



pISSN 0253-4231

eISSN 2466-2461

<http://dx.doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.1.049>

# Journal of Radiation Protection and Research

**Technical Paper**

Received July 14, 2015 / 1st Revised July 1, 2015 / 2nd Revised January 28, 2016 / Accepted February 22, 2016

## Distributions of $^{137}\text{Cs}$ and $^{90}\text{Sr}$ in the Soil of Uljin, South Korea

JiYeon Song\*, Wan Kim\*, Seongjin Maeng<sup>†</sup>, and Sang Hoon Lee<sup>‡</sup>

\* Radiation Science Research Institute, Kyungpook National University

<sup>†</sup> School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University<sup>‡</sup> School of Energy Engineering, Kyungpook National University

### ABSTRACT

**Background:** For the purpose of baseline data collection and enhancement of environmental monitoring the distribution studies of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the soil of Uljin province was performed and the relation between surface soil activities and soil properties (pH, TOC and median of the surface soil) was analyzed.

**Materials and Methods:** For 14 spots within 10 km from the NPP surface soil samples were collected and soils for depth profile were sampled for 3 spots in April 2011. Using  $\gamma$ -ray spectrometry with HPGe detector, the concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  were determined and the concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  were measured by counting  $\beta$ -activity of  $^{90}\text{Y}$  (in equilibrium with  $^{90}\text{Sr}$ ) in a gas flow proportional counter.

**Results and Discussion:** The concentration ranges of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  were  $<0.479\text{--}39.6\text{ Bq}(\text{kg-dry})^{-1}$  (avg.  $7.51\text{ Bq}(\text{kg-dry})^{-1}$ ) and  $0.209\text{--}1.85\text{ Bq}(\text{kg-dry})^{-1}$  (avg.  $0.74\text{ Bq}(\text{kg-dry})^{-1}$ ) which were similar to the reported values from other regions in Korea. The activity ratio of  $^{137}\text{Cs}$  to  $^{90}\text{Sr}$  in surface soils was around 9.67, which is much bigger than the initial value of 1.75 for worldwide fallouts because of faster downward movement of  $^{90}\text{Sr}$  after fallout than that of  $^{137}\text{Cs}$ . For depth profile studies soils were collected down to 40 cm depth for the locations of Deokgu, Hujeong and Maehwa. The  $^{137}\text{Cs}$  concentration distribution of the first two showed maximum values at top soils and decreased rapidly in exponential manner, while  $^{90}\text{Sr}$  showed two local maximum values for soils near top and about 30 cm depth. Through linear fittings between the  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  concentrations of surface soil and pH, TOC and median of the surface soil, the only probable relationship obtained was between  $^{137}\text{Cs}$  and TOC (determination coefficient  $R^2=0.6$ ).

**Conclusion:** The concentration ranges of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in Uljin were similar to the reported values from other regions in Korea. The only probable relationship obtained between activities and soil properties was between  $^{137}\text{Cs}$  and TOC.

**Keywords:** Environmental radioactivity,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , Soil, Uljin

Correspondence to Sang Hoon Lee  
lee@knu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non- Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 울진토양에서의 <sup>137</sup>Cs 및 <sup>90</sup>Sr 분포

송지연\*, 김원\*, 맹성진†, 이상훈‡

\*경북대학교 방사선과학연구소, †경북대학교 건설환경에너지공학부, ‡경북대학교 에너지공학부

2015년 7월 14일 접수 / 2015년 10월 7일 1차 수정 / 2016년 1월 28일 2차 수정 / 2016년 2월 22일 채택

**연구배경:** 우리나라 표층토양 중 원자력 발전소 주변 지역인 울진군을 중심으로 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 분포 현황을 조사하고, 토양 속 방사성핵종의 행동에 영향을 미치는 변수들과의 상관관계를 밝힘으로써 한국토양에 발생한 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 농도에 대한 기준자료 확보와 원자력시설 주변 환경영향 평가의 강화가 목적이다.

