



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩 士 學 位 論 文

# 제주도내 환경시료 중 $^{90}\text{Sr}$ 분포 분석



濟州大學校 大學院

에 너 지 공 학 과

金 德 祐

2015年 2月

# 제주도내 환경시료 중 $^{90}\text{Sr}$ 분포 분석

指導教授 朴 在 雨

金 德 祐

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金德祐의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 晋俊夏 (印)

委員 張時榮 (印)

委員 朴在雨 (印)

濟州大學校 大學院

2014年 12月

# Analysis of $^{90}\text{Sr}$ Radioactivity Distribution in the Environmental Samples of Jeju

Duk-Woo Kim  
(Supervised by professor Jae-Woo Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Engineering.

2014. 12.



.....  
Thesis director, Joon-ha Jin, Korea Atomic Energy Research Institute

.....  
Si-Young Chang, Korea Atomic Energy Research Institute

.....  
Jae-Woo Park, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....  
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

목 차.....	1
<b>LIST OF FIGURE.....</b>	<b>2</b>
<b>LIST OF TABLE.....</b>	<b>3</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>4</b>
요 약 문.....	5
<b>I. 서 론.....</b>	<b>7</b>
1. 연구의 배경.....	8
2. 연구의 내용.....	9
<b>II. <sup>90</sup>Sr의 특징과 분리.....</b>	<b>10</b>
1. <sup>90</sup> Sr의 특징.....	10
2. <sup>90</sup> Sr의 국내 환경시료 중 측정현황.....	12
3. <sup>90</sup> Sr의 분리방법.....	15
4. <sup>90</sup> Sr의 방사능 측정장비.....	16
<b>III. 제주도내 환경시료 중 <sup>90</sup>Sr의 분리.....</b>	<b>17</b>
1. 제주도내 환경시료의 특징.....	17
2. 시료채취 및 전처리.....	22
3. 방사능 측정.....	39
<b>IV. 결 과.....</b>	<b>46</b>
<b>V. 결 론.....</b>	<b>51</b>
<b>VI. 참고문헌.....</b>	<b>53</b>

## LIST OF FIGURE

Figure 1. Decay series of radiostrontium. ....	7
Figure 2. Decay scheme of $^{90}\text{Sr}$ . ....	10
Figure 3. Soil sampling point of Jeju island. ....	18
Figure 4. Sand sampling point of Jeju island. ....	19
Figure 5. Photography of <i>Ecklonia cava</i> . ....	20
Figure 6. <i>Ecklonia cava</i> sampling point of Jeju island. ....	21
Figure 7. Soil sampling tools. ....	22
Figure 8. Surface soil sampling process. ....	23
Figure 9. Sampling of surface soil. ....	23
Figure 10. Ash soil sample. ....	24
Figure 11. Process to filter the soil samples. ....	25
Figure 12. Flow chart for separation of $^{90}\text{Sr}$ in soil. ....	27
Figure 13. Sampling of sand. ....	28
Figure 14. Carbonate precipitation process of sand samples. ....	30
Figure 15. Flow chart for separation of $^{90}\text{Sr}$ in sand. ....	32
Figure 16. Dry <i>Ecklonia cava</i> . ....	33
Figure 17. Flow chart for separation of $^{90}\text{Sr}$ in <i>Ecklonia cava</i> . ....	36
Figure 18. $^{90}\text{Sr}$ separation using Sr-specific resin. ....	38
Figure 19. Quenching curve of $^{90}\text{Sr}$ . ....	45
Figure 20. Vertical distribution of $^{90}\text{Sr}$ activity in the soil from Jeju island. ....	47
Figure 21. Geographical distribution of $^{90}\text{Sr}$ activity in the sand from Jeju island. ....	48
Figure 22. Distribution of average $^{90}\text{Sr}$ activity of the <i>Ecklonia cava</i> . ....	50

## LIST OF TABLE

Table 1. Isotopes of Sr .....	11
Table 2. <sup>90</sup> Sr activity in Korean soil (1998).....	13
Table 3. <sup>90</sup> Sr activity in Korean soil with depth (2004) .....	14
Table 4. <sup>90</sup> Sr activity of Uljin soil (2012).....	14
Table 5. Geographical information of the soil sampled location.....	18
Table 6. Geographical information of the sand sampled location.....	20
Table 7. Geographical information of the <i>Ecklonia cava</i> sampled location .....	22
Table 8. Background calculation.....	39
Table 9. Recovery ratio of Sr carrier .....	40
Table 10. <sup>90</sup> Sr activity in soil samples in Jeju island.....	46
Table 11. <sup>90</sup> Sr activity in sand samples from Jeju island.....	48
Table 12. <sup>90</sup> Sr activity in <i>Ecklonia cava</i> samples from Jeju island .....	49

## SUMMARY

The aim of this work was to get information about  $^{90}\text{Sr}$  contamination of the environment by using soil, sand and seaweed from selected areas in Jeju Island, Korea. Additionally, we tried to improve the Sr-Spec method by searching for a procedure to get pure  $^{90}\text{Sr}$  spectra. This belongs in the methods available Sr-Spec resin in prepacked columns. The elution containing  $^{90}\text{Sr}$  and the inactive Sr carrier was mixed with a scintillation cocktail and measured by liquid scintillation counting. The soil samples have been collected at 4 sites of Jeju island during June to August of 2013, analyzed for vertical distribution of  $^{90}\text{Sr}$  activities. The sand samples have been collected at 6 sites of Jeju beach during April of 2013 to August of 2014, analyzed for radioactive  $^{90}\text{Sr}$ . The *Ecklonia cava* samples of seaweed have been collected at 3 sites of Jeju seashore during July of 2011 to July of 2013, and analyzed for radioactive  $^{90}\text{Sr}$ .

Result, soil surface samples of 0-2 cm were detected by  $18.24 \pm 0.42$  Bq/kg,  $18.27 \pm 0.28$  Bq/kg,  $13.46 \pm 0.67$  Bq/kg, and  $8.70 \pm 0.59$  Bq/kg at San-gum-bu-ri, Gwan-eum-sa, Dol-o-reum, and Mi-ak-san. Sand samples were detected by  $1.36 \pm 0.14$  Bq/kg,  $0.85 \pm 0.16$  Bq/kg,  $0.58 \pm 0.11$  Bq/kg,  $0.30 \pm 0.09$  Bq/kg,  $0.22 \pm 0.08$  Bq/kg, and  $0.25 \pm 0.08$  Bq/kg at Hyeop-jea, Sam-yang, Ham-deok, Wol-jung, Pyo-seon, and Hwa-sun. And *Ecklonia cava* samples of 2011-2013 were detected by  $2.68 \pm 0.63$  Bq/kg,  $0.85 \pm 0.44$  Bq/kg, and  $0.64 \pm 0.32$  Bq/kg.

This material is expected to be basis reference for survey of environmental radioactivity in Jeju Island.



## 요 약 문

$^{90}\text{Sr}$ 은 반감기가 길며 인체에 미치는 방사선 피해효과가 큰 핵종으로, 환경방사능 연구에 주요 대상이 되어 온 핵종이다. 후쿠시마 원자력 발전소 사고 전에 국내 환경 중의  $^{90}\text{Sr}$  방사능을 연구한 자료는 많으나, 제주도내 관련 자료는 매우 적은 편이다. 이에 따라 본 연구에서는 제주도에서 여러 환경시료를 채취하여  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능을 분석 및 평가하였다.

토양시료에서는 토양의 깊이 별  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 농도를 조사하였으며, 모래시료에서는 모래 내에 함유되어 있는  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 농도를 조사하였다. 그리고 해양 먹이사슬 중의 환경시료인 감태에서는 2011년부터 2013년까지 시료를 채취 후 농도를 분석하여  $^{90}\text{Sr}$ 의 거동을 조사하였다. Sr-specific resin을 이용하여 각 시료로부터  $^{90}\text{Sr}$ 을 분리하고 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter, LSC)를 사용하여 방사능을 분석하였다.

토양에서의 방사능 농도는 0-2 cm에서 산굼부리  $18.24 \pm 0.42$  Bq/kg, 관음사  $18.27 \pm 0.28$  Bq/kg, 돌오름  $13.46 \pm 0.67$  Bq/kg, 미약산  $8.70 \pm 0.59$  Bq/kg 으로 나타났다. 깊이가 깊어질수록 방사능 농도는 낮아졌다. 모래에서의 방사능 농도는 협재  $1.36 \pm 0.14$  Bq/kg, 삼양  $0.85 \pm 0.16$  Bq/kg, 함덕  $0.58 \pm 0.11$  Bq/kg, 월정  $0.30 \pm 0.09$  Bq/kg, 표선  $0.22 \pm 0.08$  Bq/kg, 화순  $0.25 \pm 0.06$  Bq/kg으로 검출되었다. 감태에서 각 년도 별 평균 방사능 농도는 2011년에  $2.68 \pm 0.63$  Bq/kg, 2012년에는  $0.85 \pm 0.44$  Bq/kg, 2013년에서  $0.64 \pm 0.32$  Bq/kg 으로 검출되었다.

본 연구에서 얻어진 제주도내 환경시료인 토양과 모래, 감태 중  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 분석자료는 향후 제주도내 환경방사능 조사에 대한 기초 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.



## I. 서론

국가 간의 핵 실험과 핵 사고로부터 방사성 스트론튬( $^{90}\text{Sr}$ )은 환경에 존재하게 되었다. 이 동위원소는 상대적으로 긴 반감기를 가지고 있고 칼슘(Ca)과 화학적 성질이 매우 비슷하여 인체 내 골조직에 침착하기 쉬워 골수 손상을 일으키는 가장 위험한 핵종 중 하나이다. 체르노빌 사고 이후에 실시된 방사성 핵종의 추적 연구를 통해 환경에 많은 방사성 핵종들이 방출 됐다는 것을 알게 되었다. 그러나 현재의  $^{90}\text{Sr}$  오염수준은 매우 낮기 때문에 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위해서는 정밀한 분석 기술이 요구된다.

$^{90}\text{Sr}$ 은 반감기가 28.8년으로 수명이 긴 핵종이며 최대 에너지 545.94 keV인 베타선을 방출한다. 그리고 그 딸 핵종인  $^{90}\text{Y}$ 은 반감기가 50.57일로 위와 마찬가지로 최대 에너지 1459.1 keV인 베타선을 방출한다. 짧은 반감기를 가지는 Sr 방사성 핵종인  $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Sr}$ 도 있으며 둘 다 베타선과 감마선을 방출한다.  $^{90}\text{Sr}$ 은 핵 분열 시 상대적으로 높은 수율로 생산된다. 예를 들면 열 중성자 반응에서  $^{90}\text{Sr}$ 의 누적 핵 분열 수율은  $^{235}\text{U}$ 에서 5.88 %이고,  $^{239}\text{Pu}$ 에서는 2.10 %이다.

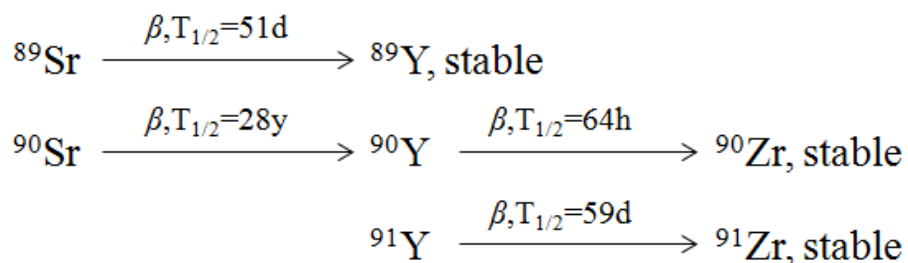


Figure 1. Decay series of radiostrontium<sup>[1]</sup>.

Figure 1과 같은 질량번호 89-92의 Sr 붕괴 series에서 상대적으로 긴 반감기를 가진 동위원소로는  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{91}\text{Y}$ 가 있는데 모두 순수한 베타 방출 핵종이다.  $^{90}\text{Y}$ 와  $^{91}\text{Y}$ 의 최대 베타 에너지는 각각 2279.8 keV, 1544.8 keV인 높은 에너지이다. 가장 긴 수명을 가진 방사성 Sr 동위원소인  $^{90}\text{Sr}$ 은 핵 폭발 또는 원자로 사고로 환경에 방출되기 때문에 환경오염의 주요 관심사가 된다. 즉, 핵 실험 또는 핵 사고에 의해  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{91}\text{Y}$ 들이 환경에 존재하게 되었으나, 수년 후에는 반감기가 상대적으로 짧은  $^{89}\text{Sr}$ 과  $^{91}\text{Y}$ 는 검출한계 이하가 되고  $^{90}\text{Sr}$ 과 딸 핵종인  $^{90}\text{Y}$ 은 환경에 잔류하게 된다.

## 1. 연구의 배경

지난 2011년 후쿠시마 원자력 발전소 사고에 의해 대량의 방사성 동위원소가 대기과 해양으로 방출되었다. 이 동위원소들은 대기의 흐름과 해류의 순환에 의하여 전세계적으로 퍼져나갔으며, 국내에도 영향을 주었다.<sup>[2]</sup> 이 방사성 동위원소들은 대기 중으로부터 침적되어 지표면에 쌓였을 것이며, 바다로 흘러간 동위원소는 해류의 순환을 통하여 우리 영해에도 도달했을 것이라 예상된다.

