

## 지구통계학적 방법에 의한 영광원전주변 토층내 Cs-137 및 K-40 측정 결과의 해석

김경웅<sup>1\*</sup> · 이재석<sup>1</sup> · 문승현<sup>1</sup> · 박철승<sup>1</sup> · 고일원<sup>1</sup> · 고은정<sup>1</sup> · 조병욱<sup>2</sup> · 정철영<sup>2</sup> · 전수열<sup>2</sup> · 김동욱<sup>3</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원 에너지환경센터, <sup>2</sup>영광원자력발전소 환경분석실, <sup>3</sup>천안공대 환경공학과

## Geostatistical Interpretation of Cs-137 and K-40 Result of the Lithosphere in the Vicinity of Youngkwang Nuclear Power Plant

Kyoung-Woong Kim<sup>1\*</sup>, Jae-Suk Lee<sup>1</sup>, Seung-Hyun Moon<sup>1</sup>, Chul-Seung Park<sup>1</sup>, Ilwon Ko<sup>1</sup>, Eun-Joung Ko<sup>1</sup>, Byung-Ok Cho<sup>2</sup>, Chul-Young Jung<sup>2</sup>, Su-Yul Jeon<sup>2</sup> and Dong-Wook Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Energy and Environment Research Center, Kwangju Institute of Science and Technology, Republic of Korea

<sup>2</sup>Environment Analysis Laboratory, Youngkwang Nuclear Power Plant, Republic of Korea

<sup>3</sup>Cheonan National Technical College, Cheonan 330-717, Republic of Korea

In order to investigate the influence of nuclear power plant operation on its nearby environment, soil, stream and marine sediment samples were collected in the vicinity of the Youngkwang Nuclear Power Plant in Korea, and analyzed for artificial and natural radionuclide radioactivity. From the analytical result, Cs-137 was detected in most soil samples, but it may have been derived from past nuclear weapon tests because Cs-134 having short half-life was not detected. The radioactivities of Cs-137 in the sediment samples were also detected which are within the normal range in the sediments based upon the published literature between 1997 and 1999. For the quality control of radioactivity analysis of environmental samples, sets of marine sediments in the Gamami area were analyzed using two HPGe Gamma-ray Spectroscopes (30% and 45%) according to the geostatistical sampling strategy, and Cs-137 and K-40 results were interpreted by analysis of variance (ANOVA). In the two-way ANOVA, variances derived from the geochemical variation were significant, but errors from sampling and analytical procedures are negligible. In conclusion, all the radioanalytical procedures of this study including sampling are validated to be acceptable.

**Key words :** Youngkwang nuclear power plant, gamma-ray spectroscopy, quality control of analytical result, analysis of variance, Cs-137 and K-40

광주과학기술원 에너지환경연구센터에서는 2000년 한해 동안 원자력발전소 주변 환경방사선 조사계획에 의거하여 영광원자력발전소 부지외부 및 비교지점에서 토양, 하천토 및 해저토 등 환경방사능 시료에 대한 감마선 방출핵종 분석을 수행하였다. 분석결과 토양과 하천토 및 해저토에서 인공핵종인 Cs-137이 검출되었으나 지난 3년간(1997-99)의 측정치인 정상범위 이내의 값이었고, 원전과 관계없는 일반지역에서 검출되는 수준과도 동일하며, 반감기가 짧은 Cs-134는 전혀 검출되지 않은 것으로 보아 원전가동에 의한 영향이 아님을 알 수 있다. 환경시료 측정에 대한 품질관리를 위해 임의로 선정된 가마미인근에서 해저토 시료를 각각 5지점에서 중복시료로 채취하여 상대 검출효율이 각각 30%, 45%인 2대의 HPGe Gamma-ray Spectroscope로 동시에 분석하여 환경방사선 측정자료와 분석의 신뢰도를 향상시키기 위한 지구통계학적인 연구를 수행하였다. 이를 위해서 두가지 요인을 설정하여 시료분석방법과 채취지점의 차이를 이원배치 분산분석을 수행하였다. Two-way ANOVA 결과 Cs-137 및 K-40의 경우 시료채취 지점의 차이에 의한 분산만이 유효하며, 시료채취 및 분석과정에서의 생기는 오차는 무시할 만 하여 지금까지 수행되어진 시료채취 및 분석방법은 신뢰할 만하다고 할 수 있었다.

