



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](#)

이학석사 학위논문

부산, 경남지역 환경시료의  
전베타 방사능 농도



2015년 8월

부경대학교 대학원

물리학과

류지승

이학석사 학위논문

부산, 경남지역 환경시료의  
전베타 방사능 농도

지도교수 서 효 진

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2015년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

류 지 승

류지승의 이학석사 학위논문을 인준함.

2015년 8월 21일



주 심 이학박사 도시홍 인

위 원 이학박사 김무준 인

위 원 이학박사 서효진 인

# <목 차>

1. 서론	1
2. 이론	2
2.1. $\beta$ 붕괴	2
2.2. 방사성 핵종	3
2.2.1. 자연방사성 핵종	3
2.2.2. 인공방사성 핵종	11
2.3. 저준위 $\alpha/\beta$ 계수기	14
2.3.1. 비례계수기	14
2.3.2. 특성 및 측정원리	16
2.3.3. 교정	19
2.3.3.1. 평탄영역(plateau region)설정	19
2.3.3.2. ROI(Region of interest)설정	19
2.3.3.3. Background설정	20
2.3.3.4. 계측효율설정	20
2.4. 방사능 농도와 최소 검출 방사능(MDA)계산	23
2.4.1. 방사능 농도	23
2.4.2. 최소 검출 방사능(MDA)	24
3. 실험 및 측정	26
3.1. 시료 채취	26
3.1.1. 해수	26
3.1.2. 강수	28
3.2. 전처리 방법	31
3.2.1. 해수	31

3.2.2. 강수 .....	31
3.3. 측정방법 .....	33
4. 결과 및 논의 .....	34
4.1. 해 수 .....	34
4.2. 강 수 .....	46
4.2.1. 강수량과 전베타 방사능 농도와의 관계 .....	46
4.2.2. 강수량과 전베타 방사능 농도의 상관분석 .....	57
4.2.3. 건고물 양과 전베타 방사능 농도와의 관계 .....	58
5. 결 론 .....	59
6. 참고문헌 .....	60



## <표 목 차>

표 2.1 $\beta$ 붕괴식 .....	3
표 2.2 붕괴계열 중 $\beta$ 선 방출 핵종 .....	9
표 2.3 붕괴계열을 이루지 않는 방사성 핵종 .....	10
표 2.4 우주선 기원 방사성 핵종 .....	11
표 2.6 핵분열 생성물 .....	12
표 2.7 방사화 생성물 .....	13
표 3.1 해수 채취지점 좌표 .....	28
표 3.2 강수 채취지점 좌표 .....	30
표 4.1 해수의 전베타 방사능 농도 (2012년) .....	35
표 4.2 해수의 전베타 방사능 농도 (2013년) .....	36
표 4.3 해수의 전베타 방사능 농도 (2014년) .....	37
표 4.4 강수의 전베타 방사능 농도 (2012년) .....	47
표 4.5 강수의 전베타 방사능 농도 (2013년) .....	50
표 4.6 강수의 전베타 방사능 농도 (2014년) .....	53
표 4.7 강수량과 전베타 방사능 농도간의 상관계수 .....	57

# 〈그림 목 차〉

그림 2.1 $^{238}\text{U}$ 의 우라늄 계열( $4n+2$ ) 붕괴도 .....	4
그림 2.2 $^{235}\text{U}$ 의 악티늄 계열( $4n+3$ ) 붕괴도 .....	5
그림 2.3 $^{232}\text{Th}$ 의 토륨 계열( $4n+0$ ) 붕괴도 .....	6
그림 2.4 $^{241}\text{Pu}$ 의 넵투늄 계열( $4n+1$ ) 붕괴도 .....	7
그림 2.5 원통형 계수관 .....	14
그림 2.6 인가전압과 포집된 전자 수와의 관계 .....	15
그림 2.7 저준위 알파, 베타 계수기의 구성도 .....	17
그림 2.8 ROI 설정 .....	20
그림 2.9 효율보정곡선 .....	22
그림 3.1 해수 시료 채취지점 (#1배수구~#4배수구, #3,4취수구) .....	26
그림 3.2 해수 시료 채취지점 (신고리 1~4배수구, 신고리 3,4취수구) .....	27
그림 3.3 해수 시료 채취지점 (미포, 송정) .....	27
그림 3.4 강수채집기 .....	29
그림 3.5 강수 채취지점(신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소) .....	29
그림 3.6 강수 채취지점 (부산대) .....	30
그림 3.7 해수와 강수의 실험과정 .....	32
그림 4.1 월별 해수 전베타 방사능 농도 (2012년, #3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C), 신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리3,4배수구 (N3,4B), 송정(SJ)) .....	38
그림 4.2 월별 해수 전베타 방사능 농도 (2012년, #1배수구(#1B), #2 배수구(#2B), #3배수구(#3B), #4배수구(#4B)) .....	39
그림 4.3 월별 해수 전베타 방사능 농도 (2013년, #3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C), 신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리3,4배수구	

(N3,4B), 송정(SJ))	40
그림 4.4 월별 해수 전베타 방사능 농도 (2013년, #1배수구(#1B), #2배수구(#2B), #3배수구(#3B), #4배수구(#4B))	41
그림 4.5 월별 해수 전베타 방사능 농도 (2014년, #3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C), 신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리3,4배수구(N3,4B), 미포(MP))	42
그림 4.6 월별 해수 전베타 방사능 농도 (2014년, #1배수구(#1B), #2배수구(#2B), #3배수구(#3B), #4배수구(#4B))	43
그림 4.7 연평균 해수 전베타 방사능 농도 (#3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C), 신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리3,4배수구(N3,4B), 송정(SJ))	44
그림 4.8 월별 해수 전베타 방사능 농도 (#1배수구(#1B), #2배수구(#2B), #3배수구(#3B), #4배수구(#4B))	45
그림 4.9 강수 전베타 방사능 농도 (2012년, 신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)	48
그림 4.10 부산지역 매월 평균 강수량 (2012년)	49
그림 4.11 강수 전베타 방사능 농도 (2013년, 신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)	51
그림 4.12 부산지역 매월 평균 강수량 (2013년)	52
그림 4.13 강수 전베타 방사능 농도 (2014년, 신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)	54
그림 4.13 부산지역 매월 평균 강수량 (2014년)	55
그림 4.15 연평균 강수 전베타 방사능 농도 (신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)	56
그림 4.16 건고물 양에 따른 전베타 방사능 농도	58

# Gross beta radioactive concentration of environmental samples in Busan and Gyeongnam

Ryu Jiseung

Department of Physics, Graduate School  
Pukyong National University

## Abstract

Gross beta radioactive concentration was detected for environmental samples in Busan and Gyeongnam. This is for the purpose of environmental inspection and to monitor the radioactive concentration exposed to radiation by nuclear generation and to evaluate the exposure dose to the resident in the area around the Gori nuclear plants. The measurements were performed by low background alpha/beta counting system. The samples were the sea water and river water collected in Busan and Gyeongnam area from January 2012 and December 2014. The sea water was collected at 9 points and the river water at 4 points. The data are compared to those at Busan National University for the river water and at Songjung for the sea water. The radioactivity concentrations of the sea water are estimated to be in the range of 8.07~13.4 Bq/L which are similar to the annual average value ranged from 9.97 to 11.1 Bq/L, while those of river water are in the range

from MDA (less than 0.00758 Bq/L) to 0.229 Bq/L which shows no deviation from the annual average values in the range of 0.0389~0.0811 Bq/L. In case of river water, it was confirmed that the gross beta radioactivity concentrations are in strongly correlated with the rainfall graph in which the concentrations are high in winter and low in summer with less and much rainfall, respectively.



# 1. 서론

자연 및 인공방사성 핵종의 대부분은 베타선을 방출한다.<sup>[1]</sup> 전베타 방사능 측정은 시료로부터 방출되는 베타선을 에너지 구분 없이 측정하여 시료중의 방사능 농도를 나타낸다.<sup>[2]</sup> 전베타 방사능의 측정값에 영향을 주는 인자로는 시료의 베타선 방출비율, 베타선 스펙트럼의 연속성, 교정선원의 선택, 측정기의 종류와 그 특성, 시료의 자기흡수 등이다.

환경방사능 측정목적은 방사성 물질이 환경에 노출되었을 때 방사능 농도를 측정, 감시하고 방사선 방호대책을 마련하며 주민들의 피폭선량을 평가하기 위해서이다. 환경방사능 측정 중 전베타 방사능 측정은 핵종 분석을 위한 측정을 할 것인가를 판단하거나 원자력법령 등에 규정된 피폭선량을 초과했는지를 판단하는 자료로 이용하기 위해 실시한다. 또한 전베타 방사능 측정은 다른 방사능 측정법보다 전처리 방법이 간단하고 신속하게 측정 할 수 있어 방사능 존재여부를 빠르게 판단할 수 있는 장점을 가지고 있다.<sup>[1,3]</sup>

본 연구에서는 2012년 1월부터 2014년 12월까지 부산, 경남지역 해수 및 강수를 채집하여 전베타 방사능 농도를 측정, 조사하였다. 해수는 총 9개 지점, 강수는 총 4개 지점의 시료를 채취하였고, 강수는 부산대학교를 해수는 송정을 비교지점으로 하였다. 채취한 시료는 여과, 증발농축, 충전, 건고의 전처리 방법을 사용하여 저준위 알파/베타 계수기로 계측하였다.

측정 자료를 분석하고 계절에 따른 강수량 및 시료의 건고물 양과 전베타 방사능 농도와의 상관관계를 조사하였다. 또한 본 실험에서 얻은 결과는 평상시 환경방사능 준위와 시간과 공간에 따른 변동 경향 및 방사성 동위원소 사용시설의 사고발생시 환경으로 누출된 환경방사능 농도를 판별하는 기준자료로 활용하려고 한다.

## 2. 이론

### 2.1. $\beta$ 붕괴

$\beta$  붕괴는 핵에서  $\beta^-$ (음전자) 또는  $\beta^+$ (양전자)가 방출되거나 전자포획(electron capture)에 의해 다른 핵종으로 변환되는 현상을 의미한다.  $\beta$  붕괴식을 표 2.1에 나타내었다.

$\beta^-$  붕괴는 중성자가 과잉인 불안정한 핵에서 주로 발생하는데 중성자가 양성자로 붕괴하면서  $\beta^-$  입자와 반중성미자(antineutrino)를 방출하는 것이다. 붕괴에너지는  $\beta^-$  입자와 반중성미자가 임의로 나누어 가짐으로 연속스펙트럼 분포를 보인다.  $\beta^-$  붕괴시 원자번호가 1증가하나 질량수는 변하지 않는다.

$\beta^+$  붕괴는 양성자가 과잉인 불안정한 핵에서 주로 발생하는데 양성자가 중성자로 붕괴하면서  $\beta^+$  입자와 중성미자(neutrino)를 방출하는 것이다. 붕괴에너지는  $\beta^+$  입자와 중성미자가 임의로 나누어 가짐으로 연속스펙트럼 분포를 보인다.  $\beta^+$  붕괴시 원자번호가 1감소하나 질량수는 변하지 않는다.

전자포획은 양성자가 과잉일 때 발생하며 원자핵 외의 궤도전자를 포획하여 안정한 원자핵으로 변하는 것을 말한다. 주로 K각의 전자를 포획하여 중성미자를 방출한다. 전자가 빠져나간 자리에 외각의 전자가 채우는 과정에서 특성X선 또는 오제전자가 방출 될 수 있다. 전자포획시 원자번호는 1감소하나 질량수는 변하지 않는다.<sup>[4,18]</sup>

표 2.1  $\beta$  붕괴식

$\beta^-$ 붕괴	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$
$\beta^+$ 붕괴	$p \rightarrow n + e^+ + \nu$
전자포획	$p + e^- \rightarrow n + \nu$

## 2.2. 방사성 핵종

### 2.2.1. 자연방사성 핵종

자연방사성 핵종은 붕괴 계열을 이루는 핵종과 붕괴계열을 이루지 않는 핵종, 우주선에 의해 자연적으로 생성되는 방사성 핵종으로 분류 할 수 있다. 그림 2.1~2.4는 붕괴계열을 이루는  $^{238}\text{U}$ 의 우라늄계열( $4n+2$ ),  $^{235}\text{U}$ 의 악티늄계열( $4n+3$ ),  $^{232}\text{Th}$ 의 토륨계열( $4n+0$ ),  $^{241}\text{Pu}$ 의 넵투늄계열( $4n+1$ )의 붕괴도를 나타내었다. 이 중 넵투늄계열은 반감기가 짧으므로 오랜 시간이 지나면서  $^{209}\text{Bi}$ 만이 존재한다. 나머지 3가지 계열들은 그림에서와 같이 알파붕괴와 베타붕괴를 반복하며 안정원소인 납(Pb)으로 변한다.<sup>[4-6]</sup>

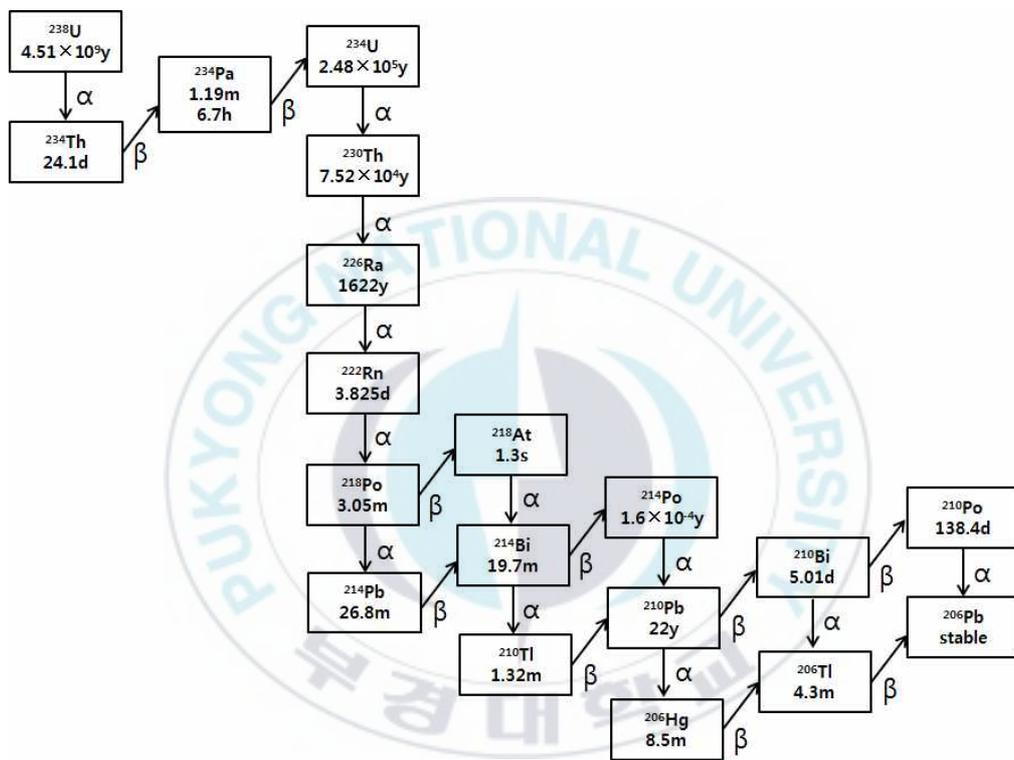


그림 2.1  $^{238}\text{U}$ 의 우라늄 계열( $4n+2$ ) 붕괴도

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s)로 표기하였다.