후쿠시마 원자력 발전소 사고의 제주도 환경에 대한 영향을 평가하기 위한 본 연구에서는 사고에 의해 방출된 여러 방사성 동위원소 중  $^{90}\text{Sr}$ 을 추적 분석하기로 하였다. 제주도 토양표면에 침적된  $^{90}\text{Sr}$ 을 깊이 별로 농도의 차이를 분석하였으며, 제주바다에 도달한  $^{90}\text{Sr}$ 이 모래에 흡착되었을 것이라는 가정하에 분석을 하였다. 그리고 해양식물인 감태는 제주도 동부지역에 많이 채취되며, 해양 식물들의 주된 식량원이다.

## 2. 연구의 내용

본 연구에서는 제주도내 토양과 모래 및 감태를 분석대상으로 채택하였다. 토양의 경우 한라산을 중심으로 방위에 따라 4개의 지점을 선택하여 각 지점에서 깊이 별로  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도를 분석하였다. 모래의 경우 제주도의 주요 해수욕장 6개 지점을 선정하여 썰물시간에 사람의 왕래가 이루어 지지 않은 젖은 모래를 채취하여  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도를 분석하였다. 감태는 제주도 동부지역 3개 지점에서 2011년부터 2013년까지 해안에 밀려나온 시료를 채취하여  $^{90}\text{Sr}$ 의 거동 분석을 하였다.

각각의 시료에 따라 서로 다른 화학처리를 이용하여 전처리를 하였고, Sr-Specific resin을 이용하여  $^{90}\text{Sr}$ 을 분리한 후 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter)를 이용하여 측정하였다.



## II. $^{90}\text{Sr}$ 의 특징과 분리

본 장에서는 제주도내 환경시료 등의  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 분석하기에 앞서  $^{90}\text{Sr}$ 의 특성과 국내 측정현황 및 분리방법을 조사하였다.

### 1. $^{90}\text{Sr}$ 의 특징

$^{90}\text{Sr}$ 은 우라늄(U)과 플루토늄(Pu)의 핵 분열 생성물이다. 오늘날 원자력 발전소에서 이용하는 열 중성자 핵 분열에서  $^{90}\text{Sr}$ 의 생성 수율은  $^{235}\text{U}$ 에서는 5.8%,  $^{233}\text{U}$ 에서 6.8%, 그리고  $^{239}\text{Pu}$ 에서는 2.1%이다.  $^{90}\text{Sr}$ 의 반감기는 28.8년으로  $\beta$ -붕괴를 하고  $^{90}\text{Y}$ 이 되며 이 때 나오는 최대 에너지는 0.546 MeV이다. 생성물인  $^{90}\text{Y}$ 도 방사성 동위원소인데 2.5일의 반감기로  $\beta$ -붕괴를 하고 안정된  $^{90}\text{Zr}$ 이 되며, 이 때 나오는 최대 에너지는 3.38 MeV이다. 이와 같은  $^{90}\text{Sr}$ 의 붕괴도식을 Figure 2에 나타내었고, Table 1은 Sr의 동위원소들의 특징들을 나타내었다.

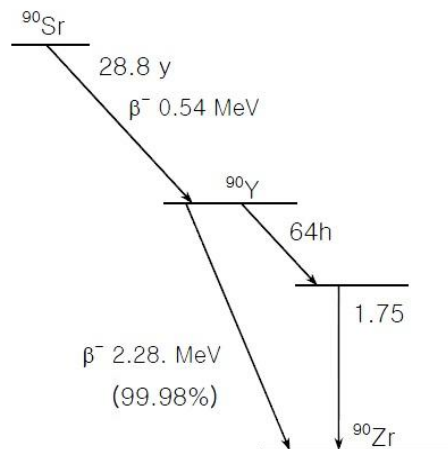


Figure 2. Decay scheme of  $^{90}\text{Sr}$ .

**Table 1. Isotopes of Sr**

Nuclide	Natural Abundance	Atomic weight	Half-Life	Decay mode
<sup>82</sup> Sr	0.00%	82	25.35d	EC
<sup>83</sup> Sr	0.00%	83	1.35d	EC, $\beta^+$
<sup>84</sup> Sr	0.56%	83.9134	-	Stable
<sup>85</sup> Sr	0.00%	84.913	64.84d	EC
<sup>85m</sup> Sr	0.00%	85	1.27h	IT, EC
<sup>86</sup> Sr	9.86%	85.9093	-	Stable
<sup>87</sup> Sr	7.02%	86.9089	-	Stable
<sup>87m</sup> Sr	0.00%	87	2.80h	IT, EC
<sup>88</sup> Sr	82.56%	87.9056	-	Stable
<sup>89</sup> Sr	0.00%	88.907	50.52d	$\beta^-$
<sup>90</sup> Sr	0.00	89.907	28.8yr	$\beta^-$
<sup>91</sup> Sr	0.00	91	9.50h	$\beta^-$
<sup>92</sup> Sr	0.00	92	2.71h	$\beta^-$
<sup>93</sup> Sr	0.00	93	7.4m	$\beta^-$

\*EC: Electron Capture, \*IT: Isomeric Transition

원자력 발전에서 생기는 <sup>90</sup>Sr은 폐 핵연료와 핵 폐기물에 들어있는데, 저장 및 처리를 잘 하게 될 경우 다른 지역으로 확산될 우려가 거의 없는 반면에, 1986년의 체르노빌 사고나 2011년의 후쿠시마 사고처럼 원자력 발전소 사고가 나거나 대기 중 핵 실험을 하는 경우에는 <sup>90</sup>Sr이 대기로 유출되고 대기 이동에 따라 넓은 지역으로 퍼져 지상으로 침적된다. 이는 식물에 의해 흡수되고, 식물을 먹은 동물의 체내로 들어오며, 오염된 채소와 육류 섭취를 통해 인간에게 들어온다.

Sr은 동물에서 뼈와 치아를 구성하는 Ca의 일부를 대체한다. 체내에서 Ca을 대체해 들어온 <sup>90</sup>Sr과 핵 붕괴 산물인 <sup>90</sup>Y에서 나오는  $\beta$ 선은 높은 에너지로 세포를 죽이거나 손상을 입히고, 암 세포로 변환시켜 골수 암과 백혈병에 걸릴 위험

을 높이며, 여러 뼈 질환의 원인이 된다.

이러한 위험성 때문에 세계 각국이 대기권 핵 실험 대신에 지하 핵실험을 실시하게 되었으며, 1980년대에는 미국과 소련을 비롯한 여러 나라가 핵 실험을 전면적으로 중단하는 데 합의하게 되었다.

$^{90}\text{Sr}$ 의 화학적 성질은 다음과 같다. Sr, Ca 등 다른 알칼리 토금속 원소들과 마찬가지로 최 외각 전자 껍질의 2개의 전자를 갖고 있어 쉽게 전자를 잃고 각각  $\text{Sr}^{2+}$ 와  $\text{Ca}^{2+}$ 가 된다. 즉, Ca와  $^{90}\text{Sr}$  모두 2+ 이온이 되고 크기도 비슷하여, Sr이 체 내에 뼈에 있는 Ca를 대체하여 구성할 수 있다는 뜻이다. Ca 대신 결합된 것 자체는 문제가 없으나,  $^{90}\text{Sr}$ 이 방사선을 방출하는 것이 큰 문제이다<sup>[3]</sup>.

## 2. $^{90}\text{Sr}$ 의 국내 환경시료 중 측정현황



과거의 수 많은 핵 실험과 핵 사고로 인해  $^{90}\text{Sr}$ 은 주위 환경에 존재 한다. 특히 토양표층의  $^{90}\text{Sr}$  자료는 매우 활발하게 분석되어 왔으며, 1998년에 전국적으로 조사한 자료는 Table 2와 같다. 이 자료에 따르면  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능이 가장 높은 지역은 속초로 그 값이  $13.5 \pm 0.49$  Bq/kg이고, 가장 낮은 지역은 평택으로  $1.10 \pm 0.13$  Bq/kg이었다. 한 편 제주지역의  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능은  $5.46 \pm 0.36$  Bq/kg으로 평균값  $3.82 \pm 2.63$  Bq/kg과 약  $1.64 \pm 2.27$  Bq/kg 정도 차이를 보였다.



**Table 2. <sup>90</sup>Sr activity in Korean soil (1998) [4]**

locations	<sup>90</sup> Sr Activity (Bq/kg)
Che-ju	5.46 ± 0.36
Chin-ju	1.80 ± 0.16
Chol-won	3.42 ± 0.17
Chong-ju	1.81 ± 0.15
Chon-ju	1.99 ± 0.16
Chun-chon	6.94 ± 0.34
Chung-mu	4.82 ± 0.23
Hae-nam	5.80 ± 0.22
In-chon	2.81 ± 0.28
Kang-ung	2.80 ± 0.25
Kim-chon	4.12 ± 0.21
Ko-ri	2.34 ± 0.28
Kun-san	2.28 ± 0.24
Kwang-ju	1.45 ± 0.19
Paek-ryong-do	6.68 ± 0.24
Pu-san	2.47 ± 0.23
Pyong-taek	1.10 ± 0.13
Seoul	1.86 ± 0.19
Sok-cho	13.5 ± 0.49
So-san	5.41 ± 0.23
Tae-gu	1.25 ± 0.19
Tae-jon	2.39 ± 0.22
Ul-Jin	3.98 ± 0.30
Wol-song	4.92 ± 0.30
Won-ju	6.55 ± 0.28
Yon-ju	3.56 ± 0.22
Yong-kwang	1.74 ± 0.22
Range	1.10- 13.5
Mean	3.82 ± 2.63

그리고 2004년의 자료에서는 <sup>137</sup>Cs과 <sup>90</sup>Sr의 깊이 별 분포에 대하여 조사되었다. Table 3에서는 고성과 제주지역만 <sup>90</sup>Sr을 분석하였으며, 고성지역의 경우 <sup>90</sup>Sr의 방사능은 평균 3.79 Bq/kg의 값이 나왔으며, 제주지역의 경우 5.05 Bq/kg으로 나왔다.

**Table 3.  $^{90}\text{Sr}$  activity in Korean soil with depth (2004) <sup>[5]</sup>**

Location	Depth(cm)	$^{90}\text{Sr}$ Activity (Bq/kg-dry)
Go-seong	0-5	4.57
	5-10	4.28
	10-15	3.82
	15-20	3.48
	20-25	3.58
	25-30	3.05
	inventory	1230 Bq/m <sup>2</sup>
Jeju	0-5	8.06
	5-10	6.85
	10-15	4.57
	15-20	4.65
	20-25	3.4
	25-30	2.79
	inventory	890 Bq/m <sup>2</sup>

Table 4는 2012년에 울진에서 측정된 자료이며  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 범위는 0.209 Bq/kg - 1.85 Bq/kg이었으며, 평균 방사능은 0.74 Bq/kg이었다.



**Table 4.  $^{90}\text{Sr}$  activity of Uljin soil (2012) <sup>[6]</sup>**

Location	$^{90}\text{Sr}$ Activity (Ba/kg-dry)
Gum-seong	0.534 ± 0.073
Na-gok	0.223 ± 0.063
Bong-pyeong	1.40 ± 0.09
Bu-gu	1.40 ± 0.08
Sang-dang	1.20 ± 0.09
So-gok	0.342 ± 0.051
Shn-hwa	0.860 ± 0.065
Jukp-yeon	0.209 ± 0.042
Jung-ri	0.656 ± 0.054
Ha-dang	0.383 ± 0.064
Hwa-seong	0.698 ± 0.145
Deok-gu	1.85 ± 0.08
Hu-jeong	0.248 ± 0.058
Mea-hwa	0.314 ± 0.072

### 3. $^{90}\text{Sr}$ 의 분리방법

환경시료 중  $^{90}\text{Sr}$ 은 농도가 매우 낮기 때문에 많은 양의 시료가 필요로 하여 분석에 필요한 시간과 노동력이 많이 필요로 하게 된다.

현재  $^{90}\text{Sr}$  분리 법은 여러 가지 있으나 대표적으로 발연질산 법이 있다. 발연질산 법은 가장 오래된 전처리 법 중 하나이며 거의 모든 시료에 적용이 가능한 방법이다. 그러나 많은 시간과 노동력을 요구하며 작업자의 숙련도도 중요하다. 다량의 발연질산 폐 액이 발생하는 단점도 가지고 있다.

다른  $^{90}\text{Sr}$  분리 법으로 extraction chromatography가 있다. 이 방법의 장점은 동시에 여러 시료의 분리가 가능하고 비상시 신속한 분석을 할 수 있으며 Sr-specific resin의 재 사용이 가능하며 소량의 시료를 신속히 분리해낸다. 단점은 해수 분리 시 많은 시약이 소모되며 컬럼 및 Sr-specific resin의 비용이 많이 들고 대량의 시료에 적합하지 않다.

본 연구에서는 발연질산 법보다 시간을 단축시킬 수 있고, 폐 액으로 인한 위험성이 적은 extraction chromatography의 Sr-specific resin을 이용하여  $^{90}\text{Sr}$ 을 분리하였다.