**재료 및 방법:** 원자력 발전소 인근 10 km이내의 지역 14곳에서 2011년 4월 표층토양 시료를 채취하였으며, 깊이에 따른 분포 조사를 위하여 40 cm 까지의 토양을 덕구, 후정, 매화 지역에서 채취하였다. <sup>137</sup>Cs의 농도는 HPGe 감마분광시스템으로, <sup>90</sup>Sr의 농도는 방사평형상태의 <sup>90</sup>Y을 기체 유동식 비례계수기로 측정하였다.

**결과 및 논의:** 표층토양에서 <sup>137</sup>Cs의 방사능농도는 <0.479-39.6 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>(평균 7.51 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>), <sup>90</sup>Sr의 방사능농도는 0.209-1.85 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>(평균 0.74 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>)이었다. 방사능비(<sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr)는 9.67로서 전지구적 초기 방사성 낙진의 1.75보다 큰 값을 보였는데, 이는 낙진 이후 <sup>90</sup>Sr의 침층으로의 빠른 이동성 때문이다. 깊이에 따른 분포는, 덕구와 후정의 토양에서 <sup>137</sup>Cs의 농도가 표층토양에서 가장 높고 깊이가 증가할수록 급격히 지수적으로 감소하는 경향을 보였으며, <sup>90</sup>Sr의 방사능농도는 표층 및 깊이 30 cm 부근에서 높은 값을 보였다. 표층토양 방사능 농도와 표층토양 변수들(pH, 유기물함량, 입도)과의 선형 피팅에서는 <sup>137</sup>Cs 방사능과 유기물함량 사이에 상당한 상관관계(결정계수 R<sup>2</sup>=0.6)가 있는 것으로 나타났다.

**결론:** 울진 토양의 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 방사능농도 범위는 한국 다른 지역의 값과 유사함을 확인하였고 <sup>137</sup>Cs 방사능과 유기물함량 사이에 상당한 상관관계를 확인하였다.

중심어 : 환경방사능, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, 토양, 울진

## 1. 서론

원자력발전소 주변에 대한 환경방사능 조사는 법과 규정에 따라 주민이 발전소 가동으로 인해 추가로 받게 되는 방사선량을 평가하고, 발전소 주변 환경에서 방사성물질의 축적 경향을 파악하며, 방사성물질의 배출에 의한 주변 환경의 영향을 판단하는 자료를 확보하기 위해 수행된다. 최근에는 환경보전에 대한 관심이 고조되고 원전주변 방사선 환경 안전에 대한 인식이 주요 문제로 대두되고 있어 법과 규정에 따른 조사 외에도 다양한 심층 조사가 필요하다. 조사의 대상지역인 울진에는 현재 시설용량 95만kW급인 한울 1, 2호기와 100만kW급인 한국표준형 경수로발전소 3, 4, 5, 6호기가 가동 중에 있으며, 원자력 발전시설의 운전과 관련하여 원전 주변의 환경방사능을 지속적으로 감시할 필요가 큰 지역이다. "한국원자력안전기술원"의 평가 보고서에 의하면 이 지역에서의 환경방사능을 수년간 조사한 결과, 검출되는 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr은 원전으로부터 기인한다기보다는 전국에서

거의 유사한 수준으로 검출되는 원폭실험의 방사성 낙진에 기인한 것으로 보인다[1].

많은 핵폭발실험, 구소련 체르노빌 원자력 발전소 사고 및 일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고로 많은 양의 방사성물질이 대기 중으로 방출되었고, 극소량이지만 원자로가동 및 핵연료재처리과정에서 인공방사성동위원소가 대기로 방출될 가능성이 있다. 대류권 및 성층권으로 방출된 방사성물질은 장기간에 걸쳐 빗물과 함께 지표면으로 낙하한다. 이중 반감기가 비교적 짧은 핵종들은 대부분 이미 붕괴되었고, 비교적 반감기가 긴 <sup>137</sup>Cs (30.2년)과 <sup>90</sup>Sr (28.8년), 그리고 Pu동위원소들은 아직도 방사성 낙진으로 환경시료에서 검출되며, 환경에서 오염수준은 시간과 지리적 위치에 따라 상당히 크게 변화된다 [2, 3].

<sup>137</sup>Cs은 1족 원소로 potassium(K)과 화학적 성질이 유사하여 인체로 쉽게 이동하고 주로 생식선에 침적된다. <sup>90</sup>Sr은 2족 원소로 calcium(Ca)과 화학적 성질이 유사하여 뼈에 침적되기 쉽고, 베타선만 방출하기 때문에 정량 분석을 하기 위해서는 화학적 전처리 과정이 필요하다.