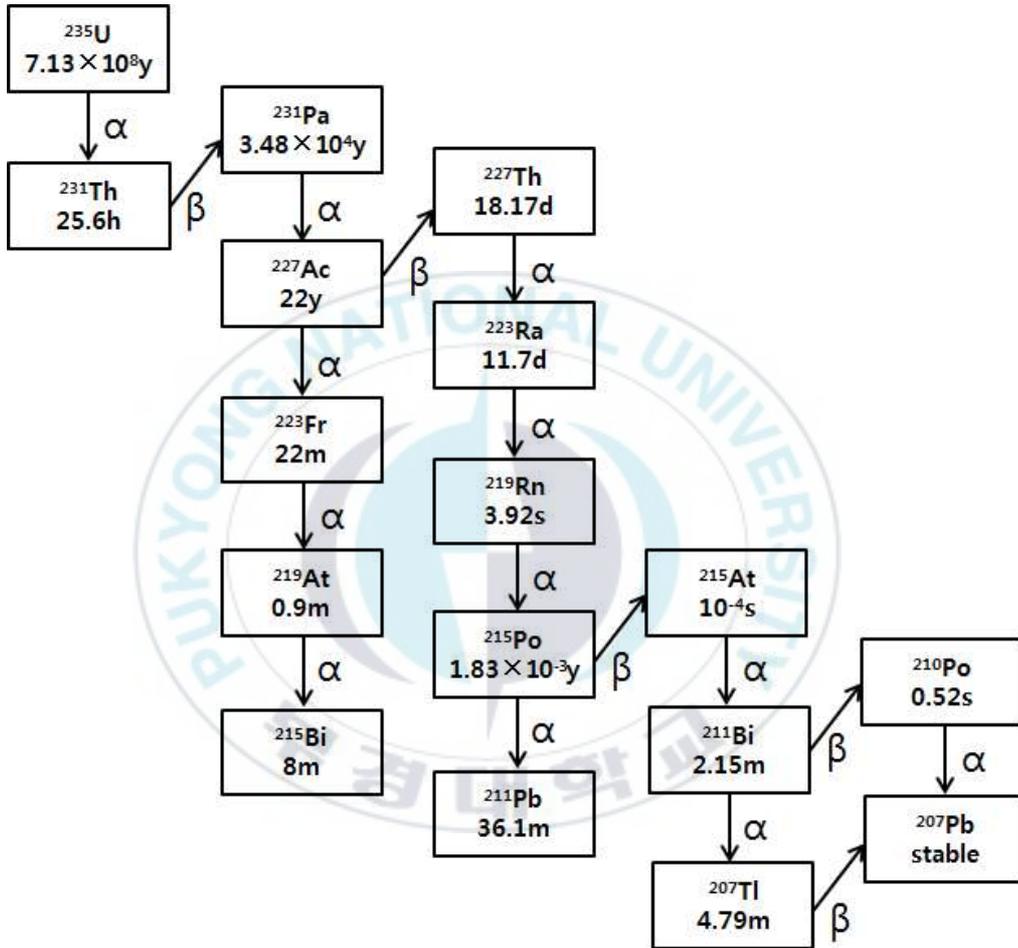


그림 2.2  $^{235}\text{U}$ 의 악티늄 계열(4n+3) 붕괴도

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s)로 표기하였다.

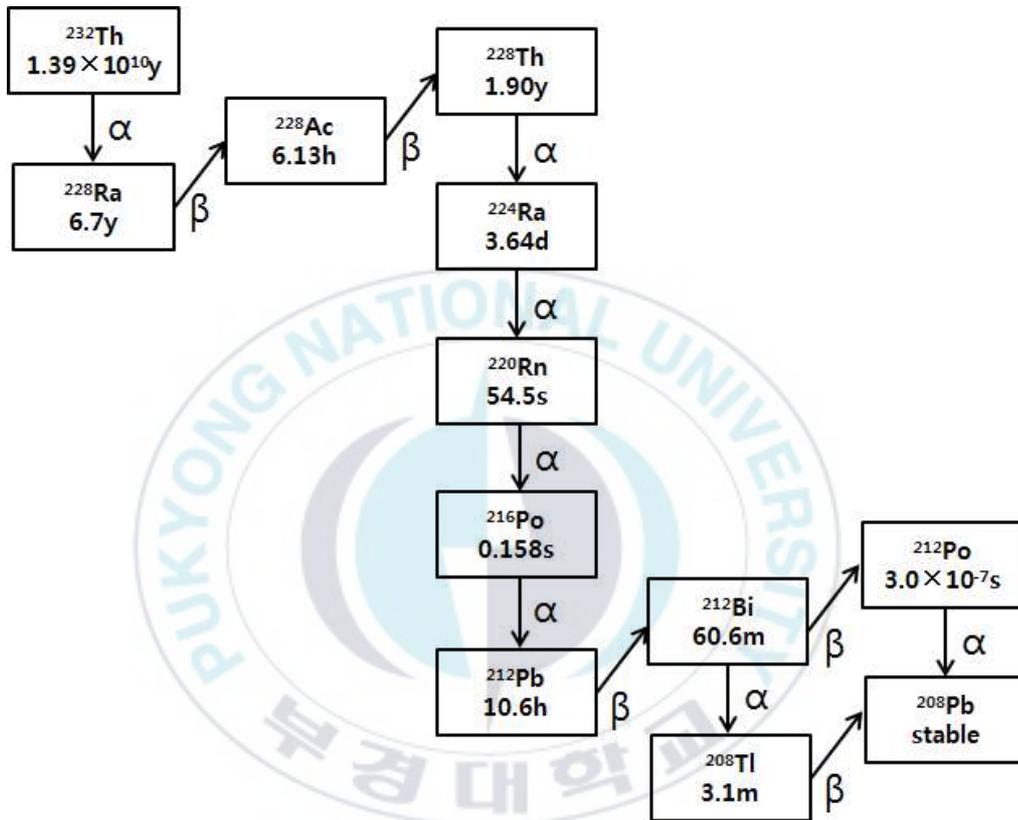


그림 2.3  $^{232}\text{Th}$ 의 토륨 계열( $4n+0$ ) 붕괴도

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s)로 표기하였다.

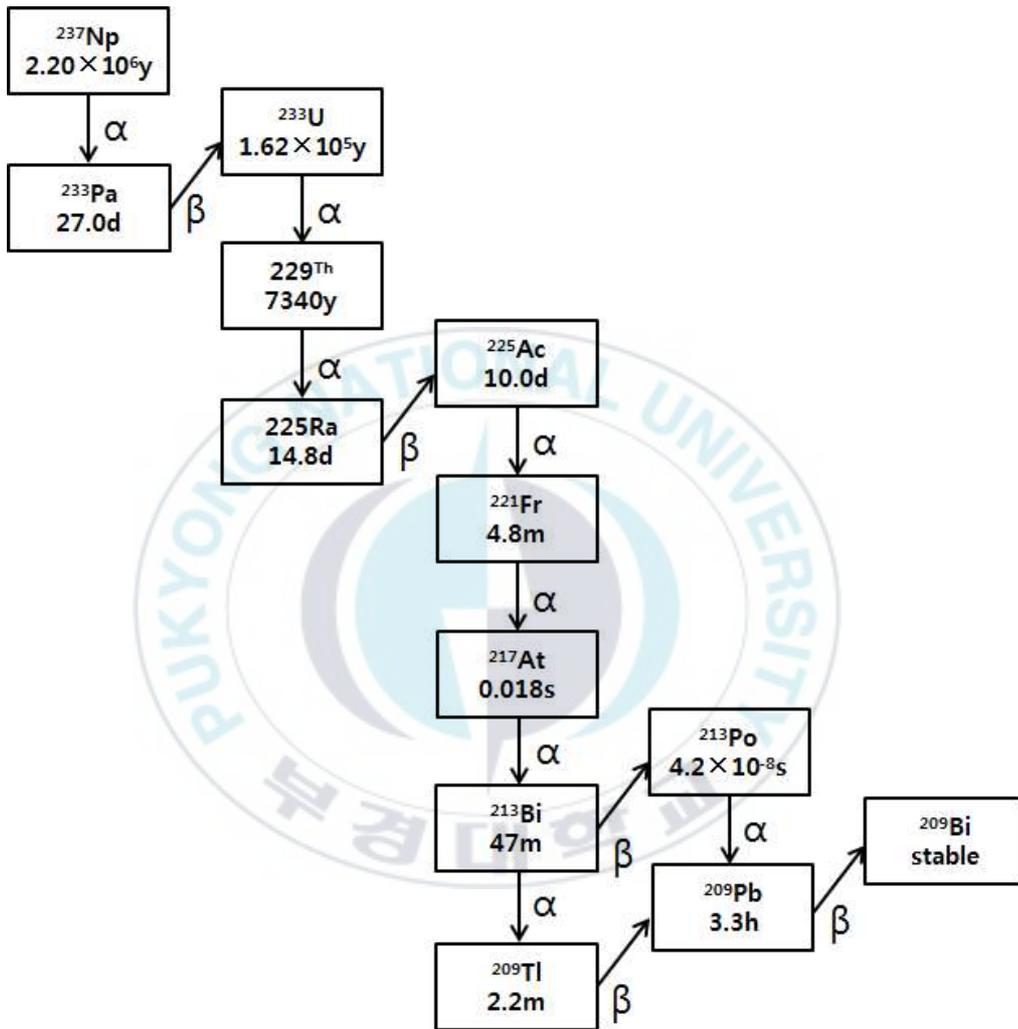


그림 2.4  $^{241}\text{Pu}$ 의 넵투늄 계열( $4n+1$ ) 붕괴도

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s)로 표기하였다.

표 2.2는 우라늄계열, 악티늄계열 및 토륨계열에서  $\beta$  붕괴하는 핵종과 반감기를 나타낸다. 표 2.2에서 보는 바와 같이 대부분의  $\beta$  붕괴 핵종들의 반감기는 24시간 이하이다. 가장 짧은 반감기를 가진 핵종은  $^{215}\text{Po}$ 으로 반감기는  $1.83 \times 10^{-3}$ 초이고, 가장 긴 반감기를 가진 핵종은  $^{210}\text{Pb}$ 와  $^{227}\text{Ac}$ 으로 22년의 반감기를 가진다. 그러므로 대부분의 자연방사성 핵종으로 인한 전  $\beta$  값은 약 72시간이면 background 수준으로 감쇠한다.

붕괴계열을 이루지 않는 핵종을 표 2.3에 나타내었다. 이 핵종들은 원자번호가 납보다 작으며 대부분 긴 반감기를 가지고 있다. 반감기가 길지만 붕괴해서 나오는 방사선의 에너지가 매우 작아서 검출하기는 어렵다.

우주선에 의해 생성되는 방사성 핵종을 표 2.4에 나타내었다. 고에너지를 가진 우주선이 대기권으로 입사해 들어와 1차 우주선이 되고 1차 우주선이 다시 대기 중의 물질과 작용하면서 2차 우주선이 생성됨으로서 방사성 핵종이 만들어진다.<sup>[4,6,18]</sup>

표 2.2 붕괴계열 중  $\beta$ 선방출 핵종

	핵종	반감기		핵종	반감기	
$^{238}\text{U}$ 의 우라늄 계열	$^{234}\text{Th}$	24.1d	$^{235}\text{U}$ 의 악티늄 계열	$^{215}\text{Po}$	$1.83 \times 10^{-3}\text{s}$	
	$^{234}\text{Pa}$	1.18m		$^{211}\text{Bi}$	2.15m	
		6.7h		$^{207}\text{Tl}$	4.79m	
	$^{218}\text{Po}$	3.05m	$^{232}\text{Th}$ 의 토륨 계열	$^{228}\text{Ra}$	6.7y	
	$^{214}\text{Pb}$	26.8m		$^{228}\text{Ac}$	6.13h	
	$^{214}\text{Bi}$	19.7m		$^{212}\text{Pb}$	10.6h	
	$^{210}\text{Tl}$	1.32m		$^{212}\text{Bi}$	66.6m	
	$^{210}\text{Pb}$	22y		$^{208}\text{Tl}$	3.1m	
	$^{210}\text{Bi}$	5.01d		$^{233}\text{Pa}$	27.0d	
	$^{206}\text{Hg}$	8.5m		$^{225}\text{Ra}$	14.0d	
	$^{206}\text{Tl}$	4.3m		$^{241}\text{P}$ 의 넵투늄 계열	$^{213}\text{Bi}$	47m
	$^{231}\text{Th}$	25.6h			$^{209}\text{Tl}$	2.2m
$^{227}\text{Ac}$	22.0y	$^{209}\text{Pb}$			3.3h	

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s)로 표기하였다.

표 2.3 붕괴계열을 이루지 않는 방사성 핵종

방사성 핵종	존재비 (%)	반감기 (yr)	붕괴양식
$^{40}\text{K}$	0.0117	$1.28 \times 10^9$	EC(10.67%), $\beta^-$ (89.33%)
$^{87}\text{Rb}$	27.835	$4.8 \times 10^{10}$	$\beta^-$
$^{113}\text{Cd}$	12.22	$9.0 \times 10^{15}$	$\beta^-$
$^{115}\text{In}$	95.7	$4.4 \times 10^{14}$	$\beta^-$
$^{138}\text{La}$	0.089	$1.06 \times 10^{11}$	EC(33.8%), $\beta^-$ (66.2%)
$^{142}\text{Ce}$	11.08	$>5.0 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{144}\text{Nd}$	23.80	$2.4 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{147}\text{Sm}$	15.0	$1.06 \times 10^{11}$	$\alpha$
$^{148}\text{Sm}$	11.3	$7.0 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{152}\text{Gd}$	0.20	$1.1 \times 10^{14}$	$\alpha$
$^{174}\text{Hf}$	0.162	$2.0 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{176}\text{Lu}$	2.61	$3.78 \times 10^{10}$	$\beta^-$
$^{186}\text{Os}$	1.58	$2.0 \times 10^{15}$	$\alpha$
$^{187}\text{Re}$	62.60	$5.0 \times 10^{10}$	$\beta^-$
$^{190}\text{Pt}$	<0.02	$6.0 \times 10^{11}$	$\alpha$

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s), 전자포획(EC)로 표기하였다.

표 2.4 우주선 기원 방사성 핵종

핵종	반감기	핵종	반감기
$^3\text{H}$	12.3y	$^{32}\text{P}$	14.3d
$^7\text{Be}$	53d	$^{33}\text{P}$	25.3d
$^{10}\text{Be}$	$2.5 \times 10^6\text{y}$	$^{35}\text{S}$	87.5d
$^{14}\text{C}$	5,730y	$^{38}\text{S}$	2.9h
$^{22}\text{Na}$	2.6y	$^{34\text{m}}\text{Cl}$	32m
$^{24}\text{Na}$	15h	$^{36}\text{Cl}$	$3.1 \times 10^5\text{y}$
$^{28}\text{Mg}$	21.2h	$^{37}\text{Cl}$	37.3m
$^{26}\text{Al}$	$7.4 \times 10^5\text{y}$	$^{38}\text{Cl}$	55.5m
$^{31}\text{Si}$	2.62h	$^{39}\text{Ar}$	270y
$^{32}\text{Si}$	170y	$^{81}\text{Kr}$	$2.1 \times 10^5\text{y}$

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s)로 표기하였다.