#### 4. $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 측정장비

전처리와 분리가 끝난  $^{90}\text{Sr}$ 은 보통 두 가지의 장비 중 하나로 측정을 하게 된다. 즉 low background gas proportional  $\alpha/\beta$  counter와 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter, LSC)가 있다. low background gas proportional  $\alpha/\beta$  counter의 장점은 액체섬광계수기보다 낮은 background 계수치를 가지며, 핵종 구분 없이 시료에서 방출되는 베타선을 측정한다. 단점은 핵종의 구분이 불가하며, 불확도가 크고, 흡수보정하기 위한 균질 한 교정선원의 제조가 어렵다. 하지만 액체섬광계수기는 용액형태의 시료를 측정할 수 있어 시료의 조제가 간단하며, 자체흡수가 거의 없고, 다수의 시료를 자동으로 처리할 수 있다.<sup>[7]</sup>

본 연구는 시료의 조제가 간단해야 하며, 신속히 측정이 가능하고 다수의 시료를 다루기 때문에 액체섬광계수기를 측정장비로 선택하였다.

### III. 제주도내 환경시료 중 $^{90}\text{Sr}$ 의 분리

본 연구에서는 세 가지의 환경시료를 가지고  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도를 측정하였고, 각 시료마다 특징이 다르므로 전처리 과정이 조금씩 다르다. 그러므로 시료 별로 나누어 분석방법을 설명하였다.

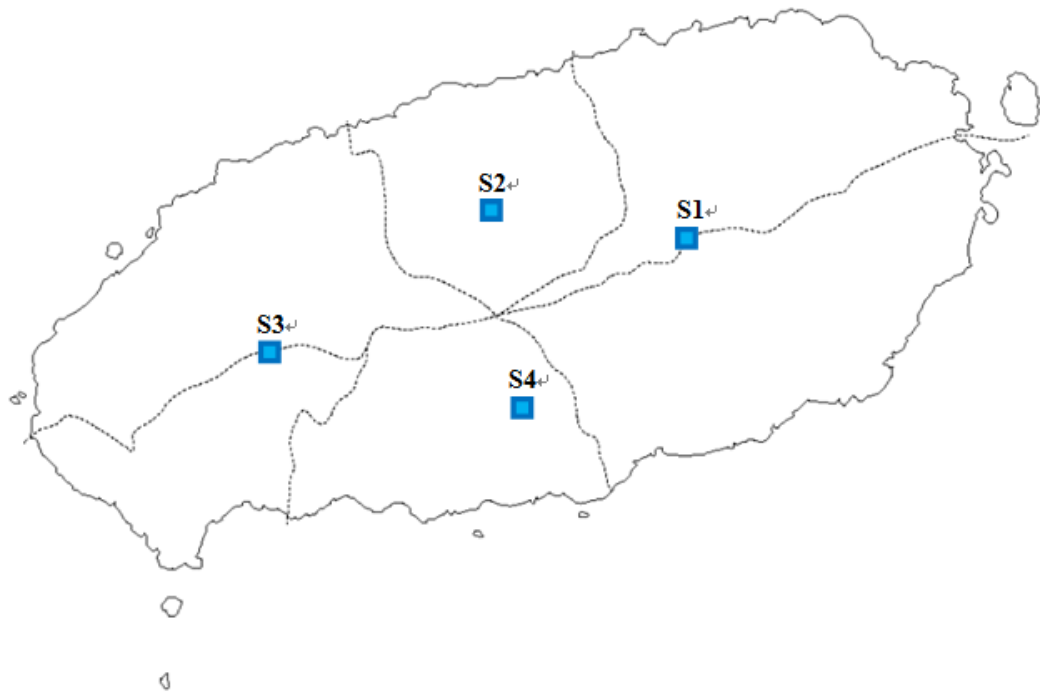
#### 1. 제주도내 환경시료의 특징

##### 1.1. 토양시료

과거 강대국들의 핵 실험과 1986년의 체르노빌 원전사고, 그리고 2011년 후쿠시마 원전사고로 인해 많은 양의 방사성 핵종들이 대기로 방출되었다. 이 방사성 핵종들은 낙진, 빗물 등과 함께 지표면으로 강하였고, 토양에 쌓이게 되면서 토양의 환경방사능을 증가시켰다. 토양에 침적된 방사성 핵종은 온도와 강수량 등의 환경조건과 토양의 조직, 식생 등 화학적 물리적 조건에 따라 토양에 축적되는 양과 이동에 따라 달라진다. 토양의 핵종분석은, 앞으로 생태계 중 먹이사슬의 끝인 인간에게 끼칠 영향을 분석하는데 매우 중요하다.

제주도 토양의 지질학적 특징은 대부분이 scoria cone으로 구성되며 투수성이 강하다. 그리고 많은 강수량으로 염기의 용탈이 심하지만 비교적 높은 수소 이온을 가지고 있다<sup>8)</sup>.

본 연구에서는 제주도의 지질학적 특성을 고려하여 방위 별로 지점을 선정하였고 Figure 3에 표시하였다.



**Figure 3. Soil sampling point of Jeju island.**

토양의 채취지점의 위도와 경도, 그리고 채취일자는 Table 5에 표시하였다. 선정에 앞서 기본적인 채취지점 선정조건은 공기 순환이 원활하고 위가 트여있는 개활지, 그리고 자연 그대로 보존되어있으며 경작지가 아닌 곳, 두 조건을 만족하는 장소를 찾아 선정하였다.

**Table 5. Geographical information of the soil sampled location**

Location	Geo code	Altitude (m)	Sampled date
S1 (San-gum-bu-ri)	N33°26'8.1" E126°41'19.2"	424	2013-06-05
S2 (Gwan-eum-sa)	N33°25'27.8" E126°33'24.2"	548	2013-07-11
S3 (Dol-o-reum)	N33°24'18.4" E126°27'59.6"	692	2013-07-18
S4 (Mi-ak-san)	N33°18'14.0" E126°33'33.0"	472	2013-08-08

## 1.2. 모래시료

제주도에 분포하고 있는 바다모래의 입경과 색은 각각 다르다. 바다모래의 생성 과정과 환경적 요인에 따라 그 화학적, 물리적 특징이 다르다. 제주 지역의 모래는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함유량이 높은 모래와  $\text{CaO}$ , LOI(Loss of Ignition)의 함유량이 높은 모래로 나뉘어 진다<sup>9)</sup>. 제주도의 어떠한 모래도 이와 같은 화합물을 포함하고 있으므로 화학처리 시 Al, Fe, Ca 제거를 확실히 해야 한다.

본 연구에서는 제주도를 둘러싼 해안 모래해변을 위주로 채취하였다. 6개의 지점으로 삼약, 함덕, 월정, 표선, 화순, 협재로 선정하여 채취를 하였고 위치는 Figure 4에 표시하였다.



Figure 4. Sand sampling point of Jeju island.

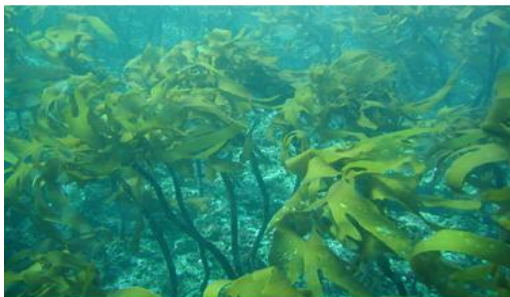
모래의 채취지점의 위도와 경도, 그리고 채취일자는 Table 6에 표시하였다. 모래시료는 썰물시간 때, 젖은 모래를 채취하였다.

**Table 6. Geographical information of the sand sampled location**

Location	Geo code	Sampled date
S1 (Hyeop-jea)	N33°23'39.93" E126°14'19.43"	2014-08-02
S2 (Sam-yang)	N33°31'33.75" E126°35'10.32"	2013-04-11
S3 (Ham-deok)	N33°33'19.04" E126°47'51"	2013-05-14
S4 (Wol-jung)	N33°32'36.72" E126°40'8.80"	2014-04-27
S5 (Pyo-seon)	N33°19'41.92" E126°50'30.28"	2014-07-05
S6 (Hwa-sun)	N33°14'23.91" E126°19'59.05"	2014-07-12

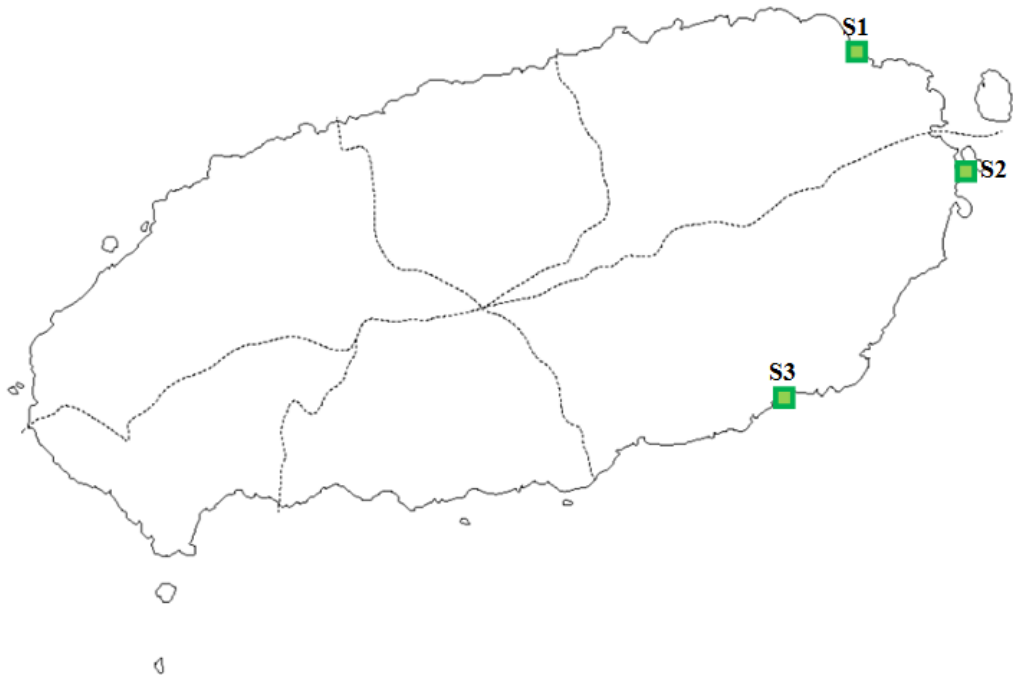
### 1.3. 해양시료(감태)

감태(*Ecklonia cava*)는 식용 해조류로 갈조류의 다시마목(*Laminariales*) 미역과 (*Alariaceae*)의 식물에 속하며 Figure 5와 같다. 감태는 한국 남해안과 제주연안, 일본에 서식하며 길이는 1-2 m이고 줄기는 원기둥 모양이지만 밑동은 뿌리와 비슷한 형태를 한다. 감태의 증양은 어릴 때 속이 차있으나 완전히 자란 후에는 속이 비는 개체도 있다. 잎은 갈색이나 말리게 되면 검은색으로 변한다. 봄에 나타나는 어린 개체는 줄기 길이가 5-10 m이고 가운데잎 길이가 20-30 cm 정도 이다.



**Figure 5. Photography of *Ecklonia cava*.**





**Figure 6. *Ecklonia cava* sampling point of Jeju island.**



감태는 주로 전복, 소라 등의 먹이이며 후코이단을 함유하고 있고, 알긴산이나 요오드칼륨을 만드는 주요 원료로 사용되며 화장품, 건식품 등 많은 곳에서도 사용이 되고 있다. 그리고 어패류가  $^{90}\text{Sr}$ 이 포함되어 있는 감태를 먹고 자란 후 먹이사슬 끝에 있는 인간이 섭취를 할 경우 최대 농도가 7-8배씩 높아진다. 본 연구에서는 감태의 용도가 많아지면서 먹이사슬의 끝인 인간에 대한 영향을 줄 수 있기 때문에 해양생물의 주된 식량원인 감태 중  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도를 분석하였다. 2011년부터 2013년까지의 감태를 채취하였다. 감태는 강제채취가 불가능하기 때문에 떠밀려온 감태만을 사용하였다. 제주에 서식하는 감태는 각 시기별로 떠밀려온 위치도 다르기 때문에 매년 채취 지점이 달라지며 Figure 6은 각 년도 별로 떠밀려온 감태를 채취한 위치를 나타내었다. 채취지점의 위도와 경도, 그리고 채취일자는 Table 7에 표시하였다.

**Table 7. Geographical information of the *Ecklonia cava* sampled location**

Location	Geo code	Sampled date
S1(2011) (Gu-jwa)	N33°33'32.8" E126°48'40.0"	2011-07-05
S2(2012) (Seong-san)	N33°27'7.5" E126°55'40.5"	2012-07-11
S3(2013) (Pyo-seon)	N33°19'33.3" E126°50'29.1"	2013-07-18

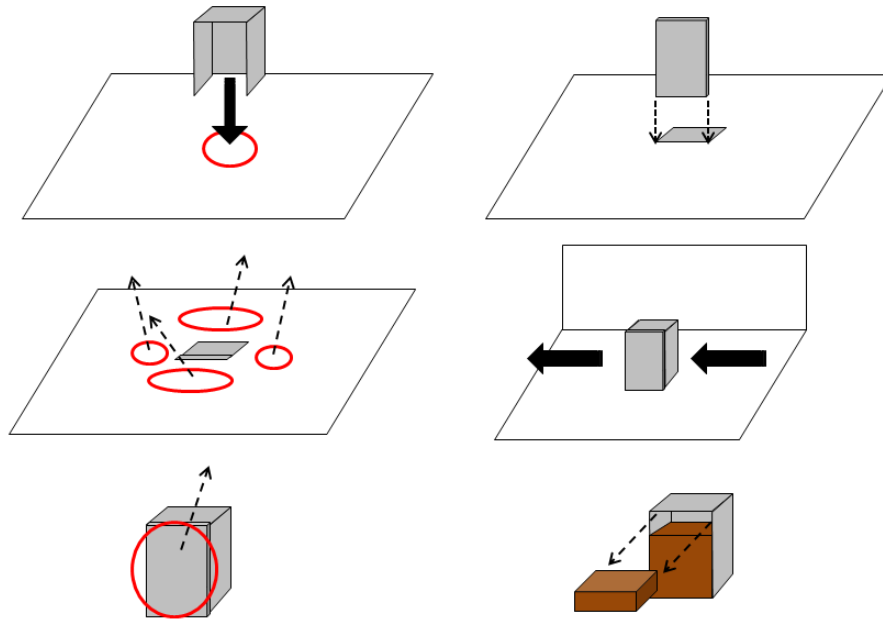
## 2. 시료채취 및 전처리

### 2.1. 토양시료

제주도 토양은 깊이 20 cm이하인 곳을 찾기가 힘들고 토양 자체가 매우 단단하여 채취에 많은 어려움이 있다. 이런 사항으로 본 연구에서는 Figure 7과 같이 강철재질의 토양시료 채취도구(15×10×20 cm)를 제작하여 Figure 8과 같이 깊이별 2 cm 단위로 토양을 채취하였다.