이 두 핵종은 핵분열 생성물 중 다른 핵종들에 비해 상대적으로 핵분열 수율이 높은 핵종이며, 반감기가 비

책임저자 : 이상훈, lee@knu.ac.kr  
대구광역시 북구 대학로 80 공대 7호관 419호

교적 길이 현재에도 토양에서 검출되고 있다. 따라서 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 방사능농도 조사는 원자력시설의 가동으로 인해 환경에 미치는 영향을 파악하고, 다양한 환경적 경로를 통해 인체에 피폭되는 방사선량을 평가하는데 중요하다. 방사성물질의 토양 존재 여부에 대한 선행연구로는 2004년에 국내 토양조건이 각각 다른 6개 지역에서 각 지역별 토양의 깊이별 분포 및 이동을 결정하는 요인을 이해하기 위해 “토양 중 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 깊이별 분포특성”을 조사하였다[4]. 이 연구 결과에 따르면 강수량, 유기물함량, cation exchange capacity와는 대체로 양의 상관관계를 보였으나 점토함량에 대해서는 특성을 확인할 수 없었다. 그리고 상관관계에서 벗어나는 지역도 존재하였다.

본 연구에서는 환경모니터링 측면에서 토양 중 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 깊이별 농도 변화 요인에 대해 좀 더 세밀한 분석에 관심을 가지고, 다양한 방면으로 심화분석을 시도하였다. 이를 위한 한 방법으로 우리나라 표준토양 중 원자력 발전소 주변 지역인 울진군을 중심으로 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 분포 현황을 조사하고, 토양 속 방사성핵종의 행동에 영향을 미치는 변수들과의 상관관계를 밝힘으로써 낙진에 의해 한국토양에 발생한 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 농도에 대한 기준자료와 원자력시설 주변 환경영향 평가의 기초자료를 얻는데 그 목적을 두었다.

## 2. 재료 및 방법

토양시료의 채취는 2011년 4월 Fig. 1과 같이 울진 원자력발전소와 가까운 북면과 죽변면에 한정하여, 발전소와 인접한 지역에 대한 핵종 분포를 조사하기 위하여 면역 내에 있는 리 단위 13개의 지점(나곡리, 부구리, 후정

리, 죽변리, 봉평리, 화성리, 신화리, 소곡리, 하당리, 중리, 검성리, 상당리, 덕구리)을 선택하였다. 이는 모두 원자력 발전소 인근 10 km이내의 지역들이다. 비교지점으로 원전에서 16 km이상 떨어진 매화리를 선정하였다. 채취 장소는 최근 40여 년간 인위적 교란이 없을 것으로 생각되는 평탄한 장소를 선정하였다(Table 1). 토양의 pH는 휴대용 pH/mV/Temperature Meter(IQ150, SPECTRUM TECHNOLOGIES, Aurora, IL)를 사용하여 측정하였고, 유기물함량은 건조한 토양시료 중 일부를 총 유기탄소(Total Organic Carbon) 분석기(TOC-Vcph, Shimadzu, JAPAN)로 분석하였다. 토양의 입자크기는 건조한 토양시료를 2 mm 체로 걸러서 입자크기분석기(N5, Beckman Coulter, Carlsbad, CA)를 이용하여 건식



Fig. 1. Sampling sites in Uljin.