### 2.2.2. 인공방사성 핵종

인위적인 핵반응 뿐만 아니라 핵폭발 실험이나 원자력 시설의 가동에 의해서도 인공방사성 핵종이 생성된다. 환경에 존재하는 인공방사성 핵종은 1945년 대기권 핵폭발 실험이 성공하면서부터 1950년 후반과 1960년대 초에 걸쳐 실시된 대기권 핵폭발 실험, 1986년 체르노빌 원전사고, 2011년 후쿠시마 원전사고 등에 의해 수송, 확산되어 침적되거나, 강수와 함께 지표에 침적된다.<sup>[7]</sup> 표 2.6과 2.7은 핵분열 및 방사화 생성물의 반감기와 붕괴양식을 나타내었다.

표 2.6 핵분열 생성물

핵종	반감기	붕괴양식	핵종	반감기	붕괴양식
$^{98}\text{Sr}$	50.5d	$\beta^-$	$^{129\text{m}}\text{Te}$	33.6d	$\beta^-, \gamma$
$^{90}\text{Sr}$	28.7y	$\beta^-$	$^{131}\text{I}$	8.021d	$\beta^-, \gamma$
$^{90}\text{Y}$	64.1h	$\beta^-$	$^{132}\text{Te}$	76.856h	$\beta^-, \gamma$
$^{95}\text{Zr}$	64.09d	$\beta^-, \gamma$	$^{132}\text{I}$	2.3h	$\beta^-, \gamma$
$^{95}\text{Nb}$	35.0d	$\beta^-, \gamma$	$^{137}\text{Cs}$	30.0y	$\beta^-, \gamma$
$^{99}\text{Mo}$	2.747d	$\beta^-, \gamma$	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2.55m	$\beta^-, \gamma$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.006h	$\beta^-, \gamma$	$^{140}\text{Ba}$	12.751d	$\beta^-, \gamma$
$^{103}\text{Ru}$	39.272d	$\beta^-, \gamma$	$^{140}\text{La}$	1.6779d	$\beta^-, \gamma$
$^{103\text{m}}\text{Rh}$	56.12m	$\beta^-, \gamma$	$^{144}\text{Ce}$	284.45d	$\beta^-, \gamma$
$^{106}\text{Ru}$	372.6d	$\beta^-, \gamma$	$^{144}\text{Pr}$	17.28d	$\beta^-, \gamma$
$^{106}\text{Rh}$	29.92s	$\beta^-, \gamma$			

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s)로 표기하였다.

표 2.7 방사화 생성물

핵종	반감기	붕괴양식	핵종	반감기	붕괴양식
$^3\text{H}$	12.35y	$\beta^-$	$^{239}\text{Np}$	2.355d	$\beta^-, \gamma$
$^{14}\text{C}$	5730y	$\beta^-$	$^{241}\text{Pu}$	14.35y	$\beta^-$
$^{55}\text{Fe}$	2.75y	EC	$^{241}\text{Am}$	432.0y	$\alpha, \gamma$
$^{59}\text{Fe}$	44.53d	$\beta^-, \gamma$	$^{242}\text{Cm}$	162.94d	$\alpha$
$^{54}\text{Mn}$	312.5d	EC, $\gamma$	$^{238}\text{Pu}$	87.7y	$\alpha$
$^{60}\text{Co}$	5.27d	$\beta^-, \gamma$	$^{239}\text{Pu}$	$2.411 \times 10^4\text{y}$	$\alpha$
$^{65}\text{Zn}$	243.9d	EC, $\gamma$	$^{240}\text{Pu}$	$6.563 \times 10^3\text{y}$	$\alpha$
$^{134}\text{Cs}$	754.2d	$\beta^-, \gamma$	$^{242}\text{Pu}$	$3.735 \times 10^5\text{y}$	$\alpha$

반감기는 년(y), 일(d), 시(h), 분(m), 초(s), 전자포획(EC)로 표기하였다.

여기서 환경방사능 감시에 중요한  $\beta$  핵종은  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^3\text{H}$  및  $^{14}\text{C}$ 이다.  $^3\text{H}$ 는 반감기가 12.3년이고 일반적인 물과 동일하게 무색, 무취이다. 산소와 반응하여 물의 형태로 존재하는 경우가 대부분이고 가스 상태로도 존재가 가능하다. 상층 대기권에서 우주방사선이 공기 중의 질소와 반응하여 발생하거나 원자로에서  $^6\text{Li}$ 와 중성자의 핵반응에 의해서 생성된다. 또한 핵실험 과정에서도 발생할 수 있다.  $^{14}\text{C}$ 는 반감기가 5730년이고 이산화탄소, 일산화탄소 등 기체 상태로 존재 가능하고 상층 대기권에서 우주선과 공기

중의 질소와 반응하여 발생한다. 또한 원자로에서 질소, 탄소, 산소 혼합물과 중성자의 핵반응에 의해서 생성되거나 핵실험 과정에서도 발생한다.  $^{90}\text{Sr}$ 은 반감기가 27.7년이고 핵분열 생성물에서 분리되거나 핵실험 과정에서 발생한다. 이와 같이 각각 우주선과 상호작용하여 생성되기도 하지만 원자력발전소 가동으로 생성되는 양에 비해 아주 작다.

## 2.3. 저준위 $\alpha/\beta$ 계수기

### 2.3.1. 비례계수기

기체 전리를 이용한 검출기는 전리방사선이 기체층을 통과할 때 직접적, 간접적으로 기체의 분자와 원자를 전리시켜 양이온과 전자의 이온쌍이 생성된다. 형성된 이온쌍은 그림 2.5에서처럼 정전기장에 의한 인력에 의해 분리되고 전자는 (+)의 중심선 쪽으로 양이온은 (-)인 원통형 벽으로 모이게 된다.<sup>[8]</sup>

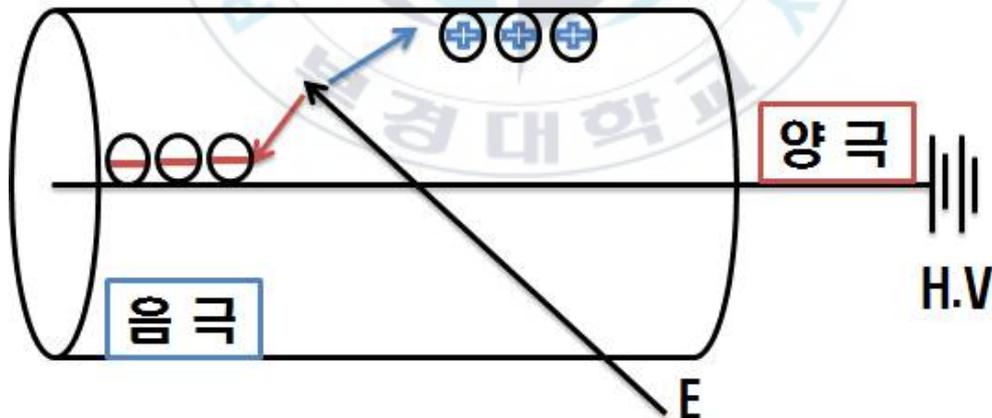
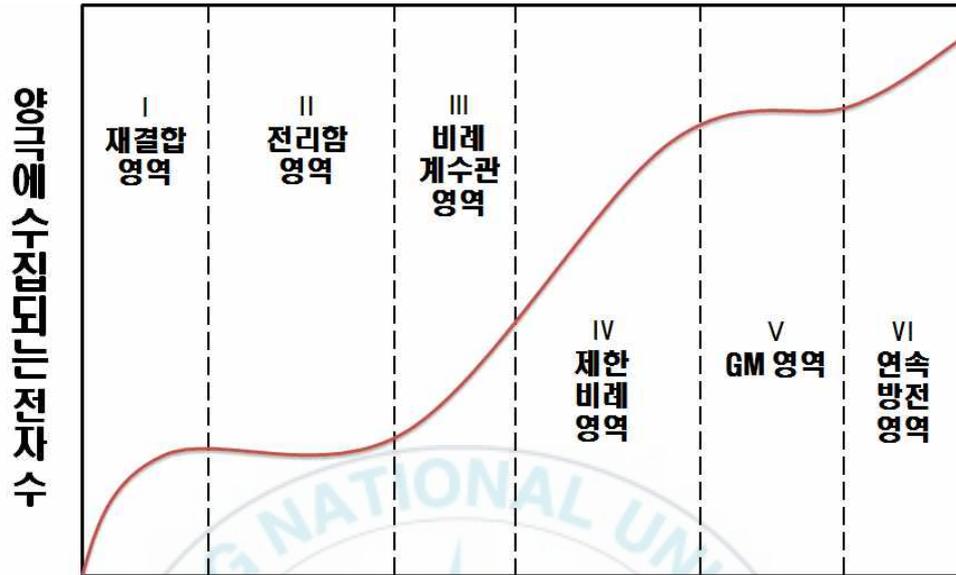


그림 2.5 원통형 계수관



## 인가전압(V)

그림 2.6 인가전압과 포집된 전자 수와의 관계

인가전압과 수집되는 전자의 개수와의 관계를 조사해보면 그림 2.6에서와 같이 6개의 영역으로 구분할 수 있다.

제 1영역은 재결합영역으로 방사선이 만든 이온과 전자는 무질서한 열운동에 의해 확산되고 그로 인해 이온과 전자가 재결합하여 중성인 기체분자가 된다. 이 영역에서 전압이 높아지면 특정한 방향으로 속력이 커지고 재결합 확률이 감소한다. 전압과 펄스는 비례하나 검출기로는 사용하지 않는다.

제 2영역은 전리함영역으로 인가전압이 높아져 재결합 현상이 소멸되며 일차적으로 발생된 전자와 이온들이 전부 전극으로 모인다. 전압이 더 오르더라도 수집전하의 수는 일정하게 유지되기 때문에 전리조는 검출기로 이용 가능하다.

제 3영역은 비례계수관영역으로 외부전압이 커지면 전자, 이온쌍의 운동 에너지도 커진다. 방사선이 만든 전자의 속력이 커지면 이 전자가 추가로 중성인 기체 분자를 전리 시킬 수 있다. 즉 기체에서 증식과정의 연쇄전리가 일어나는데 이 현상을 전자사태라고 한다. 전자사태는 양극에 수집되는 전자의 수를 증가시키는데 신호의 크기가 방사선이 만든 초기 이온쌍의 수에 비례한다.

제 4영역은 제한비례영역으로 가스증폭이 전압에 비례하지 않아 검출기로 사용하지 않는다. 양이온의 이동은 전자에 비해 아주 느려 전자는 양극에 이미 도달하지만 양이온은 여전히 이동하게 된다. 이 이온들이 전기장을 추가로 생성하게 되고 추가된 전기장이 검출기 내의 전기적 특성을 변화시키고 이것이 수집이온과 초기 이온 사이의 비례성을 떨어뜨리게 된다.

제 5영역은 GM(Geiger-Muller)영역으로 양극주변 모든 영역에서 기체 증폭이 발생하며 생성되는 초기 이온쌍의 수에 관계없이 동일한 출력 펄스가 생성된다. 그래서 에너지 측정이 불가능하고 방사선의 수를 세는데 이용한다.

제 6영역은 연속방전영역으로 입사선의 유무에 관계없이 방전이 연속해서 일어나고 일정한 펄스가 되어 방사선 검출에는 사용하지 못한다.<sup>[9]</sup>

### 2.3.2. 특성 및 측정원리

저준위 알파/베타 계수기는 시료검출기(sample detector), 보조검출기(guard detector), 증폭기, 역동시회로 등으로 구성되어 있으며 그림 2.7과 같다.

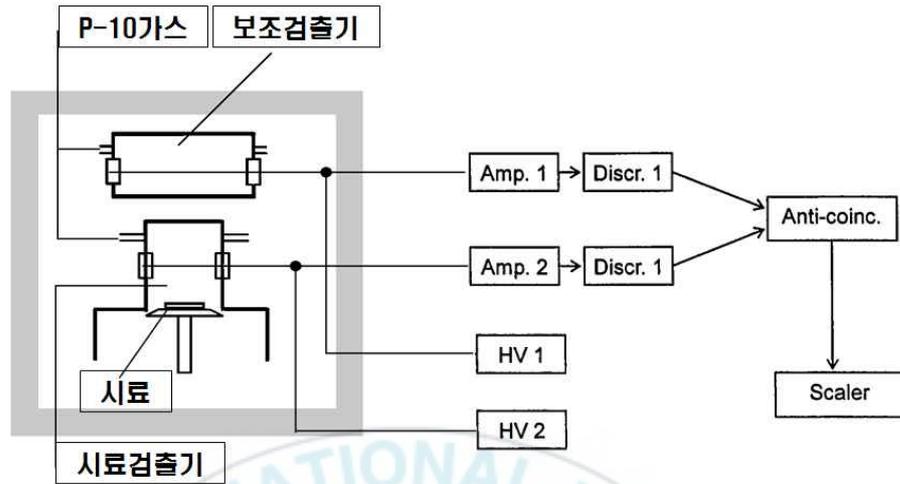


그림 2.7 저준위 알파, 베타 계수기의 구성도

시료검출기는 시료에서 나오는 베타선을 검출하는 검출기로 검출기 내부에 기체를 채우기 위해서 윈도우(window)가 설치되어 있다. 윈도우 아래에 시료를 놓았을 때, 붕괴된 알파, 베타선의 일부가 검출기내로 입사하고 윈도우의 두께를 매우 얇게 하여 알파, 베타선이 윈도우에 자기흡수 되는 것을 무시할 수 있도록 만든다. 하전 입자에 의해 검출기 내의 기체 입자가 이온화되고 이온화된 입자는 애노드(anode)에 인가된 전압에 의해서 생성된 전기장에서 가속되고 기체 증폭이 일어난다. 검출기 내의 기체는 보통 P-10가스를 사용하게 되는데 P-10가스는 Ar(90%)+CH<sub>4</sub>(10%)로 구성되며 순수한 메탄을 사용하는 것보다 기체이득이 높고 인가전압이 낮아도 동작한다는 장점에서 사용한다.<sup>[9,15]</sup>

보조검출기는 1.6 mm두께의 직육면체 알루미늄 판으로 되어있고 P-10기체를 밀봉하고 있다. 고에너지 감마선이나 우주선을 검출하는 역할을 하

며 보조검출기 내의 전기장은 알루미늄 판과 평행한 애노드선 사이에 형성되며 균일한 전기장을 유지하도록 4개의 애노드선이 들어있다.

이와 같이 외부 감마선이나 우주선과 같은 영향을 줄이기 위해 납차폐와 역동시계수회로를 사용하는데 10 cm 두께의 납 블록을 시료검출기와 보조검출기를 에워싸고 있어 대부분의 감마선을 차폐할 수 있다. 그러나 에너지가 매우 큰 우주선의 경우 납 블록을 통과하여 검출기까지 도달할 수 있는데 이때 알파, 베타 입자를 구별하기 위한 신호처리회로로 시료검출기와 보조검출기가 동시에 입력된 신호에 대해서는 계수하지 않는 시스템이 역동시계수회로이다. 이는 감마선이나 우주선의 간섭 없이 시료만의 알파, 베타선을 검출하기 위함이다.