**Figure 7. Soil sampling tools.**



**Figure 8. Surface soil sampling process.**



뚫린 부분을 토양에 삽입 후 철판을 삽입하여 강철의 사방을 모두 막는다. 그리고 Figure 9와 같이 주변의 토양을 모두 걷어낸 후 도구를 옆으로 밀면서 들어 올린다. 이 작업 후 삽입된 철판을 제거하고 미리 2 cm간격으로 체크한 부분을 확인하며 얇은 판을 이용해 토양을 각각 slice형태로 만든다.



**Figure 9. Sampling of surface soil.**

2 cm 간격으로 썰린 토양들을 각각 깊이 별로 폴리에틸렌 팩에 넣어 보관을 하였다. 이 작업을 각 깊이 별로 무게가 2 kg 이상 될 때까지 수행한다. 채취한 토양시료를 종이 위에 올려 약 하루간 자연건조 하였다. 그 후 완전히 마른 토양시료의 나뭇가지나 나뭇잎 등 찌꺼기들을 제거한 후 분쇄기로 토양시료를 분쇄 하였다. 분쇄된 시료를 355  $\mu\text{m}$  망체를 이용하여 여과시켜 부드러운 토양시료만 얻는다. 이 시료를 105  $^{\circ}\text{C}$  열풍건조기(dry oven)에서 24 시간 이상 건조시킨 후 도가니에 건조토양 100 g씩 정취 하여 전기로에서 550  $^{\circ}\text{C}$  이상 가열하여 유기물을 제거시킨다. Figure 10은 유기물이 제거된 토양시료이다.



**Figure 10. Ash soil sample.**

#### 1) $^{90}\text{Sr}$ 추출과정

전기로에서 유기물을 제거한 시료샘플 두 개를 2 L 플라스크에 각각 넣고 하나에는 Sr carrier( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ : 10 mg/mL) 1.0 mL을 첨가하였다. 각각 플라스크에 9M HCl 500 mL을 넣고, 증발접시를 덮은 후 hot plate 위에서 3시간 동안 magnetic bar를 이용하여 교반하면서 가열하였다. 가열 시 산의 기화가 일어나기 때문에 후드에 서 실시하였다. 가열한 용액을 Figure 11과 같이 유리섬유여과지(Glass filter; GF/C,

10 cm, Whatman No 2)를 이용하여 흡입여과 하였다. 뜨거운 상태에서 여과를 시키고 두 번 정도 반복하며, 남은 잔사를 증류수 500 mL를 넣고 가열 후 세정하였다. 여과액과 세정액을 2 L beaker에 옮기고 증류수를 가하여 약 1.2 L가 되게 하였다.



**Figure 11. Process to filter the soil samples.**

## 2) Fe 제거과정

추출한 용액에 pH 9이상이 될 때까지 암모니아수( $\text{NH}_4\text{OH}$ )를 넣고 5분 이상 끓여 숙성하였다. 방냉하여 침전을 완성하고 원심분리기를 이용하여 분리한 다음 Fe 침전물을 제거하고 상등액을 얻었다. 상등액을 약 pH가 1.0이 될 때까지 소량의 HCl을 넣고 한번 더 가열하여 숙성하였다.

### 3) Oxalate 염 침전분리 과정

숙성시킨 용액을 magnetic bar로 교반하면서 oxalic acid 40 g을 조금씩 넣어 녹였다. Bromo Cresol Green(BCG) 지시약 (250 mL-volumetric flask에 BCG 0.1 g을 0.02 M NaOH 7.15 mL에 용해시킨 후 증류수로 marking 하여 제조) 1.0 mL를 첨가 후 용액을 교반하면서 약한 불로 가열하여 암모니아수를 넣고 용액의 색상이 청록색이 될 때까지 천천히 넣어 옥살산염 침전을 완성하였다. 용액을 다시 끓여 침전을 숙성시키고 약 4-5시간 방냉하였다. 침전이 완전히 가라 앉으면 상등액을 2 L beaker에 옮기고 침전물은 다른 beaker에 옮겨 보관하였다 (1차 옥살산염 침전제조). 옮긴 상등액에 HCl 50 mL와 Ca carrier ( $\text{Ca}^{2+}$ : 50 mg/mL) 5.0 mL를 첨가하고 가열하였다. 용액을 끓을 때까지 가열 후, oxalic acid 5 g을 조금씩 가하고 교반 해주면서 용액 색상이 청록색이 될 때까지 암모니아수를 넣어 침전을 제조하였다. 용액을 다시 가열하여 침전을 숙성시키고 약 4-5시간 동안 방냉시킨다 (2차 옥살산염 침전제조). 경사법을 이용하여 상등액을 제거하고 침전물을 1차 옥살산염 침전과 합쳤다. 합친 옥살산염 침전을 최대한 증류수로 세척하여 도가니에 넣고 가열하여 증류수를 증발하였다. 건조시킨 침전물이 들어있는 도가니를 전기로에 넣어 550 °C 이상 약 12시간 가열하여 유기물을 완전히 제거해 준다. 도가니를 꺼내 8 M  $\text{HNO}_3$ 로 침전물을 녹이고, 녹인 용액을 보관하였다. Figure 12는 토양 내  $^{90}\text{Sr}$ 의 분리추출과정을 보여준다.

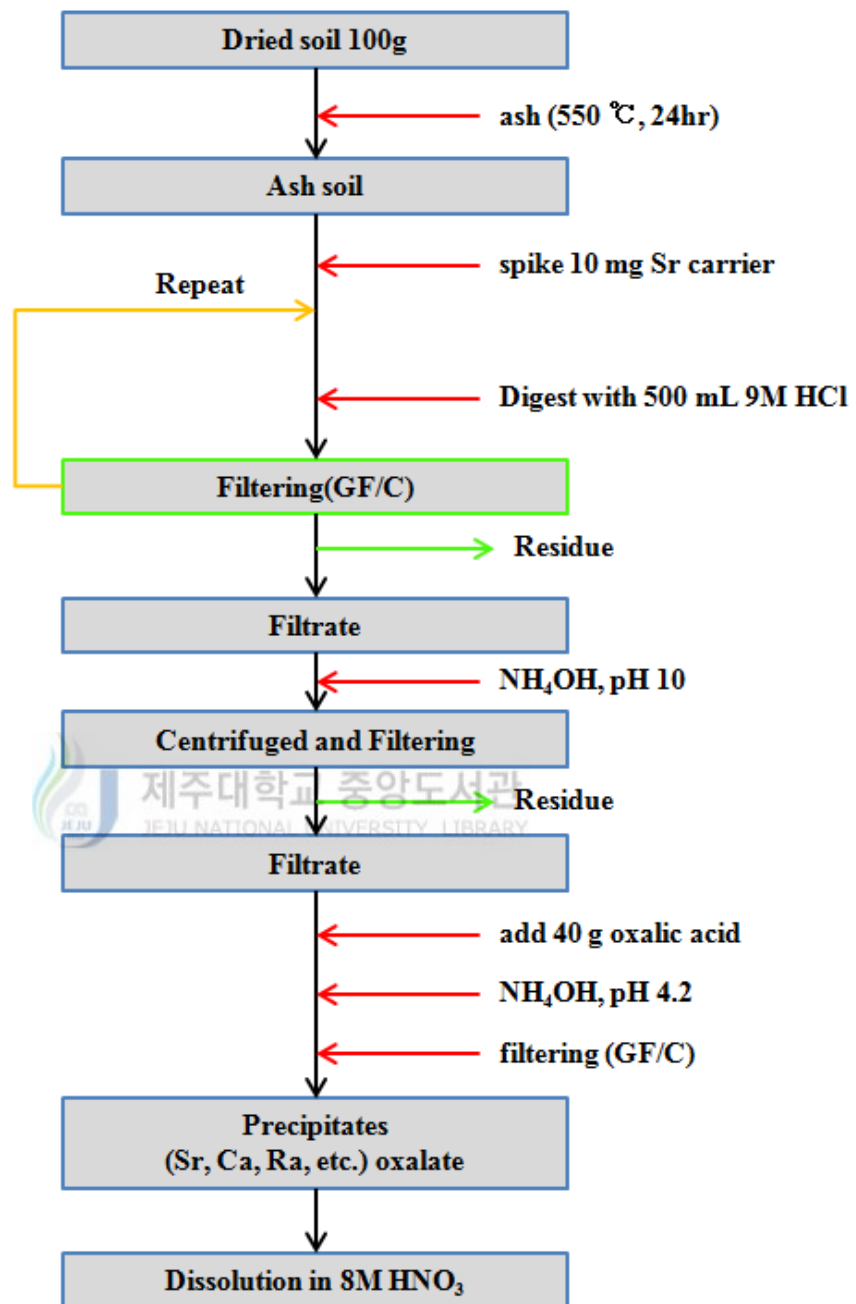


Figure 12. Flow chart for separation of  $^{90}\text{Sr}$  in soil.

## 2.2. 모래시료

모래 채취 전에 가로 50 cm, 세로 50 cm를 모래 위에 그린 후, 깊이 1-2 cm를 채취하여 폴리에틸렌 팩에 넣어 밀봉하였다. 채취 시 물이 빠져나간 경계 면 부근의 젖은 모래를 이용한다.



**Figure 13. Sampling of sand.**

채취한 모래시료를 종이 위에 올려놓고 자연건조를 약 4-5일간 건조시킨다. 모래시료는 수분과 염분이 많기 때문에 토양보다 자연건조 시간이 오래 걸린다. 건조모래를 분쇄기로 분쇄 후 355  $\mu\text{m}$  망체를 이용하여 여과시킨다. 여과된 부드러운 모래를 열풍건조기(dry oven)에서 105  $^{\circ}\text{C}$  이상 24시간 동안 건조시킨다. 건조시킨 모래시료를 50 g씩 정취 하여 도가니에 넣고 전기로에서 550  $^{\circ}\text{C}$  이상 가열하여 유기물을 제거시킨다.



### 1) $^{90}\text{Sr}$ 추출과정

전기로에서 유기물을 제거한 시료샘플 두 개를 2 L 플라스크에 각각 넣고 플라스크 하나에는 Sr carrier 1.0 mL을 첨가하였다. 각각 플라스크에 9 M HCl 250 mL를 넣고 증발접시를 덮은 다음 hot plate 위에서 약 3시간 동안 magnetic bar를 이용하여 교반하면서 가열하였다. 가열 시 산의 기화가 일어나기 때문에 후드에서 실시한다. 가열시킨 용액을 유리섬유여과지를 이용하여 흡입여과 하였다. 뜨거운 상태에서 여과시키고 약 두 번 정도 반복하며, 남은 잔사를 증류수 250 mL를 넣고 가열 후 세정하였다. 여과액과 세정액을 2 L beaker에 옮기고 증류수를 가하여 약 1.2 L가 되게 하였다.

### 2) 탄산염 침전제조(Al, 1족 원소 제거과정)

모래는 칼슘이 상당량 포함되어 있으므로 이 과정을 필수적으로 하였다. 용액에 Ca carrier 5 mL를 첨가하고 용액을 magnetic bar를 이용하여 교반하면서 NaOH를 천천히 가하여 pH 10 이상이 되게 하였다. pH 10 이상이 되면  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  50 g을 첨가시켜 탄산염 침전을 완성하였으며, Figure 14과 같다. 상온에서 방냉시켜 침전을 만들고 증발접시로 하루간 방치하였다. 침전이 완성되면 beaker의 상등액을 조심스럽게 기울여 제거하고 침전물을 원심분리 관에 옮긴다. beaker 주변 기벽을 암모니아수(1+100)로 세척하여 원심분리 관의 침전물과 합친다. 원심분리기의 rpm을 3000 rpm으로 설정하고 약 10분간 원심 분리한 후 나머지 상등액을 제거하였다.



Figure 14. Carbonate precipitation process of sand samples.