**주요어 :** 영광원자력발전소, 감마핵종분석, 분석결과의 신뢰성, 분산분석, Cs-137 및 K-40

\*Corresponding author: kwkim@kjist.ac.kr

### 1. 서 론

영광원자력발전소에서는 발전소 가동이전부터 한국 원자력연구소의 협조하에 발전소 부지의 환경방사능 조사 및 평가를 수행하였으며, 1986년 1월부터는 자체 환경방사능 실험실을 운영, 지속적인 감시활동을 수행하고 있다(박종섭 등, 1999). 또한 환경방사능 감시의 객관성, 신뢰성, 투명성을 확보하기 위하여 원전부지의 부 환경방사능 조사를 원전주변 지역에 위치하고 있는 신뢰성 있는 연구 기관에 위탁하게 되어 현재까지도 그 조사가 계속되고 있다(한국전력공사, 1997).

광주과학기술원에서는 2000년도의 환경방사능 분석을 위한 시료를 원자력발전소의 인근 지역인 영광 및 고창 지역에서 채취하였으며, 시료는 크게 육상시료, 물시료, 해양시료로 구분된다. 분석항목에 있어서는 총체적인 환경방사능 변동상황을 가장 잘 나타내고 있는 감마핵종분석기(HPGe Gamma-ray Spectroscopy)에 의한 감마핵종 분석, 저준위 알파·베타계수기(Low Level  $\alpha/\beta$  Counter)에 의한 전베타 분석, 스트론튬 분석, 방사성 옥소 분석 및 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter)에 의한 삼중수소 분석이 행해져왔다(한국원자력안전기술원, 1992). 본 연구는 총체적인 환경 방사능

분석항목중 토양, 하천토 및 해저토의 감마핵종분석을 이용해 계절에 따른 변화를 보여주는 인공핵종 Cs-137 과 천연핵종인 K-40을 대상으로 분석결과의 분포를 해석하고자 하였다(광주과학기술원 에너지환경연구센터, 2001). 또한 원자력발전소주변 방사선 환경분석결과와 신뢰성확보가 주요 문제로 대두되고 있어, 분산분석(ANOVA)을 이용한 지구통계학적인 방법에 의해 분석의 신뢰성을 평가하고자 하였다(Davies, 1986). 이를 위해 시료채취 시기 및 분석방법을 고려한 후 지구통계학적으로 미리 계획된 절차대로 가마미주변지역에서 해저토 시료를 채취한 후 그 시료에 대한 Cs-137 및 K-40의 분석결과를 이용, 분산분석을 수행하였다.

### 2. 시료채취 및 분석방법

시료채취 지점은 과기부고시 제 96-31호에 의거하여 발전소 부지 주변의 인구 분포, 방사능 착지지점, 기상상태, 해상조건, 지형 및 접근의 용이성 등을 1차적으로 고려하고 원전의 고유한 설계특성 및 방사성물질 방출형태 등을 고려하여 한국원자력연구소의 자문을 받아 선정하였다(한국전력공사, 1995). 또한 원전 운영으로 인한 영향을 받지 않는 지점을 비교지점으

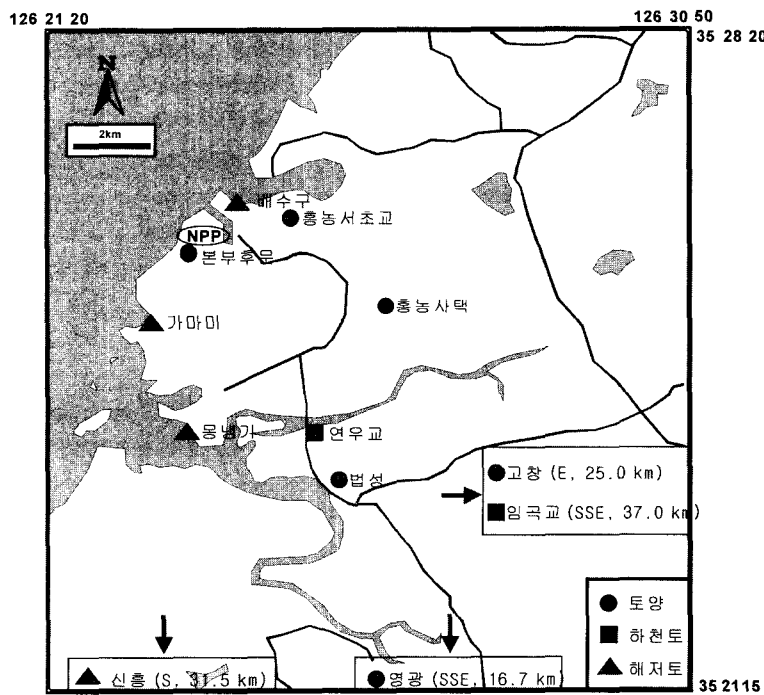


Fig. 1. Sampling sites in the vicinity of the Youngkwang Nuclear Power Plant area.

