



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

국내 배경지역 미세먼지(PM₁₀) 중
자연방사핵종(⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U)
농도분석; 2014

濟州大學校 大學院

에너지공학과

朴淵賢

2017年 2月

국내 배경지역 미세먼지(PM₁₀) 중
자연방사핵종(⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U)
농도분석; 2014

指導教授 朴 在 雨

朴 淵 賢

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016年 12月

朴淵賢의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 崔 秀 錫

委員 韓 忠 勳 (인)

委員 朴 在 雨 (인)

濟州大學校 大學院

2016年 12月

Analysis of Activity Concentrations of Natural Radiation
Nuclides (^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U) in Fine Dust (PM_{10}) Aerosols at
Background Site of Korea: 2014

Youn-Hyun Park
(Supervised by professor Jae-Woo Park)

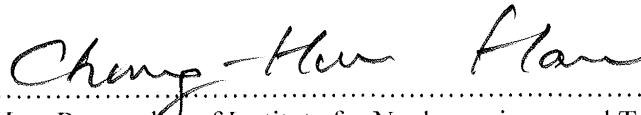
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Engineering.

2016. 12.

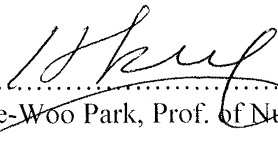
This thesis has been examined and approved.



.....
Soo-seok Choi, Prof. of Nuclear and Energy Engineering



.....
Chung-Hun Han, Researcher of Institute for Nuclear science and Technology



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

.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSIT

목 차

목 차.....	
LIST OF FIGURES.....	
LIST OF TABLES.....	
SUMMARY.....	
I. 서 론.....	1
II. 측정 및 분석 방법.....	3
1. 채집 장소 및 측정 기기.....	3
1.1 채집 장소.....	3
1.2 사용 기기.....	5
2. 시료의 전처리 및 U, Th, K Calibration.....	7
2.1 시료 전처리 방법.....	7
2.2 U, Th, K Calibration.....	9
3. 분석 방법.....	10
3.1 방사능 농도산출.....	10
3.2 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 에 의한 연간 유효 선량.....	12
3.3 Radium equivalent activity.....	15
3.4 역궤적 분석.....	16

III. 결과 및 고찰	18
1. 기기검출한계	18
2. 미세먼지 중 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 측정 결과	19
2.1 미세먼지의 질량에 따른 농도분석	19
2.2 대기 중 부피에 따른 농도분석	25
2.3 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 농도 비교분석	27
3. 역 궤적 분석	32
4. 대기 중 Aerosol에 대한 연간 유효선량 평가	40
5. Radium Equivalent Activity (Ra_{eq})	43
IV. 결 론	46
참고문헌	50

LIST OF FIGURES

Fig. 1. PM ₁₀ sampling site in Gosan, Jeju Island.	4
Fig. 2. PM ₁₀ sampler (APM Engineering, PMS-103, Korea).	5
Fig. 3. ICP-DRC-MS (Perkin Elmer, model ELAN DRC-II, USA).	6
Fig. 4. Process of dissolving PM ₁₀ filter with microwave and Filtration.	8
Fig. 5. PM ₁₀ samples were pretreated with EPA IO-3.1.	8
Fig. 6. Setting screen of reverse trajectory model of HYSPLIT4.	17
Fig. 7. Result data of HYSPLIT4 reverse trajectory program.	17
Fig. 8. Comparing the concentration of ⁴⁰ K to air volume and dust mass.	21
Fig. 9. Comparing the concentration of ²³² Th to air volume and dust mass.	22
Fig. 10. Comparing the concentration of ²³⁸ U to air volume and dust mass.	23
Fig. 11. Correlation between ²³⁸ U and ²³² Th in PM ₁₀ aerosols.	29
Fig. 12. Correlation between ⁴⁰ K and ²³² Th in PM ₁₀ aerosols.	30
Fig. 13. Correlation between ²³⁸ U and ²³² Th in PM ₁₀ aerosols.	31
Fig. 14. The total reverse trajectory of the PM ₁₀ sample measured in 2014.	33
Fig. 15. The reverse trajectory of the sample entering sector I.	34
Fig. 16. The reverse trajectory of the sample entering sector II.	35
Fig. 17. The reverse trajectory of the sample entering sector III.	36
Fig. 18. The reverse trajectory of the sample entering sector IV.	37
Fig. 19. Annual effective dose for type F and dose for ⁴⁰ K, ²³² Th, ²³⁸ U nuclide.	41
Fig. 20. Comparison of dust mass and air volume concentration of Ra _{eq}	43