시료검출기의 중요한 성질 중 하나는 알파입자와 베타입자를 구별할 수 있는 특성을 가진다는 것이다. 파괴분석기에 의한 알파와 베타선의 분리는 알파입자는 베타입자보다 평균 40배 이상의 증폭기 출력신호를 가지기 때문이다. 즉 알파입자가 100 V의 출력신호를 낸다면 베타입자는 2.5 V의 출력신호를 낸다. 따라서 2.5 V와 100 V사이의 어떤 수를 정하여 그 수의 이하가 되면 베타선으로 그 수 이상이 되면 알파선으로 계수하면 된다. 이를 ROI(Region of interest)라 한다. 베타방출 핵종 선원을 이용하여 최적의 ROI를 결정해야 하며 베타선은 연속스펙트럼을 가지므로 베타방출 핵종은 평균에너지와 최대에너지에 의해 정해진다.

검출기체는 알파, 베타선이 지나갈 때 항상 이온화는 되지만, 수집된 전하량은 입사된 알파, 베타선의 에너지에 직접적으로 비례하지는 않는다. 그래서 비례계수관은 분광분석에는 사용하지 않으며 대부분 에너지와 관계 없이 감지할 수 있는 전알파, 전베타 측정에 가장 적합하다.<sup>[8,14]</sup>

### 2.3.3. 교 정

#### 2.3.3.1. 평탄영역(plateau region)설정

Plateau curve는 인가전압 변화에 따른 cpm(count per minute)의 변화를 그래프로 그린다. 시스템은 자동적으로 high voltage가 증가하면서 계수를 반복하고 그래프로 그리며 1600 V가 될 때까지 자동적으로 수행하도록 프로그램화 되어있다. 평탄영역 측정은  $\alpha, \beta$  표준선원을 이용하여 각각 측정한다. 알파표준선원은  $^{241}\text{Am}$ , 베타표준선원은  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 을 사용하였다.<sup>[9]</sup>

#### 2.3.3.2. ROI(Region of interest)설정

알파, 베타를 동시에 측정한다면 최적의 ROI설정과 spillover를 검사해야 한다. 순서는 System Alpha/Beta Amplifier Setup을 선택하고 방법은 Manual로 선택한다. 베타방출선원( $^{90}\text{Sr}$ )를 기기에 장착하고 device와 group을 선택하고 Start Count button을 클릭한다. 약 30,000 counts가 측정되면 Halt counter button을 누르고 %Spillover를 확인한다. 3.5 %보다 크면 BUL과 ALL을 동시에 올리고 3.5 %보다 작으면 동시에 내린다. Resume count button을 누르고 다시 약 30,000 counts가 측정되면 Halt counter button을 누르고 %Spillover를 확인한다. %Spillover가 3.5 % (3.3 %~3.7 % 범위 안에 있으면 된다)가 되도록 위 작업을 반복한다. 이제 BUL은 고정된 상태에서 ALL을 약 15 %정도 위로 올리고 Resume count button을 누른다. 약 30,000 counts가 측정되면 Halt counter button을 누르고 %Spillover를 확인한다. 0.08보다 작으면 ALL을 내리고 크면 ALL을 올린다. %Spillover가 0.08 % (0.06 %~0.1 %)가 되도록 이 작업을 반복한다.

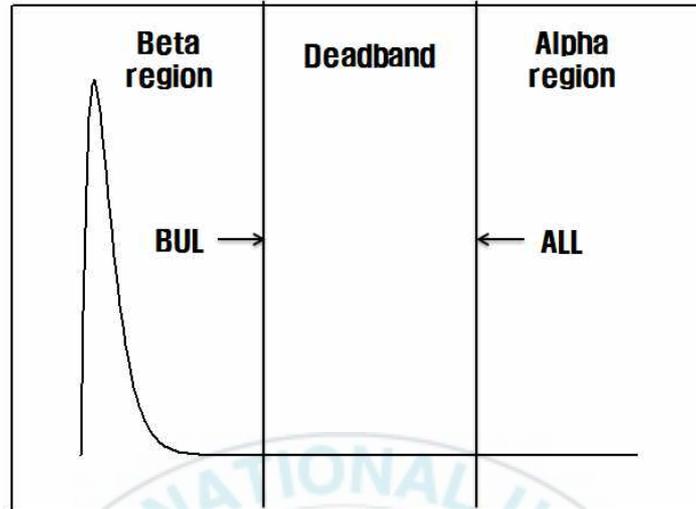


그림 2.8 ROI설정

#### 2.3.3.3. Background설정

환경시료에 미량으로 존재하는 방사선을 측정하기 위한 중요한 과정으로 가장 바람직한 것은 가능한 낮은 Background의 안전성을 확보하여 불확실성을 최소화 시키는 것이다. Background 측정 시에는 표준선원이나 다른 시료가 없는 상태로 실행해야 한다.<sup>[11]</sup>

#### 2.3.3.4. 계측효율 설정

핵종이 불명인 시료에 대한 방사능 절대치를 붕괴율(dps) 또는 Bq(베크렐)단위로 정확하게 구하는 것은 불가능하다. 그러나 시료 상호비교를 통한 검출기의 검출효율을 결정하는 일은 가능하기 때문에  $^{40}\text{K}$  방사능과 비교하는 방법을 사용하여 측정값을 교정한다.

염화칼륨(KCl)을 자기로 된 절구에 넣고 곱게 분쇄하여 고운체를 이용하여 분말상태의 KCl을 만든다. KCl 분말을 20 mg~1400 mg을 planchet 10개에 일정량 담는다. 소량의 아세톤을 가해 균일하게 분포하

도록 만든 후 원적외선조사기를 이용하여 서서히 건조시킨다. KCl표준시료의 방사능을 측정한다.

각각의 KCl표준시료의 중량에 대한 dpm을 계산한다.

$$N_k = 0.887 \times W \quad (1)$$

W : KCl의 중량(mg)

0.0887(dpm/mg) : KCl 1mg이 방출하는 베타선 방출율

각각의 KCl 표준시료를 알파/베타계수기로 측정한 계수율(cpm)로부터 효율을 계산한다.

$$Eff = \frac{(n_k - n_b)}{N_k} \times 100 \quad (2)$$

Eff : KCl 표준시료의 계측효율(%)

$n_k$  : KCl표준시료의 전계수율(cpm)

$n_b$  : Background 계수율 (cpm)

$N_k$  : KCl 표준시료의 방사능(dpm)

그림 2.9는 효율보정곡선과 보정식으로 효율보정곡선은 2차식으로 선택하고 수식의 자릿수를 12자리로 설정하여 유효숫자가 충분히 표시되도록 한다.

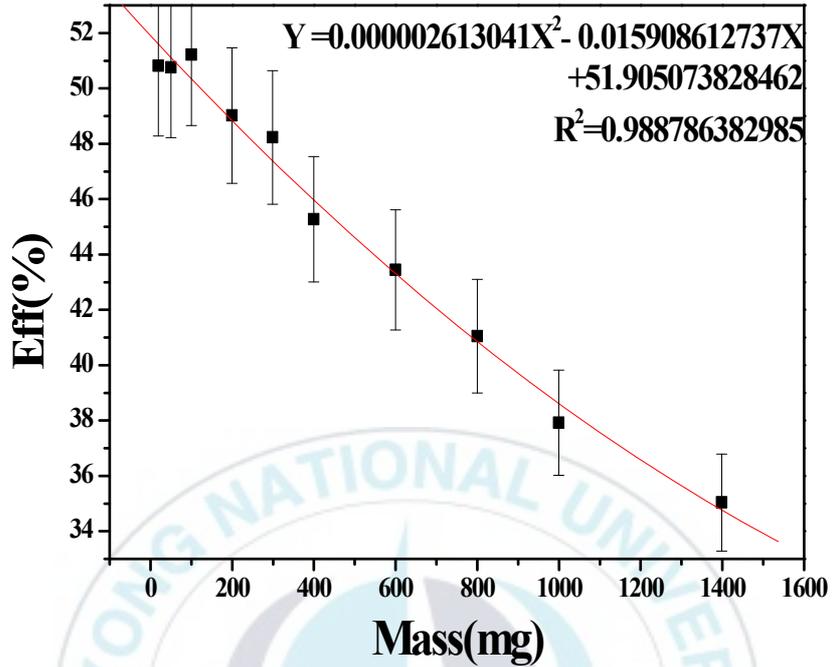


그림 2.9 효율보정곡선

효율보정곡선을 이용하여 시료 중 방사능 농도를 계산하는데 이용한다.<sup>[15]</sup>

$$y = 0.000002613041x^2 - 0.015908612737x + 51.905073828462 \quad (3)$$

x : KCl(mg) 또는 시료 건고물의 중량 (mg)

y : 효율

## 2.4. 방사능 농도와 최소 검출 방사능(MDA) 계산

### 2.4.1. 방사능 농도

방사선 계측은 성공확률이 매우 낮은 경우에 속한다. 즉 측정대상이 되는 붕괴가능한 방사성 핵의 수는 매우 많지만 측정기에 검출되는 방사선의 수는 상대적으로 매우 적어 성공확률  $P$ 가  $P \ll 1$ 이 되는 경우이다. 아래의 식은 Poisson 분포식을 나타낸 것이다.

$$P(x) = \frac{(Pn)^x e^{-Pn}}{x!} = \frac{(\bar{x})^x \cdot e^{-\bar{x}}}{x!} \quad (4)$$

Poisson 분포에서의 평균, 분산 및 표준편차는 이항분포의 평균, 분산 및 표준편차에서  $P \ll 1$ 인 특수한 경우로 다음과 같다.

$$\sum_{x=0}^n P(x) = 1 \quad (5)$$

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^n xP(x) = nP \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \sum_{x=0}^n (x - \bar{x})^2 P(x) = nP = \bar{x} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\bar{x}} \quad (8)$$

따라서 측정치와 오차는  $\bar{x} \pm \sigma = \bar{x} \pm \sqrt{\bar{x}}$  이고 실제계측에서 쉽게 얻을 수 있는 것은  $x$ 이다. 그러나 편의상  $x$ 와  $\bar{x}$ 는 거의 같으므로 한 번 계측하여  $x$ 라는 값을 얻었다면 측정치와 오차는  $x \pm \sqrt{x}$ 로 표현할 수 있다.

이를 계측기로 측정한 계수율로 표현하면  $n \pm \sqrt{n}$ 이 되고 시료의 계수율로부터 Background 계수율을 빼서 참계수율(net cpm) 및 표준편차를 다음 식으로 구한다.

$$n \pm \sqrt{n} = \left( \frac{n_s}{t_s} - \frac{n_b}{t_b} \right) \pm \sqrt{\frac{n_s}{t_s} + \frac{n_b}{t_b}} \quad (9)$$

n : 시료의 참계수율 (net cpm)

$\sqrt{n}$  : 표준편차

$n_s$  : 시료의 계수율 (cpm)

$t_s$  : 시료의 측정시간(분)

$n_b$  : Background계수율 (cpm)

$t_b$  : Background측정시간(분)

참계수율과 표준편차를 효율보정곡선 식에서 구한 효율을 적용하여 시료 중 방사능 농도를 Bq단위로 계산한다.

$$A = \frac{n \pm \sqrt{n}}{E \times V \times 60} \quad (10)$$

A : 전베타 방사능 농도 (Bq/L)

n : 시료의 참계수율 (net cpm)

$\sqrt{n}$  : 표준편차

E : 효율보정곡선에 시료의 양을 대입하여 구한 효율

V : 전베타 방사능 농도 계산에 사용된 시료량 (L/1000)

#### 2.4.2. 최소 검출 방사능(MDA)

방사선 계측 시스템은 환경 속에 존재하는 자연방사선과 함께 운용되므로 Background의 영향을 항상 받고 있다. 하지만 시료의 방사능이 미미할 경우 그 신호는 Background와 구분하기 어렵다. 실제로 얻은 계수가 Background와 구분될 수 있는 한계를 검출한계치(Low Limit of Detection : LLD)이라 부르고 이로부터 검출효율, 시료량, 측정시간 등을 반영하여 방사능으로 환산한 값을 최소검출방사능(Minimum Detectable

Activity : MDA)이라 부른다. 이를 사용하여 저준위 환경방사능 농도 측정시 방사능의 존재여부를 판단한다. 다음 식에 의해서 최소검출방사능을 계산한다.<sup>[12,13]</sup>

$$LD = \frac{k}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{k}{t_s}\right)^2 + 4 \cdot n_b \cdot \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \quad (11)$$

여기서 k는 95%신뢰도로 1.645이다.

$$MDA = \frac{LD}{(E \times V \times 60)} \quad (12)$$

전베타 방사능 농도의 분석결과가 Background에 의한 요동인지 아니면 방사능이 존재하는지 여부를 판단하는 근거로 MDA를 사용하는데 전베타 방사능 농도가 MDA보다 클 경우는 방사능 농도와 오차를 기록하고 방사능 농도가 MDA보다 작거나 방사능 농도가 오차의 3배보다 작으면 방사능이 검출되지 않은 것으로 판단하여 MDA미만(<MDA)으로 기록한다.

### 3. 실험 및 측정

#### 3.1. 시료 채취

##### 3.1.1. 해수

해수는 고리1~4호기 취,배수구 주변 5개 지점과 신고리 1~4호기 취, 배수구 주변 3개 지점 및 비교지점인 송정, 미포(2014년 1월부터 송정에서 미포로 변경됨)을 포함한 총 9개 지점에서 채취하였다. 각 배수구는 주기적으로 주1회, 나머지 지역은 월 1회를 주기로 채취하여 계측하였다. 그림 3.1~그림 3.3은 해수 시료채취 지점을 나타내고, 표 3.1은 해수채취 지점의 좌표이다.



그림 3.1 해수 시료 채취지점 (#1배수구~#4배수구, #3,4취수구)



그림 3.2 해수 시료 채취지점 (신고리 1~4배수구, 신고리 3.4취수구)



그림 3.3 해수 시료 채취지점 (미포, 송정)

표 3.1 해수 채취지점 좌표

채취지점	방위	거리 (km)	좌표	
			위도	경도
#1배수구 (배수구 앞 해상)	S	0.1	35° 19' 08"	129° 17' 24"
#2배수구 (배수구 앞 해상)	SE	0.3	35° 19' 08"	129° 17' 35"
#3배수구 (배수구 앞 해상)	SE	0.3	35° 19' 08"	129° 17' 37"
#4배수구 (배수구 앞 해상)	SE	0.6	35° 19' 07"	129° 17' 47"
#3,4취수구 (발전소 앞 해상)	E	1.1	35° 19' 18"	129° 18' 07"
신고리3,4취수구 (발전소 앞 해상)	NE	3.4	35° 20' 10"	129° 19' 20"
신고리1,2배수구 (발전소 앞 해상)	NE	2.7	35° 19' 50"	129° 18' 59"
신고리3,4배수구 (발전소 앞 해상)	NE	3.0	35° 19' 55"	129° 19' 09"
미포 (해운대구 중동)	SSW	21.2	35° 09' 25"	129° 10' 08"
송정(해운대구 송정동)	SSW	17.5	35° 10' 17"	129° 12' 14"

### 3.1.2. 강 수

강수는 그림 3.4과 같이 강수채집기를 그림3.5와 그림 3.6에 나타낸 4개의 강수채취지점 (신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)에 설치하고 1개월 동안 내린 강수 전량을 매월 말일에 주기적으로 채취하였다. 표 3.2는 강수 채취지점의 좌표이다.