Table 1. Characteristics of Uljin Soil Samples

Ko.*	Site		Location		Main texture		pH	Organic [%]	Note
	Eng.†	Abb.‡	Longitude	Latitude	Name	Median [mm]			
검성	Geomseong	gs	37°07'50.65"	129°19'59.95"	coarse sand	0.572	5.74	1.24	Surface sample
나곡	Nagok	nk	37°07'24.10"	129°22'14.90"	medium sand	0.411	5.56	0.39	Surface sample
덕구	Deokgu	dg	37°04'39.06"	129°17'08.34"	find sand	0.369	5.59	1.70	Surface+depth sample
봉평	Bongpyeong	bp	37°02'31.50"	129°24'09.06"	medium sand	0.486	4.61	1.09	Surface sample
부구	Bugu	bg	37°06'08.30"	129°21'57.94"	coarse sand	0.719	4.08	4.20	Surface sample
상당	Sangdang	sd	37°03'38.22"	129°17'38.01"	coarse sand	0.726	4.01	1.44	Surface sample
소곡	Sogok	sk	37°04'32.97"	129°20'44.86"	coarse sand	0.526	4.59	1.22	Surface sample
신화	Sinhwa	sh	37°04'54.06"	129°22'26.64"	coarse sand	0.545	5.48	2.09	Surface sample
죽변	Jukbyeon	jb	37°03'42.06"	129°25'36.54"	find sand	0.434	5.67	0.35	Surface sample
중리	Jung-ri	jl	37°05'26.77"	129°20'25.18"	coarse sand	0.503	5.75	2.32	Surface sample
하당	Hadang	hd	37°02'25.13"	129°19'24.45"	coarse sand	0.53	5.04	1.36	Surface sample
화성	Hwaseong	hs	37°02'31.68"	129°24'09.24"	coarse sand	0.584	5.8	2.44	Surface sample
후정	Hujeong	hj	37°04'13.92"	129°24'53.28"	medium sand	0.444	5.72	0.44	Surface+depth sample
매화	Maehwa	mh	36°54'29.33"	129°22'33.20"	coarse sand	0.592	5.63	2.15	Surface+depth sample

\* Ko. : Korean

† Eng. : English

‡ Abb. : Abbreviation

으로 분석, 평균입경(Graphic Mean)을 기준으로 coarse sand(1-0.5 mm), medium sand(0.5-0.25 mm), fine sand(0.25-0.125 mm)로 구분하였다. 그리고 위도와 경도는 토양시료를 채취할 때 GPS를 이용하여 측정하였다.

각 장소에서 10×10 m<sup>2</sup> 면적 이내의 3-4군데에서 표층(0-4 cm)토양을 채취한 후 혼합하여 표층토양시료로 사용하였다. 그리고 깊이별 방사능 농도의 분포특성(depth profile)을 조사하기 위하여 후정과 덕구, 매화 지점에서 10×10 m<sup>2</sup> 면적 이내의 3-4군데에서 토양 채취기를 이용하여 깊이 40 cm 까지의 토양을 채취하여 4 cm 간격으로 나누었다. 이때 시료 채취기를 사용하기 어려운 경우(매화)에는 토양단면을 잘라 4 cm 간격으로 10회 취하여 40 cm 깊이까지 토양을 채취하였다. 건조토양을 1 mm의 체로 걸러 450ml 마리넬리 비커에 충전하여 세슘 분석을 위한 시료로 사용하였고, 스트론튬 분석을 위한 화학전처리 방법으로는 Willard HH, Goodspeed EW의 발연질산법을 이용하였다[5].

<sup>137</sup>Cs은 고순도 게르마늄(HPGe)을 이용한 감마핵종 분석기(상대효율은 30-33%)를 사용하여 감마핵종을 분석하였다. 측정시간은 약 86,000초로 하였다. 분석프로그램은 APTEC(APTEC Co., N. Tonawanda, NY)을 사용하였고, 이때 energy tolerance는 0.75 keV, abundance limit는 40 %, confidence level은 2σ로 하였다.

<sup>90</sup>Sr은 기체유동형 비례계수관을 사용한 알파베타계수기(LB5100/S5E, Canberra, Meriden, CT)로 측정하였다. 측정용 시료와 백그라운드 시료의 계측시간은 모두 20분간, 10회 이상 계측하고 평균값을 취하여 방사능 농도를 구하였다.

### 3. 결과 및 논의

울진 표층토양에서 <sup>137</sup>Cs의 방사능 농도범위는 <0.479-39.6 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup> (평균 : 7.51 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>) 이었다. 부구의 토양에서 가장 높게 나타났고 소곡 토양에서 가장 낮게 검출되었다. 부구 토양에서 39.6 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>로 비교적 높은 농도를 나타내는데, 이는 Table 1에서 볼 수 있듯이 다른 지역에 비해 유기물 함량이 높기 때문인 것을 확인할 수 있다. Cha HJ, et al.에서 방사능 농도는 강수량, 유기물함량 등과 양의 상관관계를 가지는데 본 연구지역에 대한 강수량 차이는 알기 어려워 낙진의 차이 정도는 알 수 없으나 유기물함량이 많은 토양에서 방사능 농도가 높은 것을 볼 수 있었다[4]. cesium 및 strontium 이온은 점토물질에 대한 화학적 친화도가 큰 물질로서 토양에서 cesium의 이동은 토양의 조직(texture), 광물조성, 양이온과 더불어 유기물함량의 영향을 크게 받는다[4].