로 선정하여 시료를 채취·분석하고 그 결과를 상기 시료 분석결과와 비교 평가하였다(Fig. 1).

환경방사능을 평가하기 위해서 기체폐기물의 영향을 받는 토양은 본부후문, 홍농서초교, 홍농사택, 법성, 영광, 고창에서 2000년 4월과 10월에 채취하였다. 채취 장소는 미경작지로 지표수 등의 유동에 의한 침식, 붕괴 및 인위적 변동이 없는 평탄한 지점을 선정 한 후, 이곳을 중심으로 반경 5 m내에서 일정한 방위와 간격으로 5곳에서 일정면적을 일정깊이로 채취 가능하도록 제작한 토양시료 채취기를 사용하여 지표면에서 5 cm 깊이로 총 3-5 kg을 채취, 혼합하여 사용하였다. 하천토는 연우교와 임곡교에서 하천의 저상토(低床土)중 지표수 등의 유동에 의한 침식, 붕괴 및 인위적 변동이 없는 지점을 선정한 후, 시료채집기를 사용하여 3-5 kg씩 분기마다 채취하였다. 해저토는 방사성 강하물이나 원전으로부터 방출되는 방사성 물질이 축적되는 경향을 조사하기 위하여(Carter, 1993) 배수구와 몽내기 및 신홍의 해안에서 2000년 4월과 10월에 채취하였다. 해저토 중의 방사성 핵종의 대부분은 해저토 입자의 표면에 침착되고 입자가 작을수록 방사능 농도가 높아지는 경향이 있으므로 해저토 표면에서 5 cm 깊이로 총 4-5 kg정도를 채취, 혼합하여 사용하였다(Mackenzic *et al.*, 1999).

이 세 종류의 채취한 시료는 고르게 퍼서 이물질을 제거하고 105 열풍건조기에서 48시간동안 건조시킨 후 방냉하였다. 건조된 시료는 분쇄와 1 mm mesh의 체질후 균일하게 혼합하고 각 시료의 무게를 측정하여 450 ml Marinelli Beaker에 담았다. 그리고 이와 같이 전처리된 시료의 무게를 입력하고 고순

도 게르마늄(HPGe) 반도체 검출기를 이용한 감마선 분광시스템을 사용하여 측정하였다. 핵종분석은 상대 검출효율이 각각 30%, 45%인 2대의 HPGe Gamma-ray Spectroscopy(GC3019, GC4520)와 분석용 프로그램인 GENIE-PC(Canberra)를 사용하였다. 스펙트럼은 8,192채널로 최대 감마선 에너지를 2,048 KeV까지 측정하도록 하였으며, 측정시간은 80,000초로 하였다.

환경시료 측정에 대한 품질관리를 위해 임의로 선정된 가마미인근에서 해저토 시료를 각각 5지점에서 중복시료로 채취하여 상대 검출효율이 각각 30%, 45%인 2대의 HPGe Gamma-ray Spectroscopy로 동시에 분석하여 환경방사선 측정자료와 분석의 신뢰도를 향상시키기 위한 지구통계학적인 연구를 수행하였다. 또한 환경조사에 사용된 각종 기기 및 장비의 이력카드를 작성하고 시료채취, 전처리, 분석방법 및 분석기기 운용에 관한 절차를 한국원자력안전기술원에 작성·제출하였으며 방사선 계측기에 대한 교정 및 교차분석을 2000년 5월 24일과 25일에 실시하였다(광주과학기술원 에너지환경연구센터, 2001).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 발전소 주변 토양, 하천토 및 해저토에서의 감마핵종분석결과

발전소 부지주변 4개 지점(본부후문, 홍농서초교, 홍농사택, 법성)과 비교지점인 영광, 고창에서 2000년 4월과 10월에 토양시료를 채취하여 분석한 결과, 인공핵종인 Cs-137이 불검출 수준(ND~15.17 Bq/kg-

Table 1. Analytical result of gamma-ray spectroscopy for soil samples.

Sampling site	Samplingdate	Radioactivity (Bq/kg-dry)		Reference ('97-'99)
		Cs-137	K-40	Cs-137
Rear Gate of NPP	4. 20.	1.54± 0.12	839.35± 9.22	-
	10. 12	6.24± 0.38	645.31± 34.59	
Hongnong West Elementary school	4. 7.	0.448± 0.12	759.90± 6.82	ND-25.14
	10. 20.	0.864± 0.23	803.70± 56.62	
Hongnong West Elementary school	4. 7.	<0.122	510.49± 6.21	ND-1.66
	10. 20.	0.334± 0.08	638.63± 45.02	
Peobsong	4. 7.	15.17± 0.30	503.39± 6.21	ND-10.41
	10. 20.	12.06± 0.43	508.42± 20.69	
Youngkwang	4. 7.	<0.243	1335.3± 16.83	-
	10. 20.	4.03± 0.21	789.42± 21.47	
Kochang	4. 7.	1.46± 0.15	881.17± 9.21	ND-24.83
	10. 20.	1.19± 0.35	868.13± 61.19	

Table 2. Analytical result of gamma-ray spectroscopy for soil samples.