그림 3.4 강수채집기

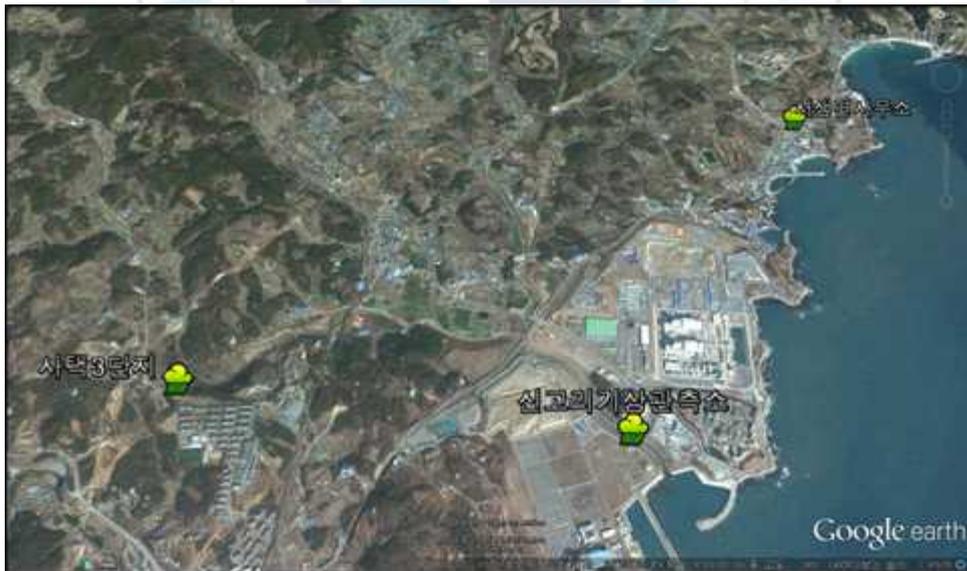


그림 3.5 강수 채취지점  
(신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소)



그림 3.6 강수 채취지점 (부산대)

표 3.2 강수 채취지점 좌표

채취지점	방위	거리 (km)	좌표	
			위도	경도
신고리기상관측소 (발전소 부지내)	NE	2.0	35° 19' 57"	129° 18' 19"
사택3단지 (기장군 장안읍 길천리)	NNW	2.4	35° 20' 26"	129° 16' 51"
서생면사무소 (울주군 서생면 신암리)	NE	4.7	35° 20' 60"	129° 19' 36"
부산대 (부산시 금정구 장전동)	WSW	21.7	35° 14' 07"	129° 04' 27"

## 3.2. 전처리 방법

### 3.2.1. 해 수

Planchet을 각 지점별로 1개씩 준비한 후 전자저울을 이용하여 빈 planchet의 무게를 측정하고 planchet의 뒷면과 전처리 일지에 채취시간, 채취지점, 무게를 기록한다. Planchet을 hot plate에 올려놓고 마이크로 피펫을 이용하여 2 mL씩 분취하여 총 5회(10 mL)을 넣은 후 건조시킨다. 여기서 주의 해야 할 점은 포립이 겨우 일어날 정도의 온도로 가열하는 것이다 이는 건조 직전에 시료가 끓어 외부로 튀거나 부풀어 오르는 경우를 방지하기 위해서 이다.

마지막으로 증류수를 이용하여 planchet 면에 시료가 균일하게 퍼지도록 몇 방울씩 낙하시켜 적외선 등으로 완전히 건조시킨다. Planchet과 적외선등과의 거리는 시료의 적절한 건조와 화재위험을 방지하기 위해 20 cm정도 유지하도록 한다. 이렇게 만들어진 방사능 측정시료를 전자저울로 중량을 제어 원시료 무게를 계산하여 전처리 일지에 기록한다. 측정시료를 측정시까지 desicator에 넣어 보관한다.

### 3.2.2. 강수

채취한 강수를 골고루 혼합한 후 500 mL를 비커에 옮긴다. Aspirator와 GF/C여과지를 사용하여 부유물을 걸러낸다. 비커를 hot plate에 올린 후 시료가 고착되는 것을 방지하기 위해 질산 1~2방울을 넣어준 후 5~10 mL가 될 때까지 가열한다. 해수와 마찬가지로 planchet을 각 지점별로 한 개씩 준비하고 전자저울을 이용하여 빈planchet의 무게를 측정하고 planchet뒷면과 전처리 일지에 채취시간, 채취지점, 무게를 기록한다.

농축된 시료를 피펫을 이용하여 planchet에 균일하게 퍼지도록 1~2방울씩 낙하시킨다. Planchet과 적외선등과의 거리는 화재위험을 방지하기

위해 20 cm정도 유지하도록 한다. 또한 비커를 소량의 증류수를 사용하여 벽면에 남겨진 시료를 planchet으로 옮겨 완전 건조시킨다. 이렇게 만들어진 방사능 측정시료를 전자저울로 중량을 제어 원시료 무게를 계산하여 전처리 일지에 기록한다. 측정시료를 측정 시까지 desicator에 넣어 보관한다.

그림 3.7은 전체적인 실험과정을 보여준다. 해수는 세 번째 그림인 시료 충전부터 시작해서 계측까지 실행하고 강수는 첫 번째 그림인 시료 여과부터 시작하여 계측까지 실행한다.

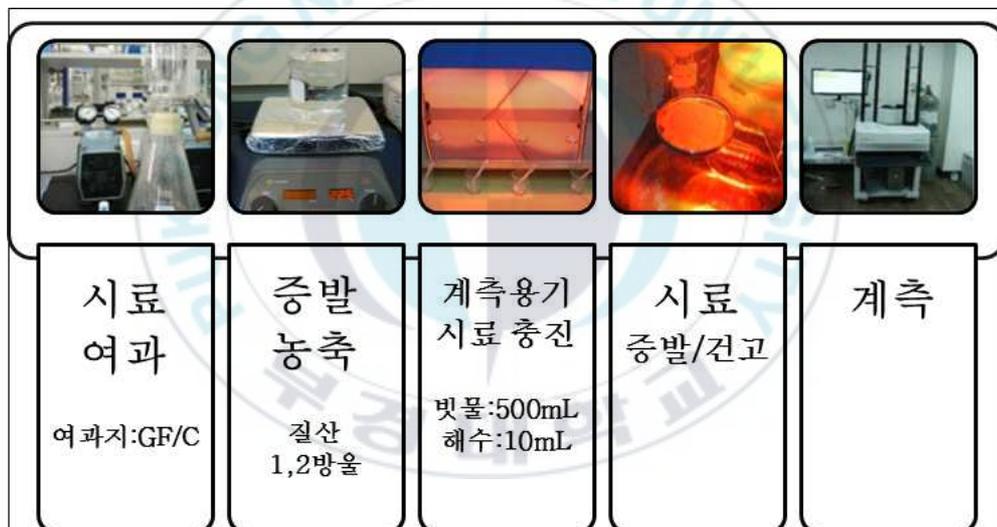


그림 3.7 해수와 강수의 실험과정

### 3.3. 측정방법

CANBERRA형 저준위 알파/베타계수기에 P-10가스를  $10 \pm 1$  psi 정도로 흐르게 하고 Eclipses를 실행시킨다.

Toolbar에서 PM Icon을 Click 하거나 Manager에서 Procedure를 Click 한다. Unknown procedure을 선택 후, 다음을 Click한다. New버튼을 Click한 후 Procedure의 이름을 입력하고 OK를 Click 한다. Is Active를 체크하고 Count Mode의 Simultaneous를 선택한다. ROI(Region of Interest)는 최근 교정된 값을 선택하고 Count Time을 30분으로 선택한다. Sample Count Delay는 사용하지 않음으로 하고 Sample 반복횟수는 10회로 한다. Sample Activity는 표준선원의 아이디 (Alpha :  $^{241}\text{Am}$ , Beta:  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ )를 입력한다. Geometry Selection은 1/8 " Stainless Steel 을 선택하고 모든 입력이 완료되면 Save를 누른 후 마침을 누른다.

Stack에 Group Carrier을 올리고 그 위로 시료의 수와 순서에 맞게 Number Carrier을 올린 후 End Carrier을 마지막에 올려놓는다.

Toolbar에서 Go버튼을 Click하고 전에 미리 설정해 두었던 Procedure을 선택한다. Device는 S5XLB, Group은 올려두었던 해당 Carrier에 맞는 Group을 선택한다. OK버튼을 Click하면 측정이 시작된다.

## 4. 결과 및 논의

### 4.1. 해 수

표 4.1~표 4.3은 2012년 1월부터 2014년 12월까지 3년간 총 9개의 지점(#1~4배수구, #3,4취수구, 신고리1,2배수구, 신고리3,4배수구, 송정, 미포)에서 채취한 해수의 월별 전베타 방사능 농도이다. 표 4.1 ~ 표 4.3을 그림으로 나타내면 그림 4.1~그림 4.6과 같다.

해수의 측정결과 최솟값은 2014년 7월 #1배수구에서  $8.07 \pm 0.65$  Bq/L이고 최대값은 2014년 2월 신고리 3,4취수구에서  $13.4 \pm 0.7$  Bq/L로 조사되었다.

지점별로 연평균을 계산하여 그림 4.7과 그림 4.8에 나타내었고, 그림 4.7과 그림 4.8에서 보는 바와 같이 해수의 연평균 방사능 농도가 9.97 Bq/L~11.1 Bq/L 사이의 값으로 3년간 거의 일정하였다. 2013년 송정이 9.97 Bq/L로 최솟값을 가지고 2012년 #1배수구, #2배수구가 11.1 Bq/L로 최댓값을 가진다.

표 4.1 해수의 전베타 방사능 농도 (2012년)

[Bq/L]

지점	#1배수구	#2배수구	#3배수구	#4배수구	#3,4 취수구	신고리 3,4취수구	신고리 1,2배수구	신고리 3,4배수구	송정
1월	10.7±0.6	12.5±0.7	11.3±0.6	11.4±0.6	10.7±0.6	11.4±0.6	11.6±0.6	11.9±0.7	11.1±0.6
2월	11.8±0.6	11.6±0.6	11.1±0.6	12.2±0.7	11.2±0.6	12.5±0.7	10.7±0.6	11.8±0.6	10.9±0.6
3월	11.8±0.6	10.7±0.6	10.7±0.6	11.9±0.6	11.9±0.6	11.3±0.6	10.4±0.6	11.2±0.6	8.91±0.55
4월	10.3±0.6	11.9±0.6	10.5±0.6	11.4±0.6	9.76±0.58	11.4±0.6	8.10±0.52	10.4±0.6	13.1±0.6
5월	12.0±0.6	11.2±0.6	12.0±0.6	10.9±0.6	12.4±0.6	10.5±0.6	10.8±0.6	11.7±0.6	11.4±0.6
6월	9.97±0.61	10.7±0.6	9.29±0.58	9.22±0.62	11.5±0.7	9.68±0.63	9.77±0.61	11.1±0.7	10.6±0.6
7월	11.7±0.7	11.2±0.6	9.96±0.64	9.68±0.60	10.6±0.6	10.0±0.6	12.0±0.7	10.1±0.6	11.8±0.7
8월	11.0±0.6	10.4±0.6	11.3±0.6	11.0±0.6	9.99±0.59	10.5±0.6	9.03±0.56	10.5±0.6	10.4±0.6
9월	11.1±0.6	10.7±0.6	11.4±0.6	10.7±0.6	11.5±0.6	11.2±0.6	10.8±0.6	11.5±0.6	11.4±0.6
10월	10.6±0.6	10.2±0.6	11.3±0.6	10.6±0.6	12.0±0.6	11.7±0.6	11.0±0.6	10.5±0.6	9.70±0.54
11월	10.7±0.6	10.6±0.6	10.3±0.6	11.5±0.6	9.57±0.55	9.90±0.56	9.97±0.56	10.4±0.6	9.65±0.55
12월	11.6±0.6	11.5±0.6	10.2±0.6	10.6±0.6	10.5±0.6	10.8±0.6	10.5±0.6	11.5±0.6	11.0±0.6

표 4.2 해수의 전베타 방사능 농도 (2013년)

[Bq/L]

지점	#1배수구	#2배수구	#3배수구	#4배수구	#3,4 취수구	신고리 3,4취수구	신고리 1,2배수구	신고리 3,4배수구	송정
1월	10.1 ±0.6	10.9 ±0.6	11.3 ±0.6	9.83 ±0.56	10.7 ±0.6	11.7 ±0.6	11.3 ±0.6	11.3 ±0.6	11.1 ±0.6
2월	10.7 ±0.6	11.0 ±0.6	10.5 ±0.6	11.2 ±0.6	11.1 ±0.6	9.99 ±0.58	10.5 ±0.6	10.5 ±0.6	11.8 ±0.6
3월	9.87±0.58	10.1 ±0.6	10.6 ±0.6	11.5 ±0.6	10.3 ±0.6	11.0 ±0.6	8.88±0.58	9.87±0.60	9.75±0.59
4월	9.67±0.61	9.12±0.60	10.2±0.6	10.0±0.6	10.5±0.6	11.3±0.6	10.4±0.6	12.4±0.6	10.6±0.6
5월	11.1±0.6	10.6±0.6	10.5±0.6	11.2±0.6	11.0±0.6	10.5±0.6	10.7±0.6	9.28±0.56	10.4±0.6
6월	10.6±0.6	9.33±0.57	10.7±0.6	10.5±0.6	10.8±0.6	10.5±0.6	10.4±0.6	9.56±0.58	10.4±0.6
7월	11.6±0.6	11.5±0.6	11.2±0.6	10.8±0.6	10.8±0.6	9.30±0.58	11.0±0.6	10.1±0.6	8.90±0.57
8월	9.20±0.60	9.97±0.59	10.6±0.6	9.07±0.57	10.2±0.6	9.45±0.57	10.2±0.6	9.39±0.57	8.96±0.56
9월	9.40±0.60	9.99±0.61	9.21±0.59	9.74±0.60	9.30±0.58	9.32±0.58	9.73±0.59	9.60±0.59	8.78±0.57
10월	9.09±0.59	9.09±0.59	9.88±0.60	9.95±0.61	10.2±0.6	9.91±0.61	10.3±0.6	10.0±0.6	9.06±0.62
11월	10.1±0.6	9.59±0.61	10.7±0.6	9.21±0.61	10.5±0.6	9.70±0.58	10.3±0.6	10.3±0.6	10.2±0.6
12월	10.3±0.6	10.8±0.6	9.07±0.56	11.5±0.6	11.3±0.6	11.0±0.6	11.6±0.6	9.24±0.56	9.72±0.60

표 4.3 해수의 전베타 방사능 농도 (2014년)

[Bq/L]

