Application Time of Radionuclides on Their Root Uptake by Chinese Cabbage and Radish. J. Environ. Radioac., Vol. 39, No. 2, pp. 183-198.

Yong Ho Choi, Chang Woo Lee, Kang Suk Lee and Jeong Ho Lee(1992). Absorption and Accumulation of Sr-90 by Rice and Soybean and Its Soil-to-Plant Transfer Coefficients. J. the Korean Nucl. Soci., Vol. 24, No. 2, pp. 121-129.

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.

- 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. Radioat., Vol. 45, pp. 139-147
- 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.
- 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
- 농촌진흥청 농업기술연구소(1976). 제주도토양정밀도. 광명인쇄사.
- 박정균, 한필수(1997). 사질토에 대한  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 수착유형 분석. Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers, Vol. 35, No. 4, pp. 463-467.
- 송관철(1989). 제주도 대표토양의 Andic Properties에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 1-98
- 제주도농업기술원(1994). 감귤의 경쟁력 제고를 위한 토양 관리와 시비기술. pp. 97-121.
- 제주도농업기술원(1998). 친환경농업 실천을 위한 흙살리기운동 농업인 교육교재. 신제주인쇄사, pp. 7-32
- 최용호, 임광목, 이명호, 최근식, 정규희(1999). 한국의 논과 밭에서  $^{137}\text{Cs}$ 의 토양-작물체 전이계수. Korean J. of Environ. Agri., vol. 18, No. 2, pp. 164-168.
- 한국원자력안전기술원(1998-2000). 국내 방사능 교차분석결과 보고서. 지방 측정소 측정요원 교육.

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 세심한 학문적 배려와 지도를 해주신 유장걸 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁘신 일정에도 불구하고 시간을 내어 많은 조언과 비평을 주신 고정대 교수님과 최치규 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

또한 평소 많은 가르침을 주신 김형욱 교수님, 강순선 교수님, 고정삼 교수님, 류기중 교수님, 현해남 교수님, 김찬식 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

본 논문을 수행하는 동안 귀중한 조언을 아끼지 않으시고 항상 옆에서 돌봐주신 방사능이용연구소의 송성준 박사님, 홍경애 박사님께도 심심한 감사를 드립니다. 그리고 김양록 선배님을 비롯한 비료·식물영양실험실의 모든 선배님들과 후배들에게도 고마움의 뜻을 전하며, 또한 아열대원예산업연구센터의 오병권 선생님, 대학원의 동기들과 여러 선배님들, 학과 조교선생님과 후배들에게도 고마움의 뜻을 전합니다. 그리고 본 논문이 무사히 끝날 수 있도록 옆에서 묵묵히 시료채취와 전처리를 도와준 박원표 후배와 논문에 대한 자료를 제공해 주신 한국원자력안전기술원의 환경평가실원님들 그리고 여러 지방 방사능 측정소의 측정요원님들에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 저를 키워주신 부모님과 누님들과 친우 정윤, 윤주, 동한, 수경과 진우회의 후배들과 함께 기쁨을 나누고 싶습니다.