### 3) Fe 제거과정



탄산염 침전과정에서 원심분리관의 침전물을 2 L beaker에 옮기고 원심분리관을 증류수로 세척하여 beaker에 옮겼다. HCl(1+4)를 이용하여 침전물을 용해하고 증발접시를 덮어 가열하였다. 용해가 되지 않는다면 HCl(1+4)을 더 가하여 용해시킨다. 완전히 용해시킨 용액을 증류수를 넣어 약 1.5 L로 만들고 끓을 때까지 가열시킨다. 용액에 암모니아수를 넣어 pH를 9이상으로 만들고 5분 이상 끓여 숙성시킨 용액을 방냉시켜 침전을 완성하고 원심분리기를 이용하여 원심분리 후 Fe 침전물을 제거하였다. 상등액에 소량의 HCl을 가하여 pH가 약 1.0이 될 때까지 넣고 가열하였다.

#### 4) Oxalate acid 침전분리 과정

용액에 oxalic acid 30 g을 조금씩 가하고, magnetic bar를 이용하여 교반하였다. 이후에 BCG 지시약 1.0 mL를 첨가후 용액을 지속적으로 교반해주며 약한 불로 가열하며 암모니아수를 넣어 용액 색상이 청록색이 될 때까지 천천히 가하여 옥살산염 침전을 완성하였다. 다시 끓여 침전을 숙성시키고 약 4-5시간 방냉하였다. 침전이 완성되면 상등액을 2 L beaker에 옮기고 침전물은 다른 beaker에 옮겨 보관하였다 (1차 옥살산염 침전제조). 옮긴 상등액에 HCl 50 mL와 Ca carrier 5.0 mL를 첨가하고 가열하였다. 용액이 끓으면 oxalic acid 5 g을 조금씩 가하고, 교반하면서 용액 색상이 청록색이 될 때까지 암모니아수를 넣어 침전을 제조하였다. 용액을 다시 가열하여 침전을 숙성시키고 약 4-5시간 동안 방냉하였다 (2차 옥살산염 침전제조). 경사법을 이용하여 상등액을 제거하고 침전물을 1차 옥살산염 침전과 합쳤다. 합친 옥살산염은 최대한 증류수로 세척하여 도가니에 넣고 가열하여 증류수를 증발하였다. 건조시킨 침전물이 들어있는 도가니를 전기로에 넣어 550 °C 이상 약 12시간 가열하여 유기물을 제거하였다. 도가니를 꺼내 8 M HNO<sub>3</sub>를 이용하여 침전물을 녹이고, 녹인 용액을 보관하였다. Figure 15는 모래 내 <sup>90</sup>Sr의 분리 추출과정을 보여준다.

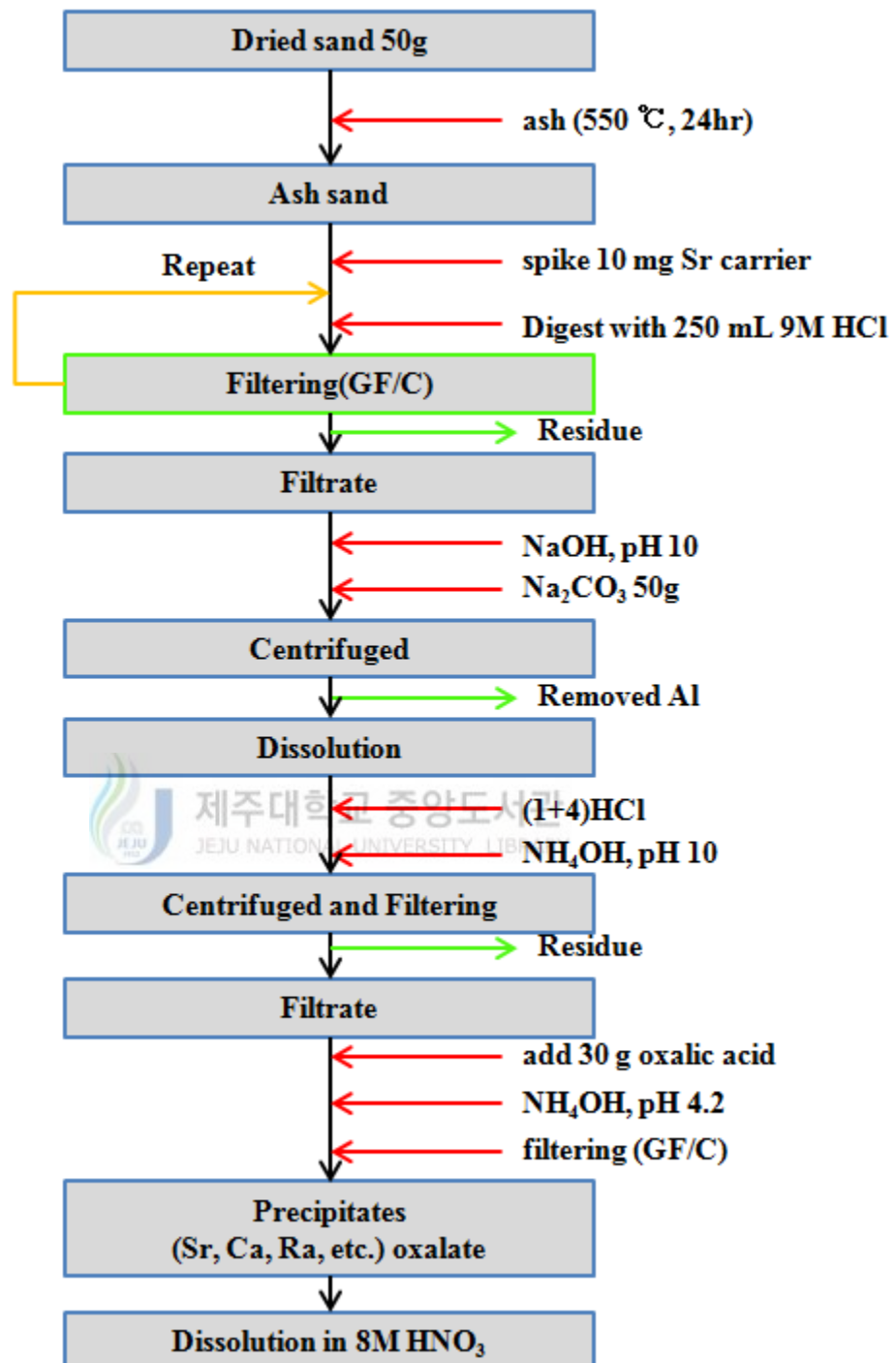


Figure 15. Flow chart for separation of  $^{90}\text{Sr}$  in sand.

### 2.3. 감태시료

감태는 해양생물들의 식량원으로 강제채취가 불가능하게 되어있다. 그러므로 과도에 의해 떠 밀려온 감태만을 사용하였다. 감태는 제주도 서쪽보다는 동쪽방면 해안가에 많이 떠 밀려 오기 때문에 2011년에는 구좌, 2012년에는 성산, 2013년에는 표선에서 채취하였다. 2 kg 정도 채취한 감태시료를 물로 세척하여 이물질을 제거하고 자연건조 시킨 후, 분쇄기로 분쇄하여 시료를 얻었다. Figure 16는 자연건조 시킨 감태이다.



**Figure 16. Dry *Ecklonia cava*.**

얻은 시료를 열풍건조기에서 105 °C로 24시간 이상 건조시키고, 건조된 감태시료를 두 번 100 g씩 취한 후, 전기로에서 550 °C 이상 가열하여 회화하였다. 회화 과정이 끝나면 화학처리과정을 진행하였다.

#### 1) $^{90}\text{Sr}$ 추출과정

전기로에서 회화 한 시료샘플 두 개를 2 L 플라스크에 각각 넣고 플라스크 하나에는 Sr carrier 1.0mL을 첨가하였다. 각각 플라스크에 9 M HCl 500 mL를 넣고 증발접시를 덮은 다음 hot plate 위에서 약 3시간 동안 magnetic bar를 이용하여 교반

하면서 가열하였다. 가열 시 산의 기화가 일어나기 때문에 후드에서 실시하였다. 가열한 용액을 유리섬유여과지를 이용하여 흡입여과 하였다. 뜨거운 상태에서 여과시키고 약 두 번 정도 반복하며, 남은 잔사를 증류수 500 mL를 넣고 가열 후 세정하였다. 여과액과 세정액을 2 L beaker에 옮기고 증류수를 가하여 약 1.2 L가 되게 하였다.

## 2) Fe 제거과정

추출한 용액에 pH 9이상이 될 때까지 암모니아수를 넣고 5분 이상 끓여 숙성하였다. 방냉시켜 침전을 완성하고 원심분리기를 이용하여 분리한 다음 Fe 침전물을 제거하고 상등액을 얻었다. 상등액을 약 pH가 1.0이 될 때까지 소량의 HCl을 넣고 한번 더 가열하여 숙성하였다.



## 3) Oxalate acid 침전분리 과정

용액에 oxalic acid 20 g을 조금씩 가하고, magnetic bar를 이용하여 교반하였다. 이후에 BCG 지시약 1.0 mL를 첨가 후 지속적으로 교반해주며 약한 불로 가열하며 암모니아수를 넣어 용액 색상이 청록색이 될 때까지 천천히 가하여 옥살산염 침전을 완성하였다. 다시 끓여 침전을 숙성시키고 약 4-5시간 방냉시킨다. 침전이 완성되면 상등액을 2 L beaker에 옮기고 침전물은 다른 beaker에 옮겨 보관하였다 (1차 옥살산염 침전제조). 옮긴 상등액에 HCl 50 mL와 Ca carrier 5.0 mL를 첨가하고 가열하였다. 용액이 끓으면 oxalic acid 5 g을 조금씩 가하고, 교반하면서 용액 색상이 청록색이 될 때까지 암모니아수를 넣어 침전을 제조하였다. 용액을 다시 가열하여 침전을 숙성시키고 약 4-5시간 동안 방냉하였다 (2차 옥살산염 침전제조). 경사법을 이용하여 상등액을 제거하고 침전물을 1차 옥살산염 침전과 합쳤

다. 합친 옥살산염은 최대한 증류수로 세척하여 도가니에 넣고 가열하여 증류수를 증발하였다. 건조시킨 침전물이 들어있는 도가니를 전기로에 넣어 550 °C 이상 약 12시간 가열하여 유기물을 제거하였다. 도가니를 꺼내 8 M HNO<sub>3</sub>를 이용하여 침전물을 녹이고, 녹인 용액을 보관하였다. Figure 17는 감태 내 <sup>90</sup>Sr의 분리추출과정을 보여준다.



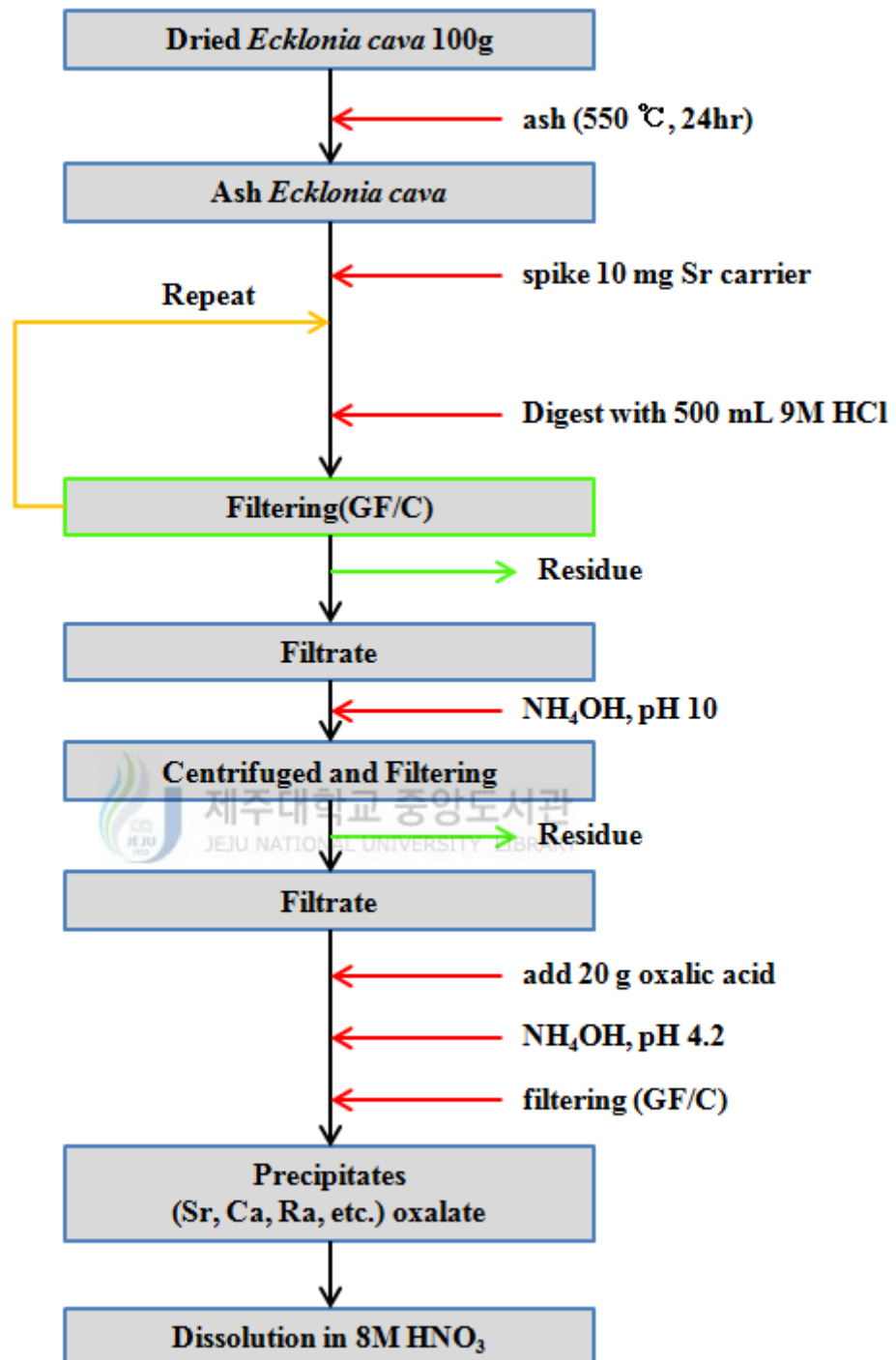


Figure 17. Flow chart for separation of  $^{90}\text{Sr}$  in *Ecklonia cava*.