지점	#1배수구	#2배수구	#3배수구	#4배수구	#3,4 취수구	신고리 3,4취수구	신고리 1,2배수구	신고리 3,4배수구	미포
1월	10.3±0.6	10.1±0.6	10.3±0.6	11.1±0.6	11.2±0.7	11.3±0.6	10.9±0.6	10.7±0.7	11.2±0.6
2월	10.3±0.6	9.58±0.62	10.5±0.7	11.1±0.8	11.4±0.7	13.4±0.7	11.1±0.7	11.6±0.7	13.3±0.7
3월	11.1±0.7	11.3±0.7	11.9±0.7	10.6±0.6	10.4±0.6	10.8±0.6	10.3±0.7	10.1±0.6	11.5±0.6
4월	10.7±0.4	11.3±0.5	10.6±0.5	11.8±0.5	10.7±0.4	11.0±0.4	11.0±0.5	9.98±0.46	10.8±0.5
5월	11.7±0.7	11.8±0.8	11.9±0.7	11.3±0.7	11.9±0.8	10.4±0.7	10.5±0.7	10.9±0.8	10.7±0.7
6월	10.6±0.7	10.0±0.7	9.75±0.73	9.53±0.69	11.2±0.7	10.6±0.7	10.7±0.7	10.9±0.9	10.6±0.7
7월	8.07±0.65	8.59±0.66	10.2±0.7	10.3±0.7	10.2±0.7	11.5±0.7	10.4±0.7	11.0±0.7	10.6±0.7
8월	9.45±0.69	10.5±0.7	9.82±0.71	10.0±0.7	10.2±0.7	10.8±0.7	9.89±0.72	9.30±0.70	9.18±0.70
9월	10.1±0.7	9.64±0.71	9.63±0.71	9.67±0.71	10.1±0.8	10.5±0.8	10.9±0.7	11.0±1.1	12.2±0.8
10월	9.79±0.70	10.1±0.7	10.1±0.7	9.00±0.68	9.20±0.67	9.47±0.68	10.6±0.7	9.77±0.76	9.37±0.71
11월	10.9±0.7	10.4±0.7	11.5±0.7	11.1±0.8	9.91±0.72	10.8±0.7	10.8±0.7	9.96±0.72	10.4±0.7
12월	10.9±0.7	10.8±0.7	11.8±0.7	10.7±0.7	10.7±0.7	10.8±0.7	10.2±0.7	10.6±0.8	10.9±0.7

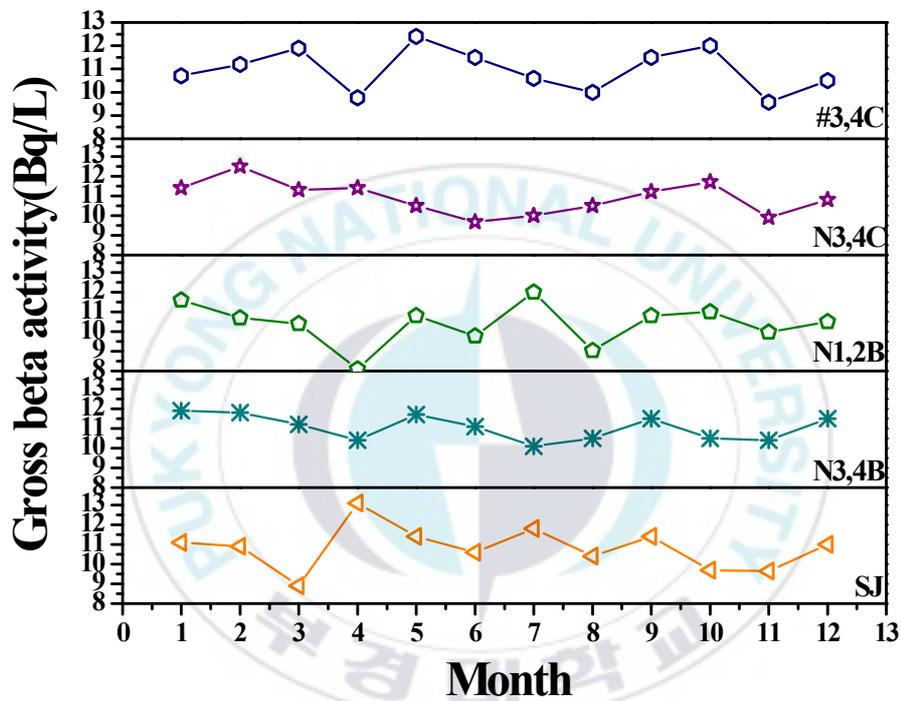


그림 4.1 월별 해수 전베타 방사능 농도

(2012년, #3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C),  
 신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리3,4배수구(N3,4B), 송정(SJ))

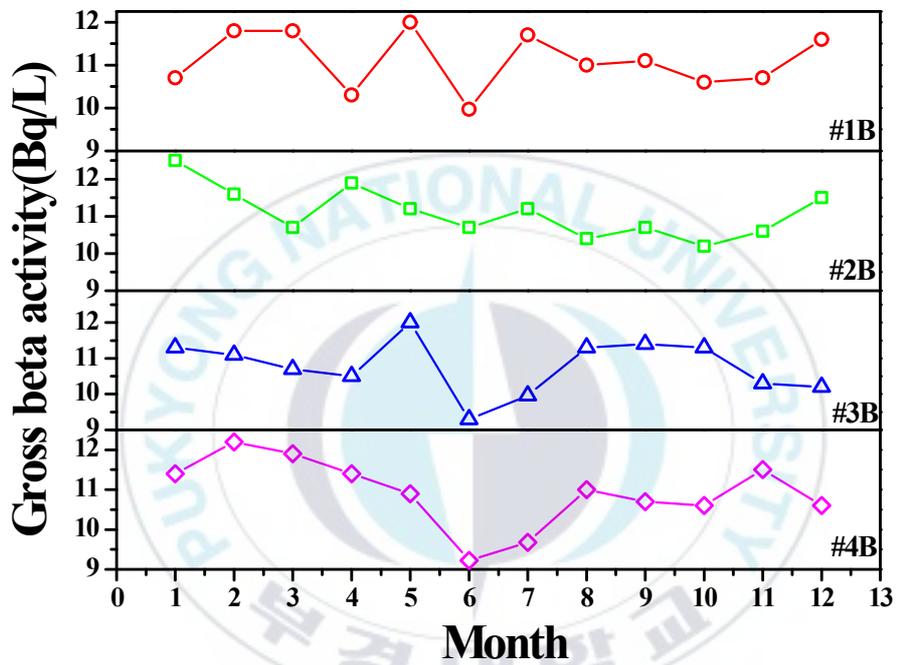


그림 4.2 월별 해수 전베타 방사능 농도  
 (2012년, #1배수구(#1B), #2배수구(#2B),  
 #3배수구(#3B), #4배수구(#4B))

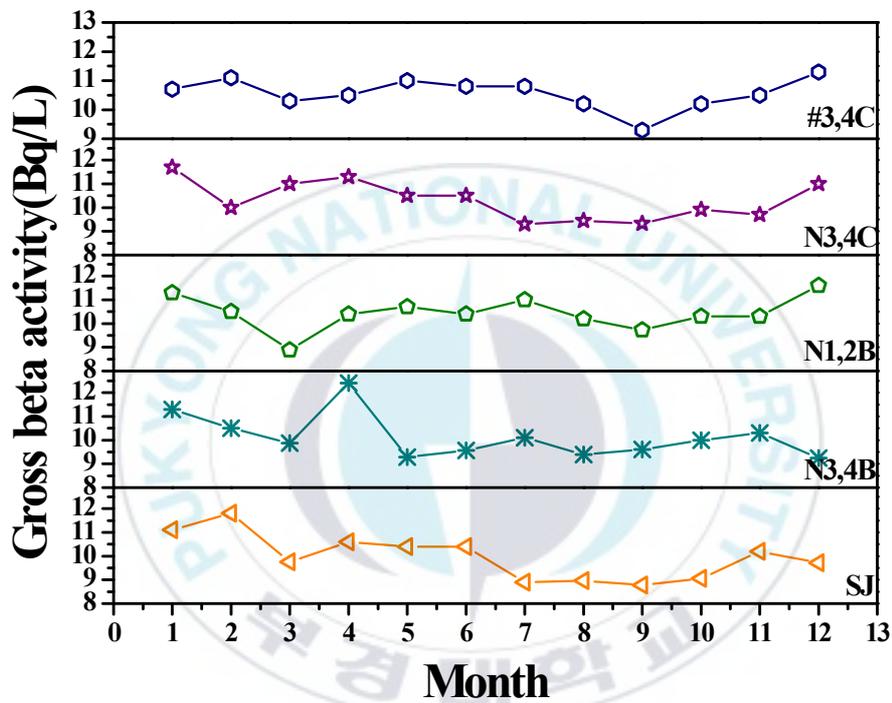


그림 4.3 월별 해수 전베타 방사능 농도

(2013년, #3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C),  
 신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리3,4배수구(N3,4B), 송정(SJ))

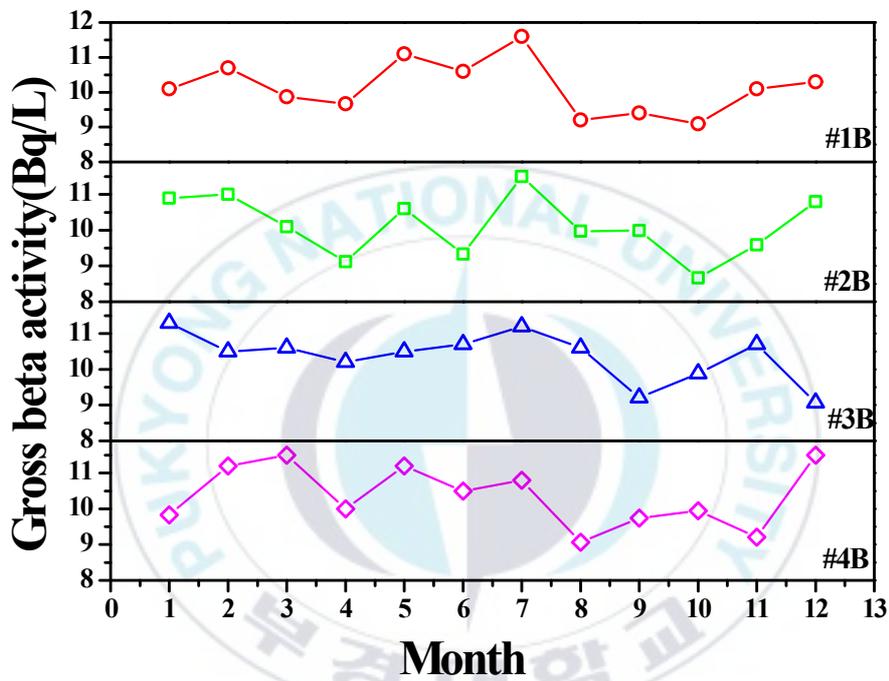


그림 4.4 월별 해수 전베타 방사능 농도  
 (2013년, #1배수구(#1B), #2배수구(#2B),  
 #3배수구(#3B), #4배수구(#4B))

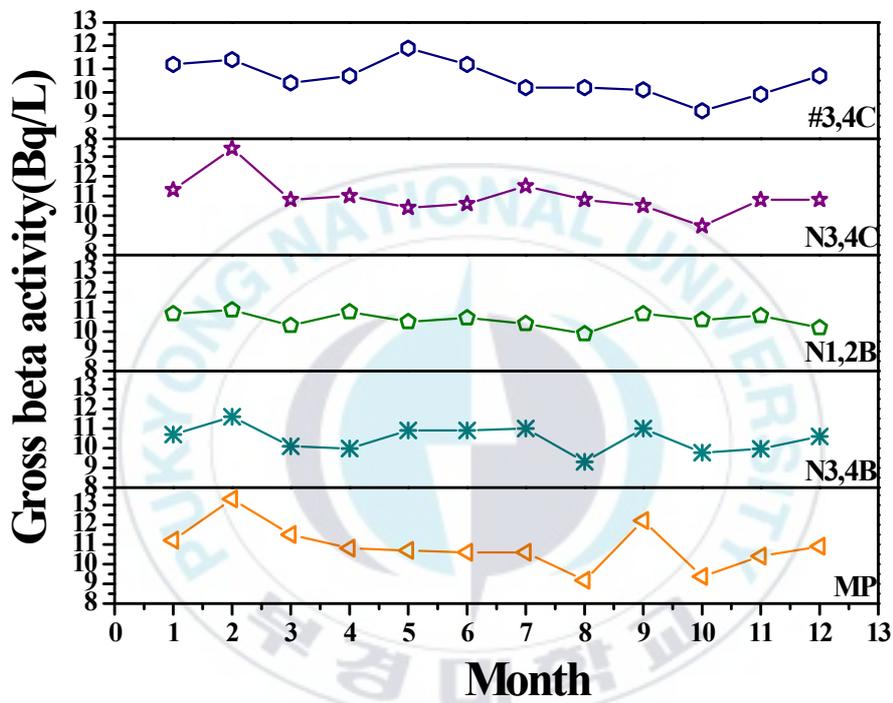


그림 4.5 월별 해수 전베타 방사능 농도

(2014년, #3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C),  
신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리3,4배수구(N3,4B), 미포(MP))

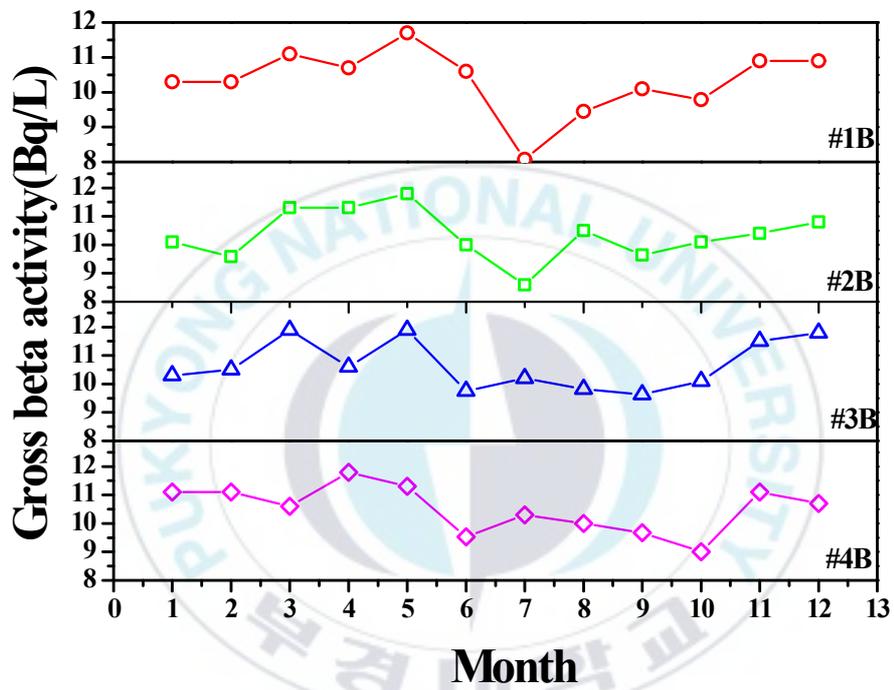


그림 4.6 월별 해수 전베타 방사능 농도  
 (2014년, #1배수구(#1B), #2배수구(#2B),  
 #3배수구(#3B), #4배수구(#4B))

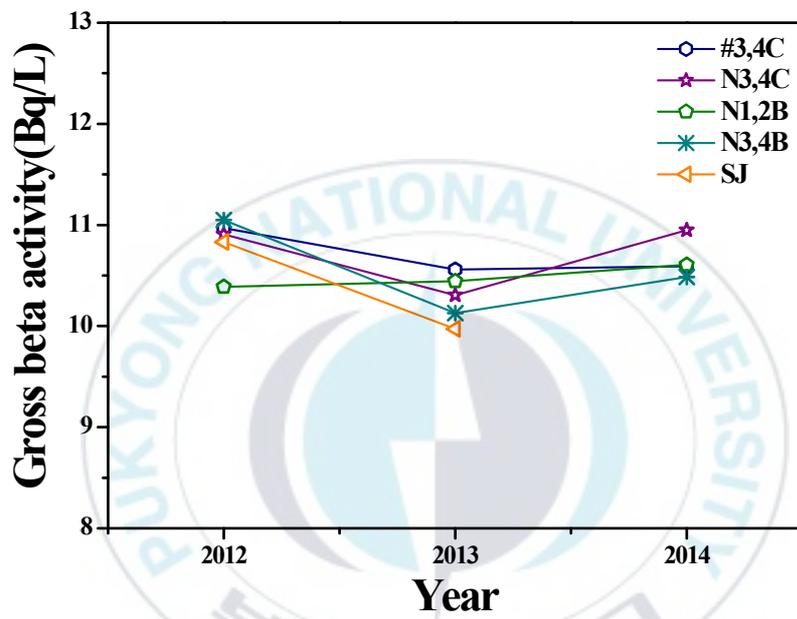


그림 4.7 연평균 해수 전베타 방사능 농도

(#3,4배수구(#3,4C), 신고리 3,4취수구(N3,4C),  
 신고리 1,2배수구(N1,2B), 신고리 3,4배수구(N3,4B), 송정(SJ))