Sampling site	Samplingdate	Radioactivity (Bq/kg-dry)		Reference ('97-'99)
		Cs-137	K-40	Cs-137
Yeonwoo Bridge	2. 28.	3.73 ± 0.18	645.56 ± 10.14	ND-17.40
	4. 7.	4.70 ± 0.12	707.16 ± 7.27	
	9. 18.	6.40 ± 0.36	672.00 ± 14.25	
	10. 20.	6.47 ± 0.38	693.81 ± 14.22	
Imkog Bridge	1. 15.	<0.213	1167.2 ± 12.21	<0.728
	4. 7.	0.493 ± 0.08	945.52 ± 10.11	
	7. 31.	2.79 ± 0.19	938.44 ± 11.73	
	10. 20.	<0.483	822.41 ± 25.33	

Table 3. Analytical result of gamma-ray spectroscopy for soil samples.

Sampling site	Samplingdate	Radioactivity (Bq/kg-dry)		Reference ('97-'99)
		Cs-137	K-40	Cs-137
NPP	4. 29.	1.16 ± 0.0876	772.65 ± 9.54	1.44 ± 1.22
	10. 16.	1.51 ± 0.956	778.41 ± 13.75	
Mongnenggi	4. 8.	2.57 ± 0.107	711.55 ± 8.89	2.29 ± 0.99
	10. 9.	2.73 ± 0.113	695.03 ± 12.20	
Sinheung	4. 3.	1.94 ± 0.119	956.36 ± 1.002	2.39 ± 0.90
	10. 18.	2.15 ± 0.118	9.73.65 ± 17.01	

dry)으로 나타났으며(Table 1), 반감기가 짧은 Cs-134을 포함한 다른 핵종은 전혀 검출되지 않았다. 한편 이번 조사에서 법성 시료에서는 과거 3년(1997-99)간 측정된 정상범위를 약간 벗어났고(광주과학기술원 에너지환경연구소, 2001), 이는 이전까지의 시료채취 지점이 수년 전에 경작되었던 곳으로 99년 하반기부터 경작지의 흔적이 전혀 없는 곳으로 채취지점을 변경한 곳으로 판명되었기에 방사능 오염의 결과로 보기는 어렵다. 한편 천연핵종인 K-40은 503-1335 Bq/kg-dry 범위로 검출되었다(Table 1).

매 분기마다 채취한 연우교와 임곡교의 하천토에 대한 감마핵종 분석결과, 인공핵종인 Cs-137이 연우교에서 평균 5.33 Bq/kg-dry, 임곡교에서 불검출 수준(ND~2.79 Bq/kg-dry)으로 검출되었으나 토양에서와 마찬가지로 원전의 운영과 무관한 일반지역에서 검출되고 있는 수준이다(Table 2). 한편 천연핵종인 K-40은 645~1167 Bq/kg-dry 범위로 검출되었다.

원전 배수구의 직접적인 영향을 받는 해저토 시료는 배수구, 몽내기 및 비교지점인 신흥에서 채취하여 분석한 결과, 인공핵종인 Cs-137이 배수구에서 평균 1.34 Bq/kg-dry, 몽내기에서 2.65 Bq/kg-dry, 신흥에서 평균 2.05 Bq/kg-dry로 검출되었다. 이는 과거 3년간 (1997-99) 원전주변지역과 비교지역의 측정값과도 비슷한 수준이다(Table 3). 또한, 타지역의 예로써, 일본

방사선과학연구소의 일본 근해 해저토(0.19~8.3 Bq/kg-dry)와 고리원주변일대 비오염된 해저토(0.271~

Table 4. Analytical result of gamma-ray spectroscopy of sediment samples for geostatistical interpretation (Bq/kg-dry).