"원자력 이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가" 에서 검출된 토양 중 <sup>137</sup>Cs의 방사능 농도범위(<0.982-41.0 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>)와 "전국 환경방사능조사"에서 나타난 전국 토양에서의 <sup>137</sup>Cs 방사능 농도범위(0.758-12.9 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>)와 비교하여 볼 때 전국토양에서 검출되고 있는 범위와 유사한 값이었다[1, 6].

표층토양에서 <sup>90</sup>Sr의 방사능 농도범위는 0.209-1.85 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup> (평균 : 0.74 Bq(kg-dry)<sup>-1</sup>) 이었다. 덕구 토양에서 가장 높게 나타났고 죽변 토양에서 가장 낮게 검출되었다(Table 2). 이는 10 km 이내의 가까운 지역이라 할지라도 환경방사능 농도에는 큰 차이가 있을 수 있음을 나타낸다.

Table 2. <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr Activity Concentration in the Surface Soil

Site	Concentration [Bq(kg-dry) <sup>-1</sup> ]		<sup>137</sup> Cs / <sup>90</sup> Sr Ratio
	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	
gs	2.25±0.40	0.534±0.073	4.21±0.94
nk	0.755±0.278	0.223±0.063	3.38±1.57
dg	6.31±0.22	1.85±0.08	3.41±0.19
bp	8.59±0.33	1.40±0.09	6.13±0.46
bg	39.6±1.1	1.40±0.08	28.3±1.8
sd	0.922±0.166	1.20±0.09	0.768±0.150
sk	<0.479	0.342±0.051	<1.40
sh	1.80±0.23	0.860±0.065	2.09±0.31
jb	0.720±0.368	0.209±0.042	3.44±1.89
jl	12.9±1.0	0.656±0.054	19.7±2.2
hd	2.70±0.40	0.383±0.064	7.05±1.57
hs	14.3±0.4	0.698±0.145	20.5±4.3
hj	6.13±0.98	0.248±0.058	24.7±7.0
mh	0.657±0.294	0.314±0.072	2.09±1.05

\* The measurement uncertainties are 1σ value from Poisson counting statistics.

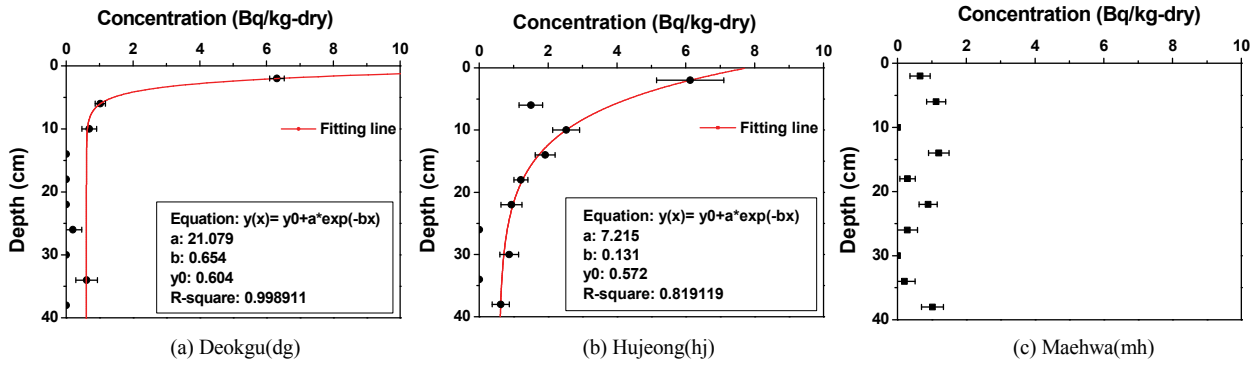


Fig. 2. Depth distribution of <sup>137</sup>Cs in the soil of (a) Deokgu, (b) Hujeong and (c) Maehwa.