#### 2.4. Sr-specific resin을 이용한 $^{90}\text{Sr}$ 추출

본 연구에서  $^{90}\text{Sr}$ 의 추출은 Sr-specific resin을 사용하여 추출을 하였다. 컬럼에 토양과 감태시료의 경우 resin을 2.5 g, 모래시료의 경우 2.0 g을 넣는다. 시료용액을 넣기 전에 증류수를 5 mL를 4번 컬럼에 넣어 세척하였다. 세척이 끝나면 8 M  $\text{HNO}_3$  5 mL를 4번 컬럼에 넣어 컬럼 내의 resin을 8M 조건으로 만들어 주었다. 전처리가 끝난 시료용액을 컬럼 통과시키고, 8 M  $\text{HNO}_3$  20 mL를 사용하여 Ca 및 Y 등의 방해원소를 제거하였다. 증류수 20 mL를 사용하여 resin에 흡착된 Sr을 용출하였다. Sr-specific resin을 이용하여 추출한  $^{90}\text{Sr}$  용액은 산성이므로 암모니아수를 사용하여 pH를 10이상으로 만들었다. 용액에 포와  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  용액 5 mL를 넣어 침전을 만들고 원심분리기를 이용하여 원심 분리하였다. 상등액을 제거하고 에탄올 10 mL를 사용하여 침전을 회수하여 low-potassium vial에 옮긴다. 에탄올에 녹인  $^{90}\text{Sr}$  용액을 가열하여 완벽히 증발시킨 후 회수율 측정용 무게를 채고, 8.0 mL 0.05 M  $\text{HNO}_3$  로 다시 녹여 액체섬광체(Ultima gold LLT)를 18 mL 가하여 cocktail을 제조하면,  $^{90}\text{Y}$ 의 생성이 이루어지지 않은 순수  $^{90}\text{Sr}$ 만 있는 상태로 시간이 지나면 발생하는  $^{90}\text{Y}$ 의 방사능을 보정해 주지 않아도 되기 때문에 바로 LSC를 이용하여 계측하였다. Figure 18은 Sr-specific resin을 이용한  $^{90}\text{Sr}$  추출과정을 간단히 표시한 그림이다.

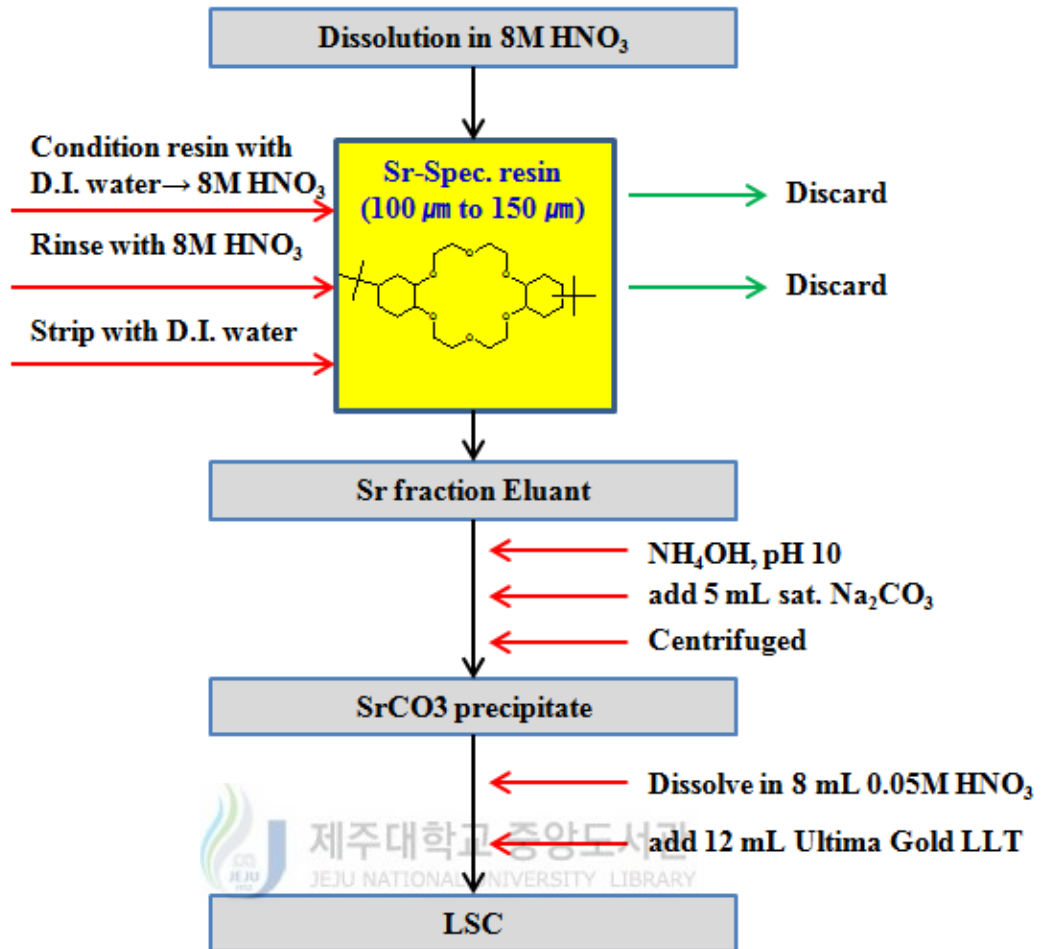


Figure 18. <sup>90</sup>Sr separation using Sr-specific resin.

### 3. 방사능 측정

#### 3.1. Background 측정

LSC로 방사능을 측정하기 전에 background를 측정하였다. low-potassium vial에 0.05 M HNO<sub>3</sub> 8 mL와 액체섬광체 12 mL를 넣어 cocktail을 만들고, LSC를 사용하여 여섯 번 측정 후 계수율을 구한다. 이 값들을 이용하여 평균, 표준편차를 구하고 신뢰구간을 만들어 background를 계산한다. background의 계수치는 평균  $5.36 \pm 0.58$  CPM이며 Table 8에 표시하였다.

**Table 8. Background calculation**

No	Count rate(CPM)	Corrected count rate(CPM)
1	10.42	
2	5.86	5.86
3	4.58	4.58
4	5.56	5.56
5	4.92	4.92
6	5.87	5.87
Maximum	10.42	
Minimum	4.58	
Average	6.20	<b>5.36</b>
Standard deviation	2.13	0.58
Relative Standard deviation (%)	34.4	10.9

### 3.2. Sr 시료 회수율 계산

시료의 천처리가 제대로 이루어 지고, 순수하게 Sr을 분리해냈는지 알기 위해서는 carrier의 회수율을 측정함으로써 확인할 수 있다. Sr-specific resin의 경우 resin의 수용력이 작기 때문에 수 mg이내의 안정된 Sr carrier를 넣어준다.

100% 회수 시 어느 정도의 Sr carbonate가 생성되는지 확인하기 위해 질량측정법을 이용하여 Sr의 회수율을 계산한다. 안정된 Sr carrier를 사용하여 resin에 통과 후, low-potassium vial에 넣어 증발시키고, 남은 건조질량을 측정하였다. 이 과정을 다섯 번 측정하여 얻은 SrCO<sub>3</sub>으로의 변환 건조질량을 평균과 표준편차 값을 이용하여 상대표준편차(relative standard deviation, rsd)를 계산하였다. 제조 Sr carrier 10 mg을 넣어줄 때 SrCO<sub>3</sub>으로의 변환량은 평균 0.0145 ± 0.0010 g 이었으며, 이 때 rsd는 6.82% 이었다.



**Table 9. Recovery ratio of Sr carrier**

No.	SrCO <sub>3</sub> mass (mg)
1	0.0140
2	0.0158
3	0.0141
4	0.0133
5	0.0151
Average	<b>0.0145</b>
Standard deviation	0.0010
rsd(%)	<b>6.8216</b>

안정된 Sr carrier를 넣은 시료와 넣지 않은 시료의 SrCO<sub>3</sub> 변환 건조질량과 각각의 방사능 측정 counter 값을 이용하여 다음과 같이 회수율을 구하였다.

$R_0$  = 안정된 Sr carrier를 투여 하지 않은 시료의 회수율

$R$  = 안정된 Sr carrier를 투여 한 시료의 회수율

$a$  = 초기 시료의 Sr 질량

$b$  = 안정된 Sr carrier를 넣은 질량

$G_0$  = 안정된 Sr carrier를 투여 하지 않은 시료의 resin 통과 후 건조질량

$G$  = 안정된 Sr carrier를 투여 한 시료의 resin 통과 후 건조질량

$A$  = 시료의 방사능

$X$  = 안정된 Sr carrier를 투여 한 시료의 계수율

$Y$  = 안정된 Sr carrier를 투여 하지 않은 시료의 계수율

안정된 Sr carrier를 넣은 시료와 넣지 않은 시료의 resin 통과 후 건조질량을 모른다는 가정하에 계산식을 만들면 (1)과 (2)로 만들 수 있다.

$$a \times R_0 = G_0 \quad (1)$$

$$(a + b) \times R_0 = G \quad (2)$$

두 개의 건조질량의 방사능은 안정된 Sr carrier를 넣었기 때문에 같다. (3)과 (4) 식으로 표시 할 수 있다.

$$A \times R = X \quad (3)$$

$$A \times R_0 = Y \quad (4)$$

식 (3), (4)를 방사능에 대한 식으로 변형하면 다음과 같다.

$$R_o = \frac{X}{A}, A = \frac{X}{R_o} \quad (5)$$

$$R = \frac{Y}{A}, A = \frac{Y}{R} \quad (6)$$

식 (5), (6)은 방사능이 같기 때문에 하나의 식으로 만들 수 있다.

$$R = \left(\frac{Y}{X}\right) R_o \quad (7)$$

각각 실험에서 구한 계수율과 안정된 Sr carrier의 질량, 시료의 건조질량을 이용하여 회수율을 계산하는 식으로 변형이 가능하다. 첫째로 (2)식을 변환한다.

$$(a + b)R = G \quad (8)$$

$$aR + bR = G \quad (9)$$

$$bR = G - aR \quad (10)$$

식에서  $aR$ 의  $R$ 은 식 (6)과 같으므로 대입이 가능하다.

$$bR = G - aR_o \left(\frac{Y}{X}\right) \quad (11)$$

식에서  $R_o$ 는 식 (1)과 같으므로 대입이 가능하다.

$$bR = G - G_o \left(\frac{Y}{X}\right) \quad (12)$$

$$R = \frac{G - G_o \left(\frac{Y}{X}\right)}{b} \quad (13)$$

유도를 하면 식 (13)으로 성립되며, 각각 시료들의 회수율을 계산 시, 각 시료들의 계수치에서 background값을 제외시키고, 시료들의 resin 통과 후 건조질량,  $b$ 에 상대표준편차 계산 시 구한 평균값인 0.0145 g을 대입하여 계산하였다.

### 3.3. 최소검출방사능준위(Minimum detectable activity level, MDA) 계산

저준위 방사능이 함유된 환경시료에서 방사능 계측 시 background의 영향을 받는다. 그러나 시료의 방사능이 극히 미미할 때는 그 신호를 background와 구분하기 어려워지므로 측정할 수 있는 방사능 한계의 문제가 발생한다. 실제로 얻는 계수가 background와 구분될 수 있는 한계를 검출한계치(Lower limits of detection, LLD)라 부르고 이로부터 계수효율 등을 반영하여 방사능으로 환산한 값을 최소검출방사능준위(Minimum detectable activity level, MDA)라 하며 다음식과 같이 주어진다.<sup>[7]</sup>

$$MDA = \frac{L_D}{y\epsilon t_s} = \frac{4.62\sqrt{BGC}}{t_B \times y\epsilon t_s} \quad (14)$$

여기서  $y$ 는 붕괴당 방사선 방출비,  $\epsilon$ 는 절대 계측효율,  $t_s$ 는 시료의 계측시간,  $t_B$ 는 background 계측시간, BGC는 background의 계수치이다. 식을 보면 시료의 최소 방사능은 계측기의 background 계수가 작고 계수효율이 크며 계수시간이 길어질수록 작아진다.

### 3.4. 방사능 측정

본 연구에서 LSC인 Quantulus 1220(Wallac, Perkin Elmer Co., Finland)을 사용하기 앞서, Wallac 社에서 제공하는 소프트웨어 WinQ를 이용하여 방사능을 측정하였다.

먼저 protocol에서 PAC(Pulse Amplitude Comparison) level, channel 영역, 측정시간, 시료 명, 측정 횟수 등을 설정하였다.

본 연구에서는 Sr의 회수율과 계수율, 기기 계측효율, 시료의 사용량을 이용하여 방사능을 계산한다. 계산하기 전에 기기효율을 구하기 위해 quenching curve를 제작 후 식을 구하였다.