Radioactive Nuclide	Sampling Site	Sample I.D.	Analysis 1	Analysis 2	
Cs-137	GM 1	GM 1-1	2.07	2.21	
		GM 1-2	2.45	2.42	
	GM 2	GM 2-1	0.594	0.862	
		GM 2-2	0.517	0.659	
	GM 5	GM 5-1	0.474	0.439	
		GM 5-2	0.468	0.531	
	GM 6	GM 6-1	0.283	0.377	
		GM 6-2	0.313	0.443	
	GM 7	GM 7-1	0.255	0.403	
		GM 7-2	0.283	0.246	
	K-40	GM 1	GM 1-1	758	757
			GM 1-2	789	784
		GM 2	GM 2-1	890	890
			GM 2-2	882	888
GM 5		GM 5-1	783	811	
		GM 5-2	787	794	
GM 6		GM 6-1	704	718	
		GM 6-2	730	734	
GM 7		GM 7-1	735	747	
		GM 7-2	749	746	

8.499 Bq/kg-dry)에서 관찰되는 검출되고 있는 수준이다(한국전력공사, 1998). 특히, Cs-137의 퇴적물에서 높은 축적 특성(Strezov, 1998)에도 불구하고 배수구부근의 해저토에서의 Cs-137 값이 다른 두 지역보다 낮은 것으로 보아 원전에 의한 영향이 없음을 확인 할 수 있었다. 또한 천연핵종 중 K-40은 695.0~973.7 Bq/kg-dry 범위로 검출되었다.

토양, 하천토, 해저토들의 Cs-137과 K-40의 결과를 비교해 볼 때, 한 지점에서 Cs-137의 값이 시료 채취시기(Table 1-3)와 분석(Table 4)에 따라 변화가 심한 것으로 보여진다. 본 연구는 두 번의 다른 시료 채취시기에 따른 농도 변화의 원인과 두가지 효율을 갖는 분석방법에 따른 농도 변화의 원인 분석이 따라야 한다. 따라서, 시료채취시기와 분석에 따른 Cs-137과 K-40의 농도를 해석하여 각 원소의 농도 분산 관계를 비교할 필요가 있다.

**3.2. 분산분석(ANOVA)을 이용한 시료채취 및 분석결과의 검증**

가마미 인근지역 5지점에서 해저토 시료를 채취하였다. 시료채취에 의한 분산을 알아보기 위해 두팀으로 나누어 같은 지점에서 각각 시료를 채취하였고,

각각의 시료는 분석과정에 발생하는 분산을 알아보기 위해 측정효율만 다른 두대의 감마핵종분석기로 비교하였다(Table 4). 대상원소는 Cs-137, K-40로, 특히 Cs-137이 같은 지점을 계속 분석해도 다른 값을 보이는데 그 분산이 지역적 차이(Geochemical Variation)와 비교해보면 아주 작은 범위라는 것을 보여줄 필요가 있다(Ramsey *et al.*, 1987).

먼저 Cs-137을 이용한 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)에서 기기에 따른 분석방법의 차이, 지역적인 차이를 설명변수로 하여 원소의 농도, 종속변수를 설명하고자 했다. 첫번째 귀무가설은 서로 다른 기기를 이용한 분석방법에 따른 원소 농도간에 차이가 없다( $H_0: \mu_{\text{First}} = \mu_{\text{Second}}$ )는 것이었다. 분산분석 결과, F 분포에서 확률변수 F의 값이 3.06보다 크므로 귀무가설을 유의수준(observed level of significance) 0.05에서 채택하며, 귀무가설의 가정으로부터 벗어난 정도를 나타내는 p-값(p-value) 역시 유의수준보다 크므로 귀무가설이 채택되어 서로 다른 기기에 의한 분석방법에 따라 샘플 농도간에 차이가 있다고 할만한 근거가 없다는 결론을 얻었다(Table 5). 두 번째 귀무가설은 지역에 따른 원소간 농도에 차이가 없다는 것 ( $H_0: \mu_{\text{site1}} = \mu_{\text{site2}} = \mu_{\text{site3}} = \mu_{\text{site4}} = \mu_{\text{site5}}$ )을 검증하는 것이다. 그 결

**Table 5.** One-way ANOVA result of Cs-137 in sediment samples.

$H_0: \mu_{\text{First}} = \mu_{\text{Second}}$					
	SS	dF	MS	F	p
Intercept	13.27961	1	13.27961	21.13538	0.000224
Sampling site	0.03898	1	0.03898	0.06205	0.86110
Error	11.30961	18	0.62831		
Total	11.34860	19			
$H_0: \mu_{\text{site1}} = \mu_{\text{site2}} = \mu_{\text{site3}} = \mu_{\text{site5}}$					
Intercept	13.27961	1	13.27961	1004.591	0.000000
Analysis method	11.15031	4	2.78758	210.878	0.000000
Error	0.19828	15	0.01322		
Total	11.34860	19			

**Table 6.** Two-way ANOVA result of Cs-137 in sediment samples (Univariate tests of significance for element concentration, Sigma-restricted parameterization, Effective hypothesis decomposition).