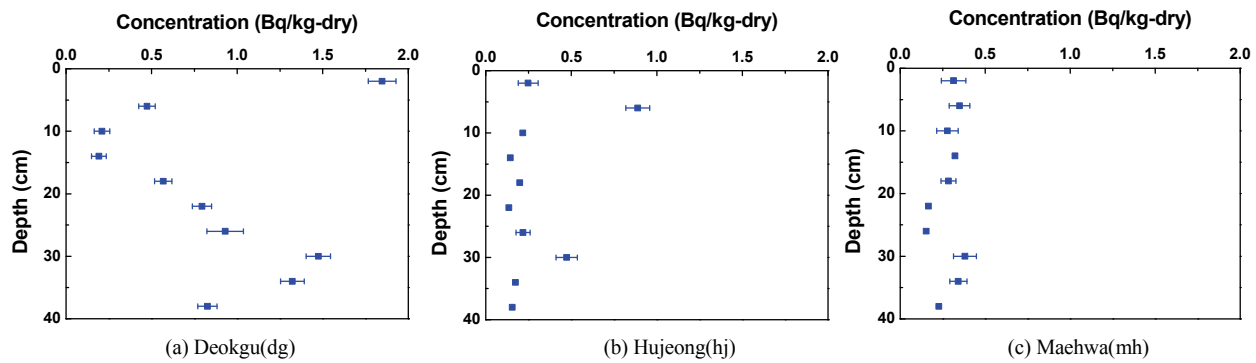


Fig. 3. Depth distribution of <sup>90</sup>Sr in the soil of (a) Deokgu, (b) Hujeong and (c) Maehwa.

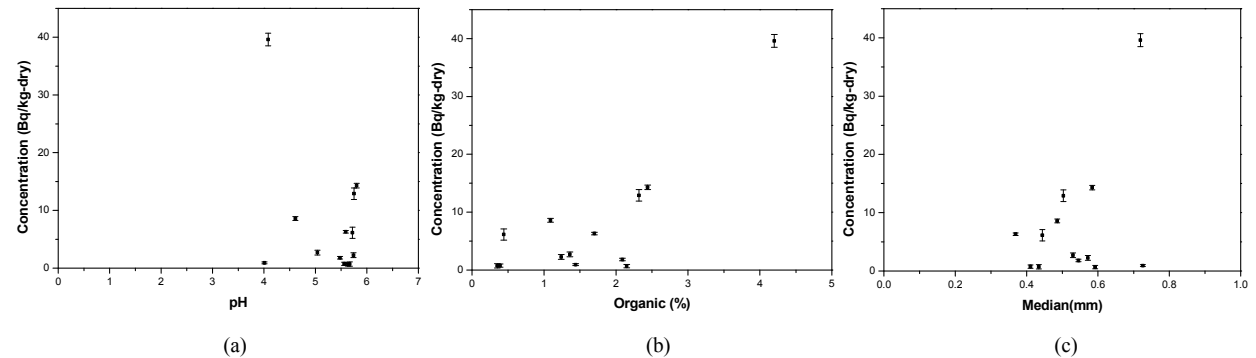


Fig. 4. Relationships between the <sup>137</sup>Cs concentration and (a) pH, (b) Organic, (c) Median.

"원자력 이용시설 주변 방사선환경조사 및 평가" 에서 검출된 토양 중 <sup>90</sup>Sr의 방사능 농도범위(0.172-1.92) 이 내의 값이었다[1].

<sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 평균비(Table 2)는 9.67로, 이는 일반적인 초기 방사성낙진에 의한 농도비(약1.7)보다 훨씬 큰 값이다[7]. 그 이유로는 토양에 존재하고 있는 안정 strontium과 두 핵종의 토양교질입자에 대한 흡착 용이성 차이에 의해 시간경과에 따라 2가 이온인 strontium은 토양의 깊은 층으로 많은 이동을 하는 반면, 1가 이온인 cesium은 대부분이 여전히 표층토양에 존재하기 때문에 비는 점점 더 큰 값을 가지게 되는 것이다[4, 8, 9].