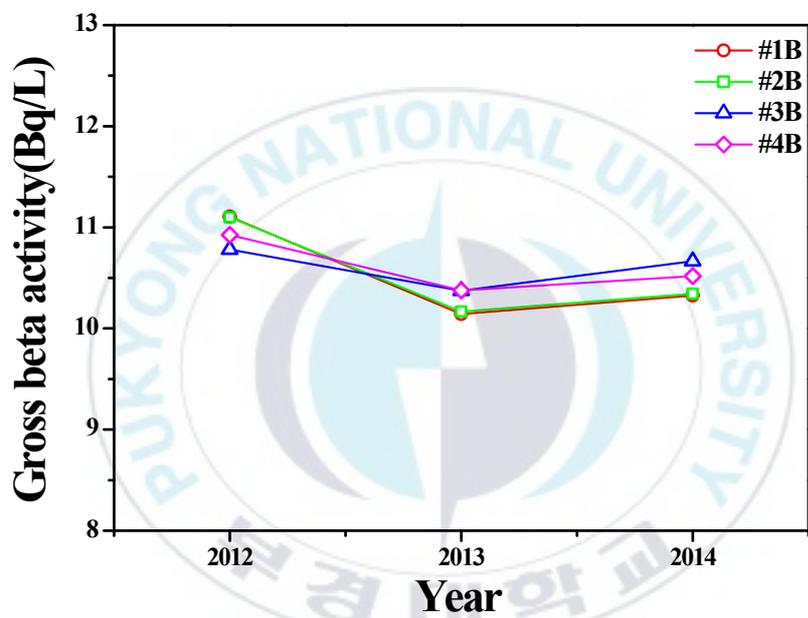


그림 4.8 연평균 해수 전베타 방사능 농도

(#1배수구(#1B), #2배수구(#2B), #3배수구(#3B), #4배수구(#4B))

## 4.2. 강 수

### 4.2.1. 강수량과 전베타 방사능 농도와의 관계

표 4.4~표 4.6은 2012년 1월부터 2014년 12월까지 3년간 총 4개의 지점(신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)에서 채취한 강수의 전베타 방사능 농도이다. 표에 나와 있는 값으로 월별 방사능 농도 변화를 알아보기 위해 그림 4.9, 4.11, 4.13에 나타내었고 부산지역의 월 평균 강수량을 그림 4.10, 4.12, 4.14에 나타내었다. 강수의 측정결과 최솟값은 2014년 8월 부산대에서  $<0.00758$  Bq/L로 MDA미만이었고 최댓값은 2013년 12월 신고리 기상관측소에서  $0.229 \pm 0.011$  Bq/L로 조사되었다.

강수량과 방사능농도를 비교해보면 강수량이 적은 겨울(12, 1, 2월)에 방사능농도가 높은 것을 알 수 있고 강수량이 많은 여름(6, 7, 8월)에 방사능농도가 낮다는 것을 알 수 있다. 지점별로 연평균을 계산하여 그림 4.15에 나타내었고 결과를 보면 신고리 기상관측소, 사택3단지 및 서생면사무소에서의 전베타 방사능 농도가 비교지점인 부산대에서의 전베타 방사능 농도보다 미소하지만 높게 나타났다. 전베타 방사능 농도 범위는  $0.0389$  Bq/L ~  $0.0811$  Bq/L였다. 최솟값은 2013년 부산대에서  $0.0389$  Bq/L로 나타났고, 최댓값은 2013년 신고리 기상관측소에서  $0.0811$  Bq/L이었다.

표 4.4 강수의 전베타 방사능 농도 (2012년)

[단위 : Bq/L]

지점	신고리 기상관측소	사택3단지	서생면사무소	부산대
1월	0.107±0.007	0.0286±0.0053	0.0331±0.0054	0.0719±0.0062
2월	<0.0151	0.151±0.008	0.0341±0.0054	<0.0151
3월	0.0517±0.0074	0.135±0.010	0.0872±0.0082	0.115±0.009
4월	0.124±0.009	0.0942±0.0083	0.103±0.008	0.0654±0.0075
5월	0.164±0.011	0.114±0.009	0.145±0.012	0.0502±0.0071
6월	0.0488±0.0069	0.0606±0.0081	0.0788±0.0087	<0.0190
7월	0.0701±0.0076	0.0609±0.0073	0.0730±0.0089	0.0414±0.0067
8월	0.0506±0.0070	0.0477±0.0069	0.0621±0.0074	0.0368±0.0066
9월	0.0287±0.0063	0.0195±0.0060	0.0274±0.0063	<0.0173
10월	0.0354±0.0064	0.0347±0.0064	0.0364±0.0065	0.0438±0.0067
11월	0.0629±0.0072	0.0382±0.0064	0.0317±0.0062	0.0815±0.0077
12월	0.0582±0.0073	0.0420±0.0068	0.0244±0.0062	0.0717±0.0077

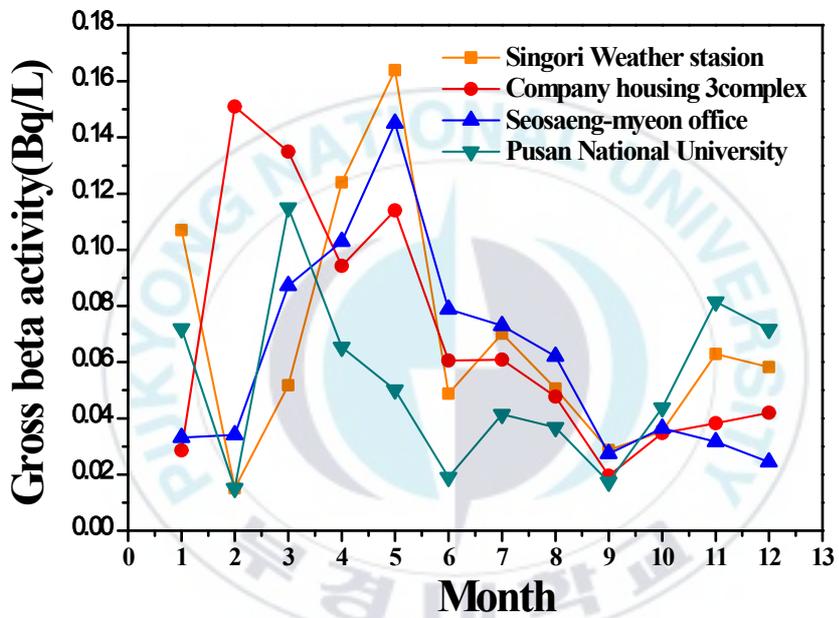


그림 4.9 강수 전베타 방사능 농도

(2012년, 신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)

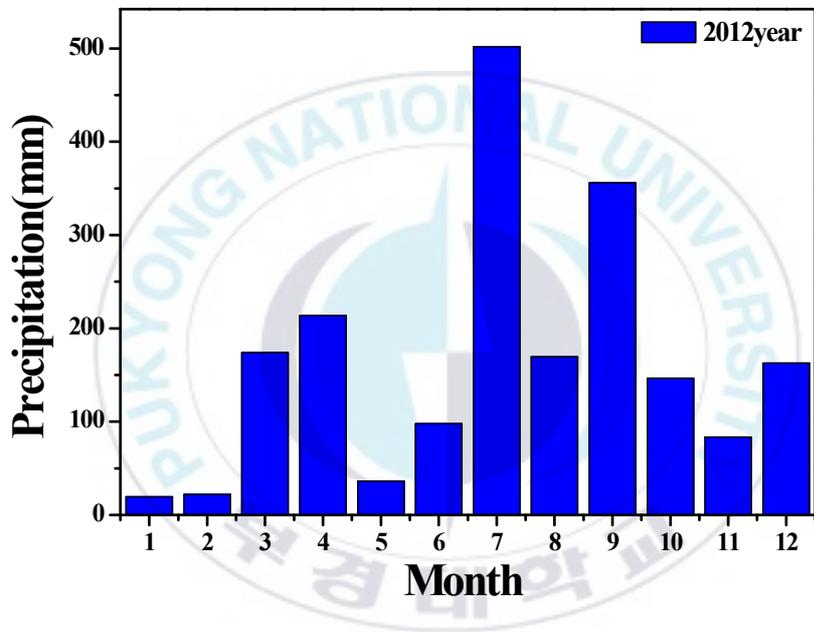


그림 4.10 부산지역 매월 평균 강수량 (2012년)

표 4.5 강수의 전베타 방사능 농도 (2013년)

[단위 : Bq/L]

지점	신고리 기상관측소	사택3단지	서생면사무소	부산대
1월	0.0739±0.0076	0.0824±0.0078	0.0494±0.0071	0.0474±0.0067
2월	0.112±0.009	0.174±0.010	0.140±0.010	0.0248±0.0067
3월	0.0821±0.0084	0.0629±0.0078	0.0575±0.0078	0.0304±0.0071
4월	0.114±0.009	0.121±0.009	0.0214±0.0062	0.0716±0.0077
5월	<0.0184	0.0493±0.0062	0.0277±0.0065	0.0276±0.0065
6월	0.0395±0.0068	0.0306±0.0068	<0.0178	0.0259±0.0063
7월	0.0331±0.0071	<0.0197	0.0359±0.0072	<0.0197
8월	0.0598±0.0080	0.0250±0.0080	<0.0203	<0.0203
9월	0.131±0.009	0.0667±0.0094	0.0501±0.0074	0.0562±0.0076
10월	0.0602±0.0074	<0.0177	0.0852±0.0081	0.0240±0.0062
11월	<0.021	0.0462±0.0057	0.142±0.010	0.0431±0.0074
12월	0.229±0.011	0.0527±0.0112	0.120±0.009	0.0762±0.0077

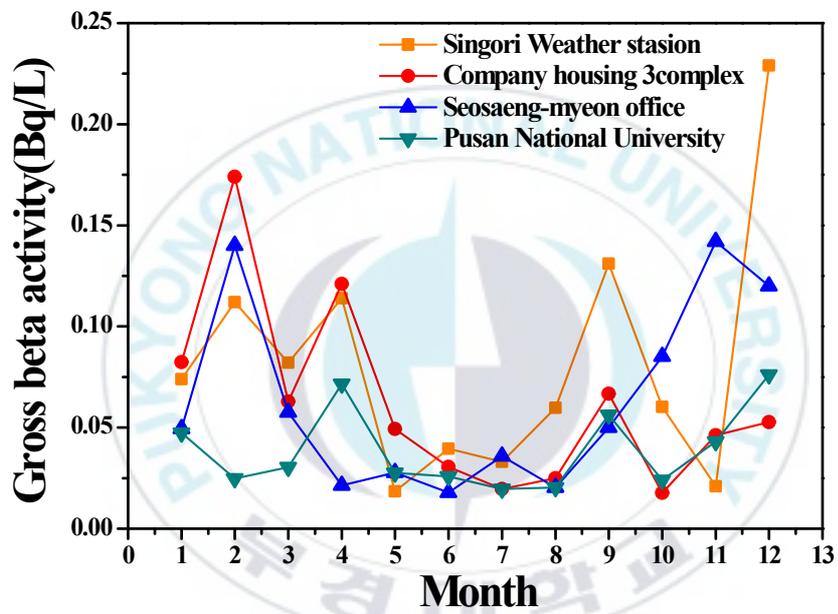


그림 4.11 강수 전베타 방사능 농도

(2013년, 신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)

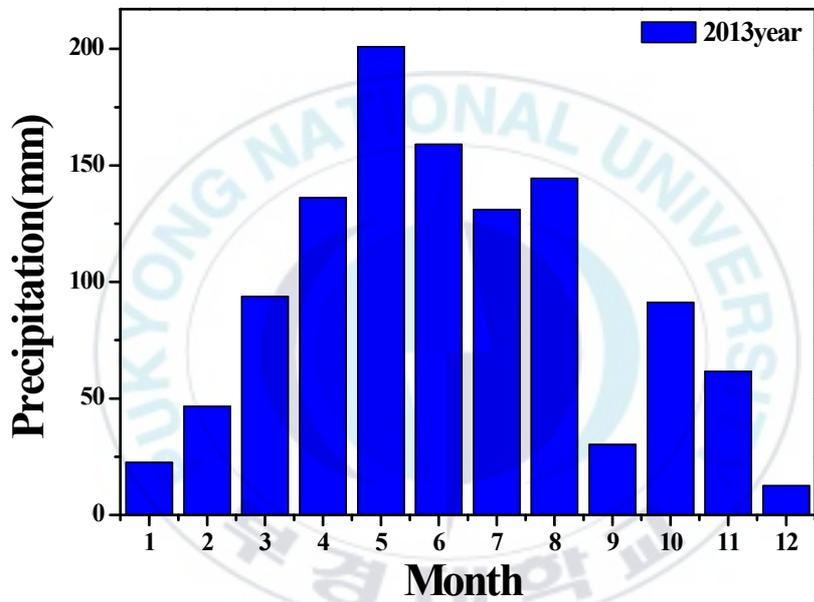


그림 4.12 부산지역 매월 평균 강수량 (2013년)

표 4.6 강수의 전베타 방사능 농도 (2014년)

[단위 : Bq/L]

지점	신고립 기상관측소	사택3단지	서생면사무소	부산대
1월	0.0618±0.0077	-	<0.0196	0.102±0.009
2월	0.0969±0.0088	0.127±0.009	0.0645±0.0079	0.0366±0.0068
3월	0.110±0.010	0.120±0.010	0.0815±0.0091	0.0502±0.0075
4월	0.0978±0.0082	0.122±0.008	0.117±0.006	0.117±0.007
5월	0.0259±0.0082	0.0185±0.0076	0.0145±0.0075	0.0807±0.0101
6월	0.0466±0.0089	0.0547±0.0095	0.0327±0.0088	<0.00845
7월	0.0883±0.0102	0.0355±0.0084	0.0380±0.0085	0.0673±0.0095
8월	0.0349±0.0091	0.0112±0.0077	0.0160±0.0079	<0.00758
9월	0.0761±0.0094	0.0223±0.0077	0.0337±0.0085	0.0268±0.0079
10월	0.0378±0.0084	0.0405±0.0085	0.00894 ±0.00733	0.0632±0.0096
11월	0.109±0.011	0.0831±0.0098	0.0317±0.0085	0.0135±0.0077
12월	0.155±0.012	0.0296±0.0081	0.0630±0.0094	0.0413±0.0089