$H_0: \mu_{\text{First}} = \mu_{\text{Second}}, H_0: \mu_{\text{site1}} = \mu_{\text{site2}} = \mu_{\text{site3}} = \mu_{\text{site5}}$					
	SS	dF	MS	F	p
Intercept	13.27961	1	13.27961	21.13538	0.000224
Sampling site (Treatment 1)	0.03898	1	0.03898	0.06205	0.86110
Analysis method (Treatment 2)	11.15031	18	0.62831		
Sampling site/Analysis method (Interaction effect)	0.02189	19			
Error	0.13741	1	13.27961	1004.591	0.000000
Total	11.34860	4	2.78758	210.878	0.000000

과 확률변수 F의 값이 3.06 보다 크고, p-값 역시 유의수준 0.05보다 작으므로 귀무가설을 기각하여 각각의 지역에 따른 샘플 농도간에 차이는 있음을 보인다. 여기서 오차는 replication에 의한 분산으로 F test에서 알 수 있듯 지역적 차이에 의한 분산이 훨씬 크므로 replication에 의한 오차는 상대적으로 적다고, 즉 원소 농도분석결과는 신뢰할 만 하다는 결론을 내릴 수 있다(Table 5).

지역적 차이에 의한 농도의 변화, 즉 지역에 의한

요인의 영향력을 원소분석방법 등과 같은 요인과 비교 분석해 보기 위하여 이원배치 분산분석(two-way ANOVA)를 수행하였다(Table 6). 설명변수, 종속변수 및 귀무가설은 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)와 동일하며, 유의수준 0.05에서 분석방법 차이라는 요인에 대해 확률변수 F 값이 10.04 보다 작고 또한 유의수준이 0.05 보다 크므로 귀무가설이 채택되어 서로 다른 기기에 의한 분석 방법간에 농도차이가 있다고 할 만한 근거가 없으며, 설명 변수간의 교차효

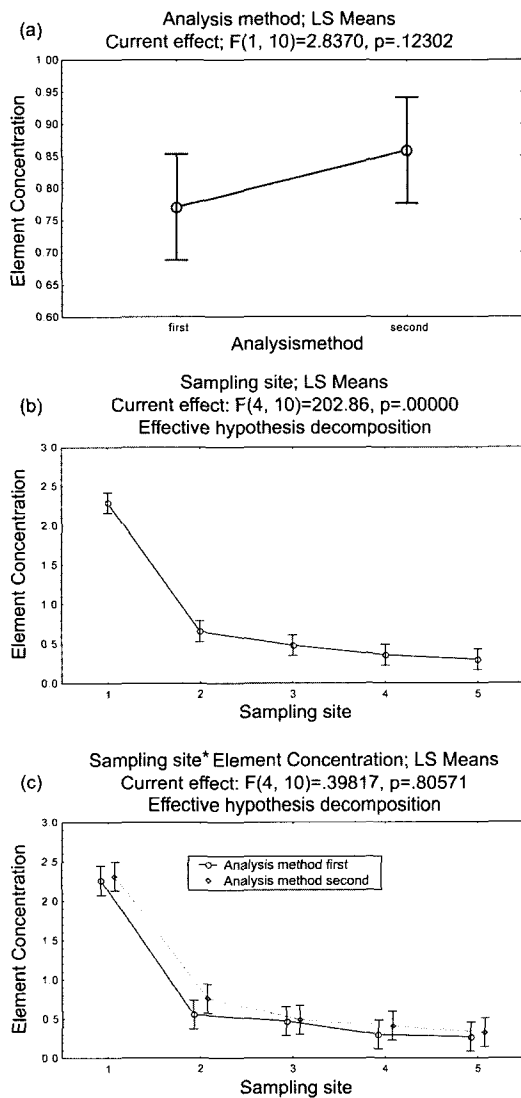


Fig. 2. ANOVA test results of Cs-137 in sediment, (a) Element concentration variation depending on analysis method, (b) Element concentration variation depending on sampling site, (c) Element concentration variation depending on the interaction effect of dependent variables.