각 지역별 <sup>137</sup>Cs 방사능농도의 깊이분포(Fig. 2)는 덕구와 후정에서는 표층토양(0-4 cm)에서 가장 높고 깊이가 증가할수록 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였다.

이는 cesium이 대부분 표층토양에 존재하는 유기물과 결합력이 좋아 표층토양에 쉽게 흡착, 고정되어 강수 등에 의한 확산성이 다소 적기 때문이다 Cha HJ, et al.의 선행연구와 비교하여 볼 때, 정도의 차이는 있으나 토양 깊이에 따라 급격히 감소하는 경향성은 유사함을 확인할 수 있다[4]. 매화에서는 깊이에 상관없이 비교적 비슷하고, 작은 값이 나타났다. 이는 채취지점이 교란이 발생한 지역의 토양이었던 것으로 추정된다.

각 지역별 <sup>90</sup>Sr 방사능 농도의 깊이에 따른 분포(Fig. 3)는 덕구 토양과 후정 토양에서는 방사능 농도가 표층 토양(0-4 cm) 부근과 깊이 30 cm 토양에서 높았다. Cha HJ, et al.의 선행연구와 비교하여 볼 때, 다소 상관관계가 적지만 깊이 30 cm 토양에서 높은 값을 나타내는 것을 제외하고는 깊이에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유로는 토양교질입자에 대한 흡착 용이성 차이

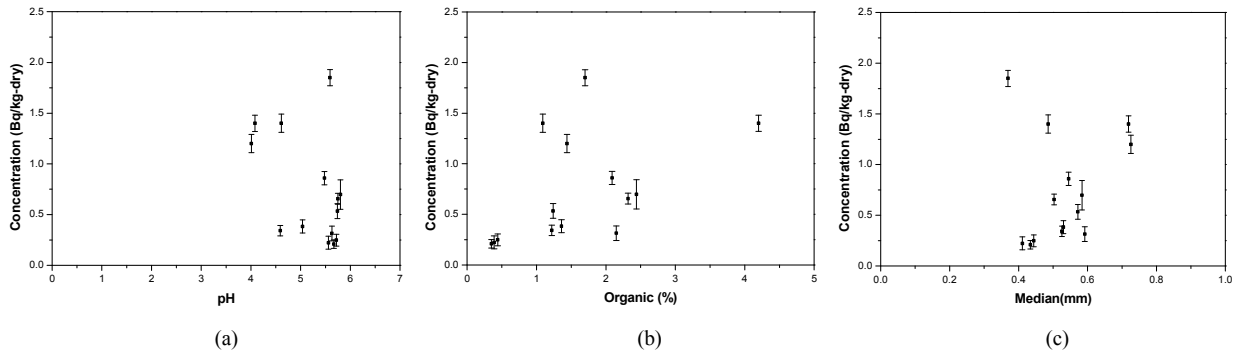


Fig. 5. Relationships between the <sup>90</sup>Sr concentration and (a) pH, (b) Organic, (c) Median.

에 의해 1가 이온인 cesium은 2가 이온인 strontium에 비해 잘 흡착, 고정되어 있으며 토양에는 이미 안정 strontium 및 calcium 등의 2가 이온들이 많이 존재하여 강우를 통해 토양으로 침적된 방사성 strontium이 유기물이나 무기물과 잘 결합하지 못하고 상대적으로 깊은 토양으로 이동하기 때문이다[8, 9]. 깊이 30 cm 토양에서 높은 값을 가지는 것은 낙진 당시의 핵종들이 해당 깊이만큼 이동한 것으로 보이나 좀 더 많은 연구들을 통한 확인이 필요하다. 비교지점인 대화에서는 역시 <sup>137</sup>Cs과 유사하게, 깊이에 상관없이 비교적 비슷하고 작은 값이 나타났다.