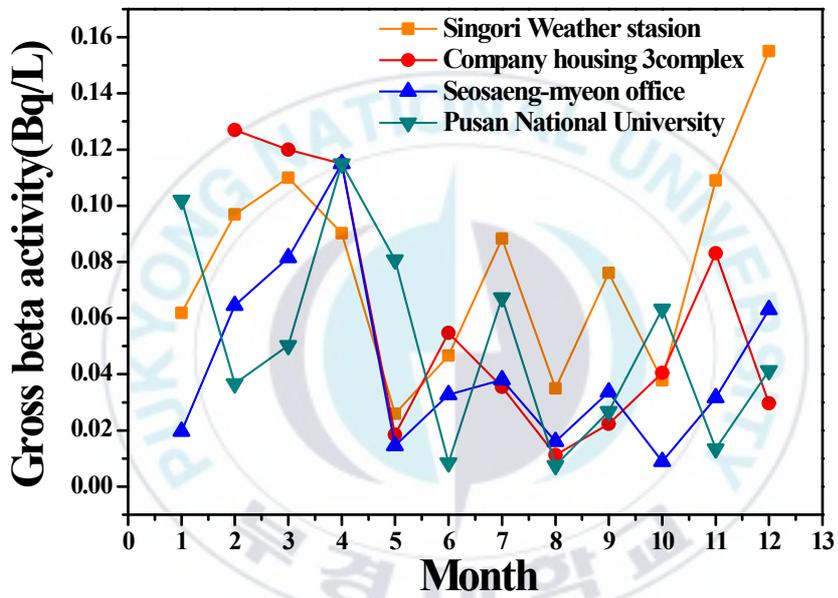


그림 4.13 강수 전베타 방사능 농도

(2014년, 신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)

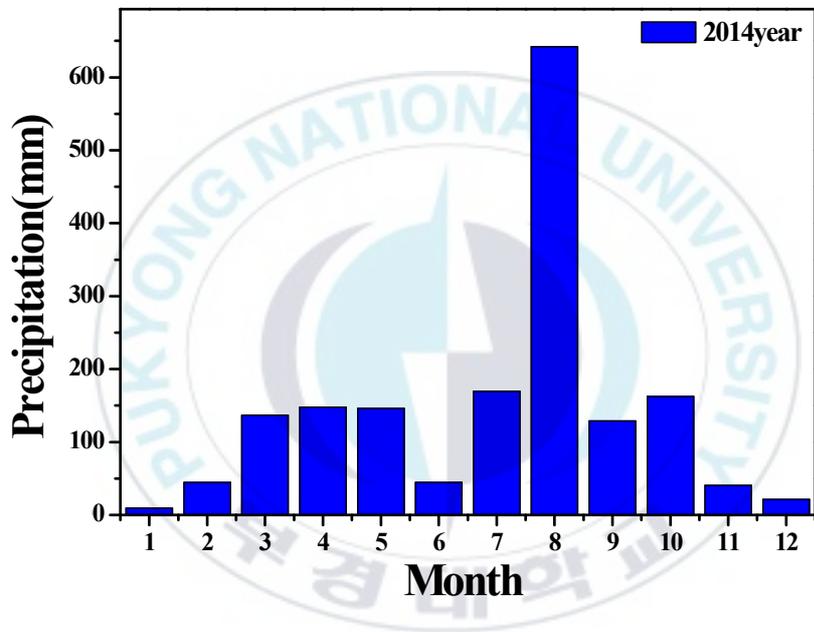


그림 4.14 부산지역 매월 평균 강수량 (2014년)

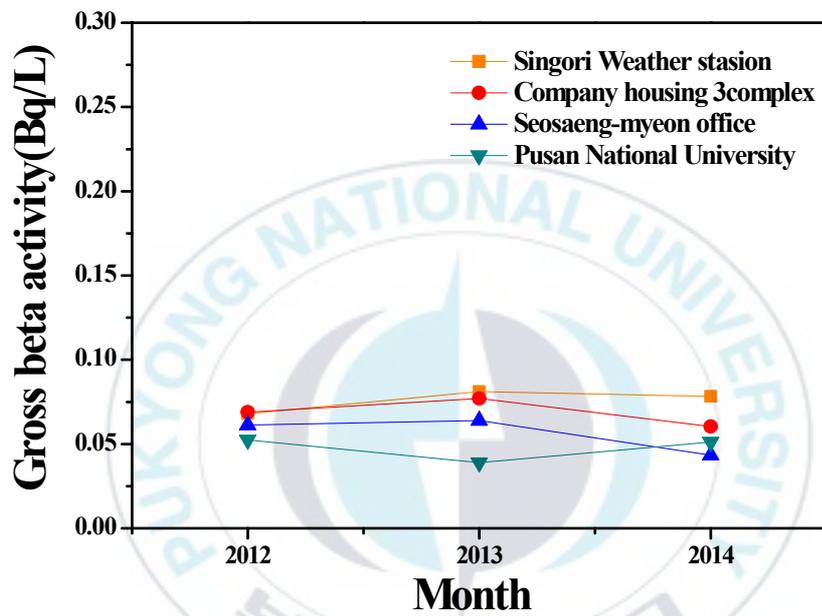


그림 4.15 연평균 강수 전베타 방사능 농도  
(신고리 기상관측소, 사택3단지, 서생면사무소, 부산대)

#### 4.2.2. 강수량과 전베타 방사능 농도의 상관분석

강수량과 전베타 방사능 농도와의 관계를 명확하게 하기 위해 강수량과 전베타 방사능 농도와의 상관관계를 분석하였다. 상관관계란 변수와 변수간의 관계로 둘 또는 그 이상의 변수들에 있어서 한 변수가 커지거나 작아질 때, 다른 변수가 어떻게 변하는지를 그 변동의 정도와 방향을 예측하여 알려주는 분석방법으로 변수간의 관계의 정도와 방향을 하나의 수치인 상관계수로 표현하였다. 상관관계의 정도는 수치의 0에서  $\pm 1$ 사이의 절댓값으로 나타내며 방향은 +, -로 나타낸다. 즉 +값은 양의 상관관계로 한 변수가 증가하면 다른 변수도 증가하는 것을 말하고, -값은 음의 상관관계로 한 변수가 증가하면 다른 변수가 감소하는 것을 말한다. 표 4.7은 각 지점과 강수량을 변수로 구한 상관계수이다. 모든 지점이 3년간 음의 상관관계를 나타내었다. 또한 2014년 3, 4월의 경우 강수의 양이 적은 1, 2월보다 방사능농도가 높은 것을 확인할 수 있는데 그 이유는 1, 2월에 비가 오지 않아 대기 중의 방사성물질들이 계속 존재하게 되고 3, 4월의 비에 섞여서 내려왔을 것으로 예상된다.

표 4.7 강수량과 전베타 방사능 농도간의 상관계수

지점	신고리 기상관측소	사택3단지	서생면사무소	부산대
2012년	-0.2009	-0.2909	-0.0239	-0.1520
2013년	-0.6882	-0.3577	-0.7282	-0.5337
2014년	-0.4810	-0.2799	-0.2439	-0.2682

#### 4.2.3. 건고물 양과 전베타 방사능 농도와의 관계

그림 4.16은 건고물 양에 대한 전베타 방사능 농도의 변화를 나타낸 것이다. 추세선을 보면 알 수 있듯이 건고물의 양이 많으면 방사능 농도가 높아진다는 것을 알 수 있다. 시료를 여과할 때 걸러지지 않는 황사나 미세먼지들이 강수에 섞여 같이 건조되면 건고물의 양이 늘어나게 될 것이고 그 양이 많을수록 방사능 농도에 영향을 미치기 때문이다.

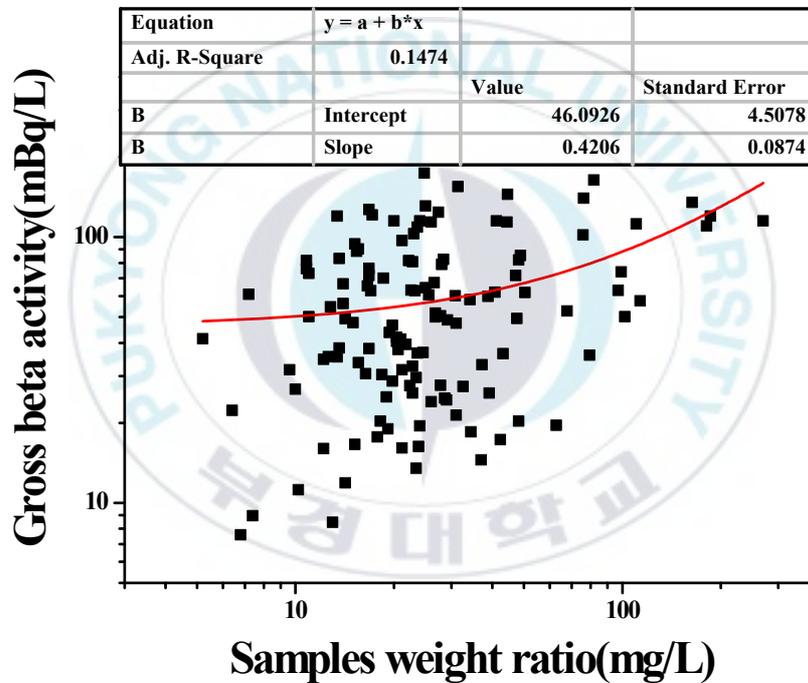


그림 4.16 건고물 양에 따른 전베타 방사능 농도

## 5. 결 론

본 연구에서는 2012년 1월부터 2014년 12월까지 부산, 경남지역 해수 및 강수에 전베타 방사능농도를 측정, 조사하였다. 해수는 총 9개 지점, 강수는 총 4개 지점의 시료를 채취하여 시료의 여과, 증발농축, 충전, 건고의 전처리 방법을 사용하여 저준위 알파/베타 계수기로 계측하였다.

해수의 방사능 농도는 8.07~13.4 Bq/L의 범위를 나타내며 연평균은 9.97~11.1 Bq/L의 범위로 큰 경향성을 띄지는 않았다. 강수의 전베타 방사능 농도는 <0.00758 Bq/L인 MDA미만에서부터 0.229 Bq/L의 범위로 나타났으며 연평균은 0.0389~0.0811 Bq/L의 범위로 나타났다. 강수의 경우 강수량이 적은 겨울철에는 전베타 방사능 농도가 높고 강수량이 많은 여름철에는 전베타 방사능 농도가 낮다는 것을 강수량 그래프와 상관계수를 통해 확인할 수 있었다. 상관계수의 값이 모두 음의 값을 가지며 이는 강수량이 증가함에 따라 다른 변수인 전베타 방사능 농도가 감소하는 경우이다. 또한 건고물 양과 전베타 방사능 농도와의 그래프를 통해 건고물의 양이 많아지면 방사능 농도가 높아진다는 추세선을 확인할 수 있었다.

현재 방사선의 영향과 통제, 방사선에 관한 연구와 저 에너지 방사선 방호에 많은 관심을 가지는 만큼 본 연구의 결과를 통하여 부산과 경남지역의 환경방사능 수위를 판별하는 자료로 활용할 수 있다. 또한 환경방사능의 지속적인 모니터링, 방사선량의 시간적, 공간적 변동 경향을 파악하고 예측하여 예기치 못한 방사능 사고의 예방과 적절한 방사선 방호대책에 기여하는 자료로 사용될 수 있을 것이다.

## 6. 참고문헌

- [1] W. K. Lee and S. M. Woo, J. Ind. Liaison Res. Inst. **13**, 27~34 (2007).
- [2] S. J. Han, S. J. Lee, G. J. Lee, N. Y. Lee, H. G. Kim and J. Y. Mun, J. Radiat. Prot. **36**, 71~78 (2011).
- [3] 한국수력원자력 안전기술원, 전국 환경방사능 조사 KINS/ER-28. **46** (2014).
- [4] 김도성, 방사선물리학 (대학서림, 1999), Chap. 3, 5.
- [5] 송지연, 울진토양에서의  $^{137}\text{Cs}$  및  $^{90}\text{Sr}$  분포 (경북대학교 대학원, 2012), p. 1~4.
- [6] 박경호, 제주의 토양 및 이끼에 존재하는  $^{134}\text{Cs}$  및  $^{137}\text{Cs}$  방사능농도 (제주대학교 대학원, 2013), p. 10~21, 32~33.
- [7] 이기성, 김은희, 이모성, 권석근, 임영기, 최호신, 한문희, 이재기, 우리나라의 방사선환경 (한국원자력 안전기술원, 2009), Chap. 2, 4.
- [8] 고성진, 김승국, 노경석, 박명환, 안봉선, 방사선 계측학 (청구문화사, 2009), Chap. 3, 6, 14.
- [9] 이상복,  $2\pi$  비례계수관을 이용한 환경방사선 시료 측정에 관한 연구 (성균관대학교 대학원, 2004), p. 1~15, 29~47.
- [10] M. F. L'Annunziata, *Handbook of radioactivity analysis* (Academic Press 2012), Chap. 1, 2, 17.
- [11] 채신일, 충천지역의 환경방사능 조사.(강원대학교 대학원, 1992), p. 1~3, 11~20.
- [12] M. H. Lee, H. S. Shin, K. H. Hong, Y. H. Eho and C. W. Lee, J. Korea Asso. Radiat. Prot. **24**, 171 (1999).

- [13] 최성훈, *환경토양에서 Ammonium Molybdophosphate를 이용한 세슘동위원소 평가방법에 관한 연구* (경상대학교 대학원, 2010).
- [14] M. S. Lee, J. Ind. Sci., Cheongju Univ. **29**, No.2 (2012).
- [15] M. S. Lee, J. Ind. Sci., Cheongju Univ. **31**, No.2 (2014).
- [16] C. K. Kim, S. C. Lee, D. M. Lee and B. H. Rho, J. Korea Asso. Radiat. Prot. **27**, 1, 11~19 (2002).
- [17] 이재기, *환경방사능 감시 워크샵 : 환경방사능 검출한계에 대한 고찰* (한국원자력 안전기술원 1996).
- [18] 옥치일, *방사선 물리학의 세계* (전파과학사, 2000). Chap. 6~8.



## 감사의 글

연구와 학업을 병행한다는 설렘과 욕심으로 석사과정을 시작했습니다. 중간에 몇 번이고 그만하고 싶다는 생각도 했었지만 지금은 좀 더 충실하게 시간을 보내지 못한 아쉬움과 부족한 저를 이끌어 주신 분들의 고마운 마음이 크게 느껴집니다.

먼저 많은 가르침과 세심한 지도를 아끼지 않으셨던 서효진 지도교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 바쁘시지만 논문심사를 맡아주시고 작은 것도 신경써주시고 많은 조언해주신 도시홍 교수님과 김무준 교수님께 깊은 감사드립니다.

그리고 2년 넘게 방사선과학기술연구소에서 생활을 같이하며 많은 도움을 주신 장경혁 박사님과 재정이, 항상 아껴주고 걱정해주신 지향누나, 시료채취와 전처리를 도와주느라 많이 고생한 수현이, 먼저 함께 했던 효근이에게도 감사드립니다. 또한 학교에서 오래 같이 생활하며 제가 힘들어할 때나 도움이 필요할 때 언제든지 조력자 역할을 해준 주현이형, 숙현이형, 오주현, 손지철, 물리학과 후배들에게도 고마움을 전하며 언제나 저를 응원해주는 광이, 원호, 동진, 동호, 윤성, 영일, 민철, 중연이에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 사랑으로 저를 키워주시고 대학원 생활을 핑계로 집에도 안들여간 아들 항상 걱정해주시던 아버지, 어머니와 둘도 없는 내 동생 호승이, 6년 넘게 변함없이 제 옆을 지켜준 우리 은지에게 감사의 인사를 전하며 이 논문을 바칩니다.