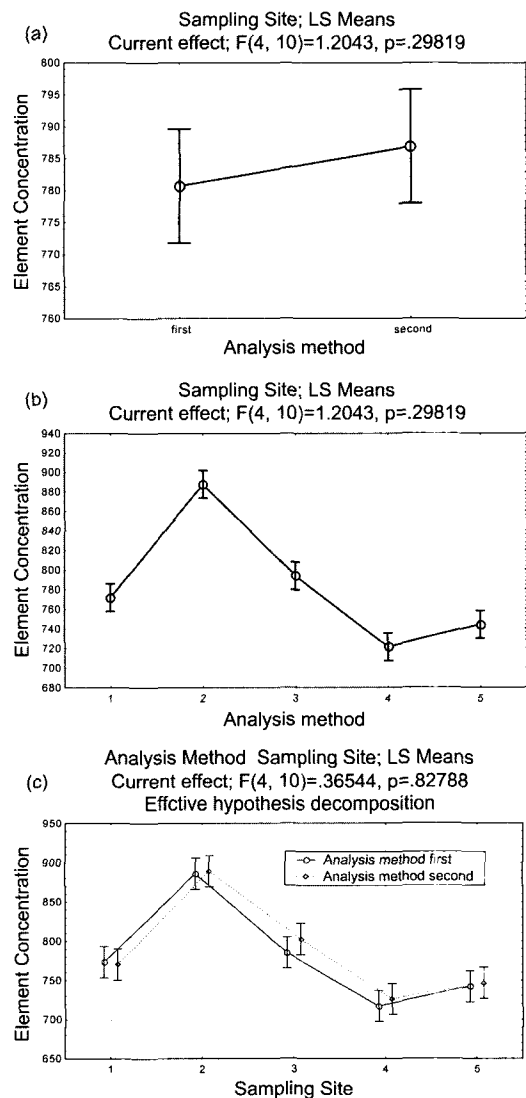


Fig. 3. ANOVA test results of K-40 in sediment samples (a) Element concentration variation depending on analysis method, (b) Element concentration variation depending on sampling site, (c) Element concentration variation depending on the interaction effect of dependent variables.

**Table 7.** Two-way ANOVA result of Cs-137 in sediment samples (Univariate tests of significance for element concentration, Sigma-restricted parameterization, Effective hypothesis decomposition).

	$H_0: \mu_{\text{First}} = \mu_{\text{Second}}, H_0: \mu_{\text{Site1}} = \mu_{\text{Site2}} = \mu_{\text{Site3}} = \mu_{\text{Site5}}$				
	SS	dF	MS	F	p
Intercept	12286849.	1	12286849	76985.27	0.000000
Sampling site (Treatment 1)	192.	1	192.	1.20	.298193
Analysis method (Treatment 2)	65750.	4	16437	102.99	.000000
Sampling site/Analysis method (Interaction effect)	233.	4	58.	0.37	.827880
Error	1596.	10	160.		
Total	677771.	19			

과 역시 존재하지 않는다. 유의수준 0.05에서 지역간의 차이에 대해서 F 분포에서 확률변수 F의 값이 5.99 보다 크고 유의수준이 0.05보다 작아 귀무가설이 기각되어 결론은 지역에 따라 원소의 농도차이가 있다고 할 근거가 있다(Table 6). Fig. 2a는 분석방법사이의 분산이 유효하지 않고, Fig 2b는 시료채취 지점 사이의 분산은 유효함을 보여며, 이들 사이의 교호효과에는 없다(Fig. 2c).

분석방법과 지역적 차이에 의한 농도 변화의 상호작용이 존재할수 있기 때문에, 일원배치 분산분석보다는 이원배치 분산분석이 시료채취 및 분석결과의 신뢰성을 조사하는데 바람직하다(Davies, 1986). 따라서, K-40의 경우에는 이원배치 분산분석만을 수행하였고, Cs-137과 유사한 결과를 얻을 수 있었다(Table 7). Fig. 3a는 분석방법사이의 분산이 유효하지 않고, Fig 3b는 시료채취지점 사이의 분산은 유효함을 보여준다. 결론적으로 두 원소의 경우 시료채취 지점의 차이에 의한 분산만이 유효하며, 시료채취 및 분석과정에서 발생하는 오차는 무시할 만하다고 하겠다(Fig. 3c). 따라서 지금까지 수행되어진 시료채취 및 분석방법은 신뢰할 만하였다. Cs-137의 경우 좁은 지역에서 인접한 각각 다른 시료채취지점에 의한 지역적인 차이는 1940년대 이후 지구상에서 수행된 방사능실험 결과 그 낙진에 의해 영향받았음을 알 수 있었고, 토양의 교란이 적게 나타나는 심토의 경우에서 더 낮은 값을 보이는 결과로 설명되어질 수 있다(Perkins and Thomas, 1980). 반면 천연핵종인 K-40은 기반암에 의한 영향이 클 것으로 생각되어진다(Thornton, 1983). 이상의 조사결과를 종합하여 볼 때 영광원자력발전소 부지의외부와 비교지점에서 검출되고 있는 인공방사성핵종은 전세계적으로 측정되고 있는 수준이며 원전 가동에 의한 환경오염이나 축적현상은 발견되지 않았다.