토양의 특성(pH, Organic, Median)과 <sup>137</sup>Cs 및 <sup>90</sup>Sr의 방사능과의 관계(Fig. 4, Fig. 5)에서는, 일반적으로 방사능이 토양의 pH, 유기탄소함량과는 양의 상관관계를, 입자크기와는 음의 상관관계를 가진다고 알려져 있으나[4, 10], 본 연구에서는 유의미한 결과를 얻지 못하였다. <sup>137</sup>Cs과 Organic과의 관계에서는 양의 상관관계( $R^2=0.6$ )가 보이는 것 같으나, 토양에서의 방사능농도는 위 변수들과 다른 여러 변수들이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 보다 신뢰도 높은 결과를 위해서는 추후 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 결론

울진 표층토양에서 검출된 <sup>137</sup>Cs 및 <sup>90</sup>Sr의 방사능 농도는 과거 대기권 핵실험 및 주변국가의 원자력발전소 사고 등에 의한 영향으로 현재 전국토양에서 검출되고 있는 수준이며[1, 6] 원자력발전소에서 생성되는 <sup>134</sup>Cs와 같은 다른 인공 감마 동위원소가 검출되지 않았다는 점을 근거로 최근 원자력발전소 가동에 의한 영향이 아님을 판단할 수 있다.

<sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr 비는 초기 낙진에 의한 농도 비 1.7에 비하여 높은 9.67의 값을 보였으며, 이는 두 핵종의 토양 교질입자에 대한 흡착 용이성 차이에 의한 것과, 토양에 존재하고 있는 안정 strontium에 의해 시간경과에 따라 2가 이온인 strontium은 토양의 깊은 층으로 많은 이동을 하는 반면, 1가 이온인 cesium은 대부분이 여전히 표층토양에 존재하기 때문에 비는 점점 더 큰 값을 가지게

되는 것이다.

<sup>137</sup>Cs 방사능 농도의 깊이 분포는 교란이 없는 지역의 토양에서 표층토양이 여전히 높고 깊이에 따라 지수 함수적으로 감소하는 반면, <sup>90</sup>Sr 방사능 농도의 깊이 분포는 교란이 없는 지역의 토양에서 낙진 당시의 핵종들이 깊이 30 cm 부근으로 많이 이동한 것을 확인하였다.

토양의 특성(pH, Organic, Median)과 <sup>137</sup>Cs 및 <sup>90</sup>Sr의 방사능과의 관계에서는 유의미한 결과를 얻지 못하였다. 토양에서의 방사능농도는 여러 변수들이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 보다 신뢰도 높은 결과를 위해서는 추후 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

#### 감사의 글

이 논문은 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2026280)으로 수행된 연구결과입니다.

#### REFERENCES

1. Korea Institute of Nuclear Safety. The annual report on the environmental radiological surveillance and assessment around the nuclear facilities, KINS/AR-140, Daejeon, Republic of Korea, 2010;46-51.
2. KNS Committee on the Fukushima Accident. Final report on Fukushima NPP accident analysis. Korean Nuclear Society, 2013;60-69.
3. Cooper JR, Randle K, Sokhi RS. Radioactive releases in the environment, 1st Ed, John Wiley & Sons, 2003;1-24.
4. Cha HJ, et al. Vertical distribution of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr activities in the soils of Korea. Journal of Radiation Protection and Research, 2004;29(3): 197-204.
5. Willard HH, Goodspeed EW. Separation of strontium, barium, and lead from calcium and other metals - by precipitation as nitrates. Ind. Eng. Chem, 1936;8(6):414-418.
6. Korea Institute of Nuclear Safety. Environmental radioactivity survey in Korea, KINS/ER-028.

- Daejeon, Republic of Korea. 2011;85-86.
7. Kirchner TB, Whicker FW, Otis MD. PATHWAY: A simulation model of radionuclide-transport through agricultural food chains. Third International Conference on State-of-the Art in Ecological Modeling, Colorado State Univ. Ft. Collins, CO. 1982 May 24-28;10.
  8. Thornthwaite CW, Mather JR, Nakamura JK. Movement of radiostrontium in soils. Science. 1960;131(3406):1015-1019.
  9. Russell RS. Deposition of  $^{90}\text{Sr}$  and its content in vegetation and in human diet in the United Kingdom. Nature. 1958;182:834-839.
  10. He Q, Walling DE. Interpreting particle size effects in the adsorption of  $^{137}\text{Cs}$  and unsupported  $^{210}\text{Pb}$  by mineral soils and sediments. J. Environ. Radioact. 1996;30(2):117-137.