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  표준용액 5.0 mL (27.96 Bq/mL)를 취하여 50 mL 테프론 비이커에 넣고 증발 건조한다. 여기에 다시 8.0 M  $\text{HNO}_3$ 용액 10 mL을 가하여 녹인 후 8.0 M  $\text{HNO}_3$ 용액으로 전처리 한 Sr-specific column에 표준시료를 가하여 흡착시켜주고 8.0 M  $\text{HNO}_3$  30 mL로 컬럼을 충분히 세정한다(Sr-spec column을 통과한 용액과 세정액은  $^{90}\text{Y}$ 만이 함유되어 있으므로 합하여 증발 건조 한 후 소량의 0.1 M HCl를 사용하여 건조물을 녹임). Sr-spec 컬럼에 흡착된 Sr은 증류수 5 mL를 4회 사용하여 용출하고 증발건조 후 0.1 M HCl 10.0 mL로 건조물을 녹인 다음 quenching agent로 가장 많이 사용되는 nitromethane을 0, 200, 400, 600  $\mu\text{L}$ 까지 순차적으로 첨가시킨 후  $^{90}\text{Sr}$  quenching 곡선을 작성하였다. Figure 18은 LSC의  $^{90}\text{Sr}$  quenching curve이다.



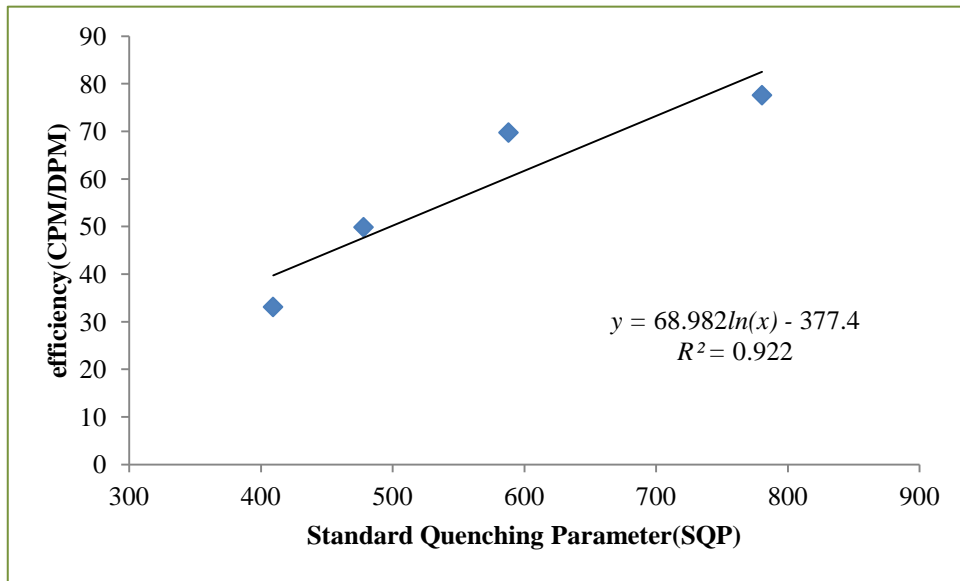


Figure 19. Quenching curve of  $^{90}\text{Sr}$ .

위 quenching curve를 이용하여 구한식은 다음과 같다.

$$y = 68.982 \ln(x) - 377.4 \quad (16)$$

각 연구에서 LSC를 이용하여 시료를 측정 후, registry에 나온 SQP값을 대입하여 사용하면 각 시료 측정 시 기기 계측효율을 구할 수 있다.

방사능은 다음의 식(17)로 나타낼 수 있다. 여기서 인자  $E$ 는 기기의 계측효율이며,  $R_{Sr}$ 은 Sr의 회수율,  $g$ 은 시료의 사용질량이다.

$$A = \frac{CPM}{R_{Sr} \times E \times g} \quad (17)$$

## IV. 결 과

### 1. 제주도내 토양시료 중 <sup>90</sup>Sr 방사능 분석 결과

제주지역 4개의 토양을 깊이 별로 <sup>90</sup>Sr의 방사능을 분석한 결과, 0-2 cm에서는 산굼부리에서  $18.24 \pm 0.42$  Bq/kg, 관음사에서  $18.27 \pm 0.28$  Bq/kg, 돌오름에서  $13.46 \pm 0.67$  Bq/kg, 미악산에서  $8.70 \pm 0.59$  Bq/kg로 검출되었다. 각 지역마다 깊이가 깊어질수록 <sup>90</sup>Sr의 방사능 농도가 낮아지는 것 볼 수 있다. Table 10은 <sup>90</sup>Sr의 깊이 별 방사능농도를 표시하였다.

**Table 10. <sup>90</sup>Sr activity in soil samples in Jeju island**

Location	Depth (cm)	<sup>90</sup> Sr Activity (Bq/kg-dry)	MDA (Bq/kg)
San-Gum-bu-ri	0-2	$18.24 \pm 0.42$	0.33
	2-4	$14.51 \pm 1.24$	2.18
	4-6	$7.72 \pm 0.51$	0.8
	6-8	$7.39 \pm 0.56$	0.93
	8-10	$2.77 \pm 0.22$	0.39
Gwan-eum-sa	0-2	$18.27 \pm 0.28$	0.21
	2-4	$13.48 \pm 0.24$	0.2
	4-6	$6.22 \pm 0.19$	0.24
	6-8	$7.51 \pm 0.17$	0.18
	8-10	$1.69 \pm 0.11$	0.21
Dol-o-reum	0-2	$13.46 \pm 0.67$	0.91
	2-4	$45.27 \pm 2.60$	3.38
	4-6	$7.86 \pm 1.11$	2.3
	6-8	$4.56 \pm 0.29$	0.45
	8-10	$3.76 \pm 0.19$	0.26
Mi-ak-san	0-2	$8.70 \pm 0.59$	0.94
	2-4	$1.09 \pm 0.14$	0.29
	4-6	$3.64 \pm 0.20$	0.29
	6-8	<MDA	2.14
	8-10	$1.46 \pm 0.41$	0.96

Figure 20는 Table 10을 참조하여 제주도내 4개 지점의 토양 중  $^{90}\text{Sr}$  방사능의 수직분포를 그림으로 나타낸 것이다.

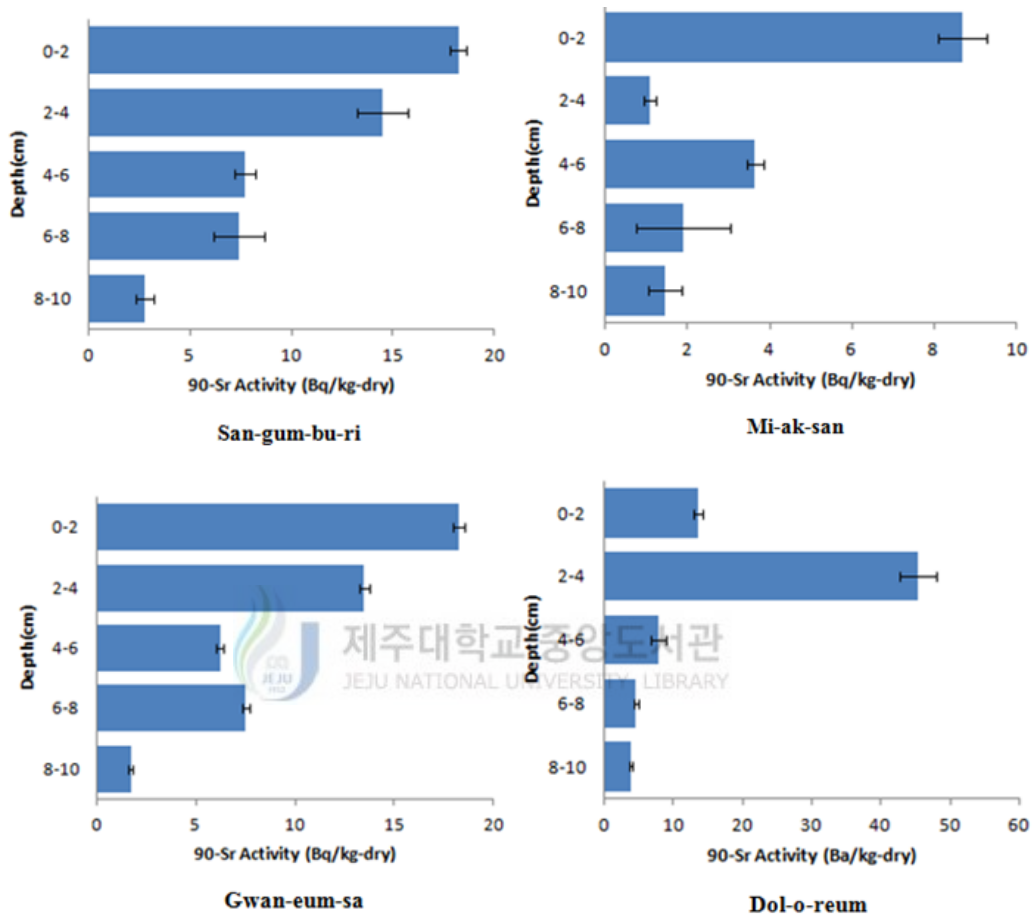


Figure 20. Vertical distribution of  $^{90}\text{Sr}$  activity in the soil from Jeju island.

Figure 20에서 4개의 지역은 깊이가 깊어질수록  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 농도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 돌오름의 경우 2-4 cm구간의 방사능 농도가 비 정상적으로 높고 MDA값도 타 구간보다 높다는 것을 알 수 있다. 미악산의 경우, 6-8 cm 구간의 방사능 농도가 MDA값 보다 이하로 검출되었다. 돌오름의 비 정상적인 방사능 농도는 토양시료의 화학 전처리과정 중 오류가 발생한 것으로 보인다.

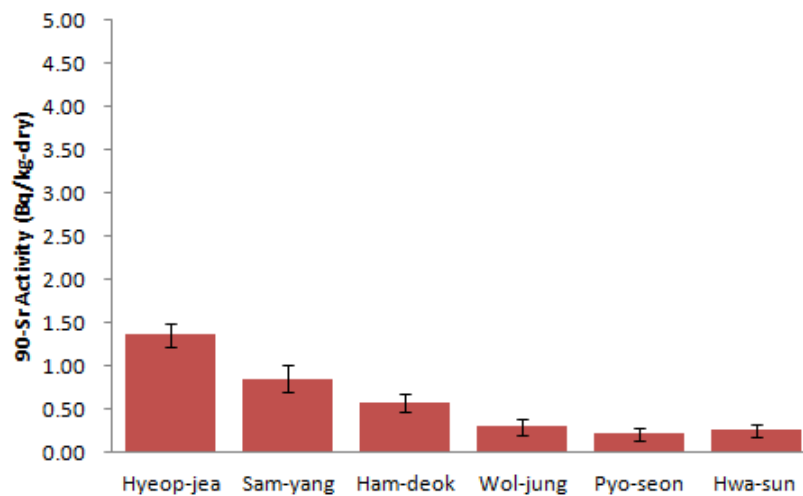
## 2. 제주도내 모래시료 중 $^{90}\text{Sr}$ 방사능 분석 결과

제주도내 모래시료 중  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 분석 결과, 협재에서는  $1.36 \pm 0.14$  Bq/kg, 삼양  $0.85 \pm 0.16$  Bq/kg, 함덕  $0.58 \pm 0.11$  Bq/kg, 월정  $0.30 \pm 0.09$  Bq/kg, 표선은  $0.22 \pm 0.08$  Bq/kg, 마지막으로 화순은  $0.25 \pm 0.06$ 의 검출되었다. 각 지점의 방사능 농도는 매우 낮고 MDA 이상으로 나타났으며, 오차율 또한 크지 않았다. Table 11은 모래시료 내의  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 농도를 나타내었다.

**Table 11.  $^{90}\text{Sr}$  activity in sand samples from Jeju island**

Location	$^{90}\text{Sr}$ Activity (Bq/kg-dry)	MDA (Bq/kg)
Hyeop-jea	$1.36 \pm 0.14$	0.27
Sam-yang	$0.85 \pm 0.16$	0.34
Ham-deok	$0.58 \pm 0.11$	0.25
Wol-jung	$0.30 \pm 0.09$	0.22
Pyo-seon	$0.22 \pm 0.08$	0.18
Hwa-sun	$0.25 \pm 0.06$	0.15

Figure 21은 각 지역별  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 농도의 분포도를 나타내었다.