#### 4. 결 론

영광원자력발전소 부지의외부 환경방사능 조사결과는 다음과 같다.

토양에서 인공핵종인 Cs-137이 검출되었으나 이는 원전과 관계없는 일반지역에서 검출되는 수준과도 동일하며, 반감기가 짧은 Cs-134는 전혀 검출되지 않은 것으로 보아 원전가동에 의한 영향이 아님을 알 수 있다. 하천토 및 해저토에서는 Cs-137 검출은 토양과 마찬가지로 판단되며 지난 3년간(1997-99)의 측정치인 평상범위 이내의 값을 알 수 있었다. 따라서, 원전 가동에 의한 환경오염이나 인공핵종 Cs-137과 천연 핵종 K-40의 축적현상은 발견되지 않았다.

토양, 하천토, 해저토들의 Cs-137과 K-40의 결과를 비교하기 위하여 시료채취시기와 분석에 따른 Cs-137과 K-40의 농도를 해석하여 각 원소의 농도 분산 및 그 차이를 비교할 필요가 있었다. 원자력발전소 주변 방사선 환경분석결과의 신뢰성확보를 위하여 시료채취 시기 및 분석방법을 고려한 후 지구통계학적으로 미리 계획하여 되어진 절차대로 가마미 주변지역에서 해저토 시료를 채취한 후 그 시료의 Cs-137 및 K-40의 분석결과를 이용, 분산분석을 수행하였다. 이원배치 분산분석은 Cs-137 및 K-40의 경우 시료채취 지점의 차이에 의한 분산만이 유효하며, 시료채취 및 분석과정에서의 생기는 오차는 무시할 만 했다. 따라서 지금까지 수행되어진 시료채취 및 분석방법은 신뢰할 만하다고 할 수 있었다.

Cs-137의 경우 좁은 지역에서 인접한 각각 다른 시료채취지점에 의한 지역적인 차이는 1940년대 이후 지구상에서 수행된 방사능실험 결과 그 낙진에 의해 영향받았음을 알 수 있었고, 토양의 교란이 적게 나타나는 심토의 경우에서 더 낮은 값을 보이는 결과로 설명되어질 수 있었다. 반면 천연핵종인 K-40은 기반암에

의한 영향이 클 것으로 생각되어져, 이상의 조사결과를 종합하여 불 때 영광원자력발전소 부지외부와 비교지점에서 검출되고 있는 인공방사성핵종은 전세계적으로 측정되고 있는 수준이며 원전 가동에 의한 환경오염이나 축적현상은 발견되지 않았다.

### 참고문헌

- 광주과학기술원 에너지환경 연구센터 (2001) 영광원자력 부지외부 환경방사능 조사 보고서 2000년보. 85p.
- 박종섭, 정성태, 김경웅, 김인수 (1999) 영광원자력 발전소 주변 환경방사능 측정에 관한 연구. 자원환경지질, 32권 3호, p. 273-280.
- 한국원자력안전기술원 (1992) 국내의 교차분석 및 방사성 핵종분석 표준화에 관한 연구. 117p.
- 한국전력공사 (1995) 영광원전주변 환경방사능 조사보고서. 210p.
- 한국전력공사 (1997) 영광원전주변 환경방사능 조사보고서. 165p.
- 한국전력공사 (1998) 고리원전주변 해양방사능 종합보고서. 109p.
- Carter, M.R. (1993) Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Pub., 823p.
- Davies, J.C. (1986) Statistics and Data Analysis in Geology. 2nd(ed.), John Wiley & Sons., 646p.
- Mackenzic, A.B., Cook, G.T. and McDonald, P. (1999) Radionuclide distribution and particle size associations in Irish Sea surface sediments : implications for actinide dispersion. Journal of Environmental Radioactivity, v. 44, p. 275-296.
- Perkins, R.W. and Thomas, C.W. (1980) World Wide Fallout. In Hanson(ed.) Transuranic Elements in the Environment. DOE/TIC-22800, National Technical Information Service, Springfield.
- Ramsey, M.H., Thompson, M. and Banerjee, E.K. (1987) Realistic assessment of analytical data quality from inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. Anal. Proc., v. 24, p. 260-265.
- Strezov, A., Milanov, M., Mishev, P and Stoilova, T (1998) Radionuclide accumulation in near-shore sediments along the Bulgarian Black Sea Coast. Appl. Radioac. Isot., v. 49, p. 1721-1728.
- Thornton, I. (1983) Applied environmental geochemistry. Academic Press, 501p.

---

2002년 5월 14일 원고접수, 2002년 2월 24일 게재승인.