**Figure 21. Geographical distribution of  $^{90}\text{Sr}$  activity in the sand from Jeju island.**

### 3. 제주도내 감태시료 중 $^{90}\text{Sr}$ 방사능 분석 결과

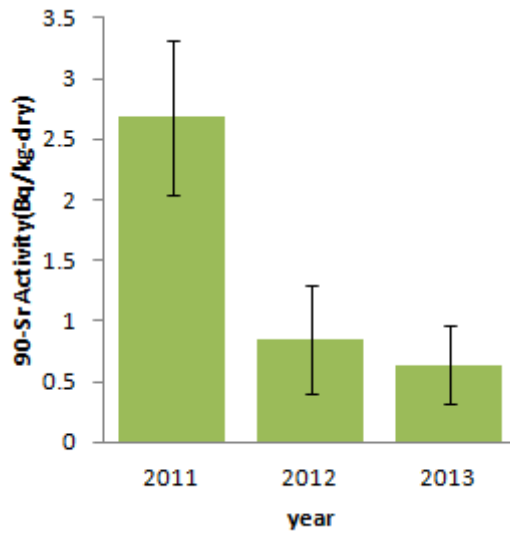
제주도내 감태시료 중  $^{90}\text{Sr}$ 의 분석 결과, 2011년의 방사능 농도는  $3.25 \pm 0.23$  Bq/kg,  $1.30 \pm 0.15$  Bq/kg,  $3.49 \pm 0.57$  Bq/kg으로 평균 방사능은  $2.68 \pm 0.32$  Bq/kg으로 검출되었다. 2011년의 방사능 농도는  $0.60 \pm 0.07$  Bq/kg,  $1.32 \pm 0.26$  Bq/kg,  $0.61 \pm 0.35$  Bq/kg으로 평균은  $0.85 \pm 0.23$  Bq/kg으로 검출되었다. 2013년의 방사능 농도는  $0.16 \pm 0.09$  Bq/kg,  $0.55 \pm 0.15$  Bq/kg,  $1.21 \pm 0.27$  Bq/kg으로 평균은  $0.64 \pm 0.17$  Bq/kg으로 검출되었다. Table 12에서 각 지역별 방사능 농도는 매우 낮은 편이며, 평균적인 값을 볼 때 2011년에는 가장 높았으나 2012, 2013년으로 갈수록 점차 낮아졌다. 방사능의 농도는 오차율이 작고 MDA이상의 방사능 농도가 검출되었다.



**Table 12.  $^{90}\text{Sr}$  activity in *Ecklonia cava* samples from Jeju island**

Sample	$^{90}\text{Sr}$ Activity (Bq/kg-dry)	MDA (Bq/kg)
2011-1	$3.25 \pm 0.23$	0.37
2011-2	$1.30 \pm 0.15$	0.30
2011-3	$3.49 \pm 0.57$	1.22
2011 Average	$2.68 \pm 0.63$	
2012-1	$0.60 \pm 0.07$	0.16
2012-2	$1.32 \pm 0.26$	0.58
2012-3	$0.61 \pm 0.35$	0.87
2012 Average	$0.85 \pm 0.44$	
2013-1	$0.16 \pm 0.09$	0.20
2013-2	$0.55 \pm 0.15$	0.37
2013-3	$1.21 \pm 0.27$	0.61
2013 Average	$0.64 \pm 0.32$	

Figure 22에 각 년도 별 평균 방사능 농도분포로 나타내었다.



**Figure 22. Distribution of average  $^{90}\text{Sr}$  activity of the *Ecklonia cava*.**

Figure 22과 같이 2011년부터 2013년으로 시간이 지날수록 방사능 수치가 점차 낮아지는 것을 볼 수 있다.

## V. 결 론

본 연구는 액체섬광계수기(LSC)와 Sr-specific resin을 이용하여 제주도내 환경시료인 토양과 모래, 감태 중  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능을 분석하였다. 토양시료의  $^{90}\text{Sr}$  농도를 연구한 결과, 0-2 cm에서 산굼부리의 방사능 농도는  $18.24 \pm 0.42$  Bq/kg, 관음사는  $18.27 \pm 0.28$  Bq/kg, 돌오름은  $13.46 \pm 0.67$  Bq/kg, 미악산은  $8.70 \pm 0.59$  Bq/kg이 검출되었다. 방사능 농도는 토양의 깊이가 깊어질수록 방사능 농도가 점차적으로 내려가는 것을 볼 수 있다.

모래시료의  $^{90}\text{Sr}$  농도를 연구한 결과, 협재의 방사능 농도는  $1.36 \pm 0.14$  Bq/kg, 삼양은  $0.85 \pm 0.16$  Bq/kg, 함덕은  $0.58 \pm 0.11$  Bq/kg, 월정은  $0.30 \pm 0.09$  Bq/kg, 표선은  $0.22 \pm 0.08$  Bq/kg, 화순은  $0.25 \pm 0.06$  Bq/kg이 검출되었다. 모래시료는 제주도 위치와 관계없이 미량의 방사능 농도가 나왔으며, 전체적으로 모래시료의  $^{90}\text{Sr}$  농도는 매우 낮은 것으로 검출되었다.

감태시료의  $^{90}\text{Sr}$  농도를 연구한 결과, 2011년의 평균 농도는  $2.68 \pm 0.63$  Bq/kg, 2012년의 평균 농도는  $0.85 \pm 0.44$  Bq/kg, 2013년의 평균 농도는  $0.64 \pm 0.32$  Bq/kg이 검출되었다. 평균 방사능 농도를 나열하면 2011년부터 2012년, 2013년까지  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

제주도 토양의 경우, 2011년 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이전 자료가 있다. 1998년의 자료는, 0-5 cm의 표층토양을 채취하여 분석하였으나 제주도내 정확한 채취지점이 표기가 없으며, 채취한 토양시료의 깊이가 깊지 않아 본 연구의 자료보다 신뢰도가 떨어진다. 2004년 자료는 제주도내 정확한 채취지점이 표기되어 있고, 0-30 cm의 시료를 채취하여 분석하였으나, 채취지점이 1 지점으로 본 연구

의 자료보다 신뢰도가 떨어진다. 본 연구의 토양시료 자료는 2011년 이후의 제주도내  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도를 분석하는데 신뢰성이 높다. 하지만 본 연구의 토양시료 결과 자료 중, 돌오름의 2-4 cm에서  $^{90}\text{Sr}$  농도가 월등히 높고 MDA 값도 매우 높았다. 이는 시료의 화학 전처리 과정 중 오류가 생겼을 것으로 보인다.

본 연구에서 토양시료는 1998년 자료와 2004년 자료에 비해 토양의 지질학적 특성을 고려하고, 여러 지점을 선정하였으며, 깊이 별로 분석한 자료이므로 이전 자료들보다 신뢰성이 높다. 그리고 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 분석자료이므로 사고로 인한 환경조사의 기본자료가 될 것으로 사료된다. 모래시료는  $^{90}\text{Sr}$  농도가 검출되었으나, 매우 낮은 농도였다. 감태시료는 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 농도가 점차적으로 낮아졌고 방사능의 농도도 평균적으로 낮기 때문에, 후쿠시마 원전사고의 영향이 거의 없는 것으로 사료된다.

본 연구에서 얻어진 제주도내에서 얻어진 토양과, 모래, 감태 중  $^{90}\text{Sr}$ 의 방사능 분석자료는 향후 제주도내 환경방사능 조사에 대한 기초 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.



## VI. 참고문헌

- [1] NoraVajda, C. K. Kim, 2010. Determination of radiostrontium isotopes: A review of analytical methodology. *Applied Radiation and Isotopes* 68, 2306-2326
- [2] C.K. Kim, J.I. Byun, J.S. Chae, H.Y. Choi, S.W. Choi, D.J Kim, Y.J. Kim, D.M. Lee, W.J. Park, S.A. Yim, J.Y. Yun, 2012 Radilogical impact in Korea following the Fukushima nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 111, 70-82
- [3] Y.G. Sung, C.H. K, 2011. 화학대사전. 卍和
- [4] Cheol-su Kim, 1998. A study on the distribution of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $\text{Pu}$  isotopes in surface soil of Korea. 한국과학기술원 석사학위 논문, 18-19
- [5] H.J. Cha, D.Park, H. Park, M.J.Kang, 2004. Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  activities in the soils of Korea. Korea Atomic Energy Reserch Institute. 1-8
- [6] Ji Yeon Song, 2012. The cumulative of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the soil of Uljin. 경북대학교 석사학위 논문. 10-40
- [7] H.B. Park, H.D. Kang, 2012. 環境放射能과 放射性核種 分析. 경북대학교 방사선 과학연구소. 257-281

- [8] Kyung-Hwan Moon, 2010. Spatial analysis of soils in Jeju Island. *제주대학교 박사학위 논문*. 13-14
- [9] Jin-Young Park, 2007. A study on the characteristics and application characteristics of cheju islands beach sands. *제주대학교 석사학위 논문*. 12-13
- [10] M.H. Lee, H.S. Shin, H.H. Kwang, 1999. Determination of minimum detectable activity in environmental samples. *The journal of the Korean Association for Radiation Protection* 24. 171-184
- [11] J. J. Wang, I. J. Chen, J. H Chiu, 2004. Sequential isotopic determination of plutonium, thorium, americium, strontium and uranium in environmental and bioassay samples. *Applied Radiation and Isotopes* 61, 299-305.
- [12] M. H. Lee, H. J. Ahn, J. H. Park, K. Song, 2011. Rapid sequential determination of Pu, <sup>90</sup>Sr and <sup>241</sup>Am nuclides in environmental samples using an anion exchange and Sr-Spec resins. *Applied Radiation and Isotopes* 69, 295-298.
- [13] Kenichi Tanaka, Jun Takada, 2011. Development of in-situ measurement for <sup>90</sup>Sr specific activity by  $\beta$ -ray survey meter combined with sensitivity correction by Monte Carlo calculation. *Applied Radiation and Isotopes* 69, 814-817.
- [14] T. C. CHU, J. J Wang. Y. M. Lin, 1998. Radiostrontium Analytical Method using Crown-ether Compound and Cerenkov Counting and Its Applications in Environmental Monitoring. *Applied Radiation and Isotopes* 49, 1671-1675.

- [15] C. F. Lin, J. J. Wang, J. C. Huang, C. H. Yeh, M. C. Yuan, B. J. Chang, 2012. Evaluating practicability of an LSC method for routine monitoring gross alpha and beta activities in water samples in Taiwan. *Applied Radiation and Isotopes* 70, 1981-1984.
- [16] S. C. Wu, C. Y. Sun, W. N. Wang, Y. T. He, S. H. Hu, C. J. Zheng, 2013. Separation of strontium from associated elements with selective specific resin and extraction chromatography. *Chinese Chemical Letters* 24, 633-635.
- [17] C. H. Han, D. W. Kim, Y. G. Lee, J. W. Park, 2014. Vertical distribution of  $^{90}\text{Sr}$  Activities in the *Ecklonia cava* of Jeju island, Korea. *Korean Radioactive Waste Society*
- [18] Varenayam Achal, Xiangliang Pan, Daoyong Zhang, 2012. Bioremediation of strontium (Sr) contaminated aquifer quartz sand based on carbonate precipitation induced by Sr resistant Halomonas sp. *Chemosphere* 89, 764-768.
- [19] An Analysis of  $^{90}\text{Sr}$  activity in environmental samples of Jeju island by a Sr-specific resin and liquid scintillation spectrometry. *제주대학교 석사학위 논문*, 54-58.
- [20] Charles J. Pass, Gordon T. Cook, 1994. Handbook of Environmental Liquid Scintillation Spectrometry: A Compilation of Theory and Methods. *Packard Instrument Company* IV, 9.1-9.9

## 감사의 글

길지만 짧았던 2년이라는 시간이 흘러 석사과정을 마무리 하게 되었습니다. 항상 부족하지만 도움을 주신 모든 분들께 감사의 글로 인사 드리고자 합니다.

먼저, 부족했던 학문적 지식과 앞으로 가야 할 방향 등을 제시해주시고 여러 가지 지혜를 주신 박재우 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 그리고 학부시절에 많은 조언과 도움을 주신 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 천원기 교수님, 김남진 교수님, 대학원 수업을 항상 재미있게 강의 해주신 이연건 교수님 감사합니다. 무엇보다도 저의 심사위원을 맡아 저의 부족함을 채워주셨던 진준하 박사님, 장시영 박사님께 진심을 담아 감사 드립니다.

화학적 지식, 실험의 방향 등을 제시해주시고 많이 가르쳐 주신 한충훈 박사님께 진심을 담아 감사 드립니다.

대학원 생활 2년간 몸담아 있던 RI 실험실의 선배님과 대학원 동기, 후배들에게도 감사합니다. 특히 RI 실험실은 훌륭하신 지도교수님과 멋진 실험실 선배, 후배들, 그리고 많은 지식을 제공해준 곳이며 언제부터인가 내 집 같은 애정이 있는 곳이 되었습니다. 저를 받아주신 박재우 교수님께 다시 한번 감사 드립니다.

동기이며 같은 고향 친구인 종근이, 동기였던 승신이형, 내 대학생활을 항상 같이했던 상웅이, 항상 내가 심심하면 같이 놀아주던 주원이와 원식이, 저의 힘이 되어주시던 영준이형과 바로형, 우연이형, 우중이형, 항상 말이 많던 승현이와 민규, 함께 실험과 토론을 많이 했던 영규와 정민이, 나를 잘 따라주던 연현이, 공부 열심히 하는 우석이, 실험실 분위기를 띄워주던 지원이, 실험을

같이 했던 정환이, 그리고 재미있는 후배인 민경이와 민희, 항상 에너지공학과 학생을 위해 힘써주시는 박경호 조교선생님, 모용현 조교선생님 모두 감사합니다.

끝으로 든든하게 항상 제 뒤를 봐주시고 믿어주신 아버지, 어머니 정말 감사합니다. 바쁘다는 이유로 자주 찾아 뵙지도 못하고 연락도 자주 못 드리고 죄송한 마음뿐이지만 성공해서 멋진 장남으로 돌아가겠습니다. 나에게 항상 투정부리지만 나를 사랑해주고 따라준 내 동생 철우야 고맙다.

제가 알고 있는 모든 분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 모든 일들이 항상 잘 되길 바라는 마음으로 이 논문을 드립니다.