LIST OF TABLES

Table 1. The respiration rate and indoor residence rate of various age groups are summarized briefly.	13
Table 2. Effective dose coefficients e for inhalation (AMAD = 1 μ m) of radionuclides for members of the public	14
Table 3. Results for Instrumental Detection Variation and Limit of Coefficient measured with ICP-DRC-MS (n=7)	18
Table 4. Analysis according to the weather phenomenon of ⁴⁰ K in PM ₁₀ sample	24
Table 5. Analysis according to the weather phenomenon of ²³² Th in PM ₁₀ sample.....	24
Table 6. Analysis according to the weather phenomenon of ²³⁸ U in PM ₁₀ sample	24
Table 7 . Comparison of air volume and dust mass ratio of ⁴⁰ K, ²³² Th, ²³⁸ U nuclides	27
Table 8. The rate of meteorological phenomena entering each sector	32
Table 9. Concentration of nuclides according to air volume and dust mass of the sector .	38
Table 10. The ratio of concentration to air volume of each sector.....	39
Table 11. The concentration ratio of the dust mass of each sector.....	39
Table 12. Annual effective dose(nSv/y) calculated using the average concentration of each nuclide in 2014	40
Table 13. Annual effective dose comparison of Asia dust and Non-event.....	42
Table 14. Ra _{eq} of each meteorological phenomenon on dust mass and air volume	44

SUMMARY

In this study, a total of 115 PM₁₀ samples were collected from the Gosan area in Jeju Island, which is a natural background sites, during the year of 2014. This study analyzed using ICP-DRC-MS (Inductively Coupled Plasma - Dynamic Reaction Cell - Mass Spectrometer) the concentrations of potassium, thorium and uranium, and evaluated the annual effective dose by breathing from the results. For the pretreatment, EPA-IO-3.1 method was used.

During the study period, the mean mass concentration of PM₁₀ was 46.31 mg/kg. And the mean concentrations of ⁴⁰K, ²³²Th and ²³⁸U were 0.56, 1.03 and 0.53 mg/kg, respectively.

As a result, concentrations of dust mass with each nuclide ²³⁸U, ²³²Th and ⁴⁰K were 0 ~ 62.07 (mean: 6.48 ± 7.43 Bq/kg), 0 ~ 16.86 (mean: 4.16 ± 2.98 Bq/kg) and 1.94 ~ 605.76 Bq/kg (mean: 146.90 ± 101.84 Bq/kg), respectively. The activity concentrations of each nuclide were analyzed by atmospheric phenomenon (Asian Dust, Haze, Fog-Mist and Non-Event). During Asian Dust periods (5 samples), the active concentrations of ⁴⁰K, ²³²Th and ²³⁸U were 328.05, 11.38 and 10.71 Bq/kg, respectively. The ²³²Th/⁴⁰K, ²³⁸U/⁴⁰K and ²³²Th/²³⁸U ratio of Asian Dust was 0.033, 0.036 and 1.06, respectively, which was higher than those of other atmospheric phenomenon (0.50~0.82).

Each nuclide ²³⁸U, ²³²Th and ⁴⁰K concentration for air volume is 0 ~ 2.16 (mean: 0.30 ± 0.35 μBq/m³), 0 ~ 2.26 (mean: 0.25 ± 0.37 μBq/m³) and 0.06 ~ 78.14 μBq/m³ (mean: 7.89 ± 10.89 μBq/m³), respectively. The activity concentrations of each nuclide were analyzed by atmospheric phenomenon. During Asian Dust periods (5 samples), the radioactive concentrations of ⁴⁰K, ²³²Th and ²³⁸U were 40.89, 1.46 and 1.37 μBq/m³, respectively.

The five-day backward trajectories have been performed to investigate the inflow pathway of the air mass into the Gosan site, and it was ascertained using the HYSPLIT4 model of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, USA). The air mass inflow pathways have been classified by four sectors; China continent (Sector I), Korean peninsula

(Sector II), Japan (Sector III) and North Pacific Ocean (Sector IV). The sectional frequencies of air mass inflow into the Gosan area were 34.84 % in Sector I, 22.58 % in Sector II, 11.61 % in Sector III and 5.16 % in Sector IV zone during the study. During Asian dust periods, the air mass inflow was due to Sector I (China continent).

As a result of analyzing the air volume, the concentration ratio of $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ were 0.036, 0.032 in Sector I, respectively. The concentration ratio of $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ was measured 0.886. $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$ and $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ were 0.042, 0.032 in Sector II, respectively. And $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ was measured 0.762. As a result of analyzing the dust mass, the concentration ratio of $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ and $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ were 0.040, 0.030 and 0.747 in Sector I, respectively. $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ and $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ were 0.046, 0.030 and 0.662 in Sector II, respectively. Sector III confirmed that the overall ratio of $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ and $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ to total dust volume and air volume decreased. In the case of Sector IV, the respectively ratio of $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ and $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ is the lowest. However, Sector IV was the highest among the other Sector I, II and III.

The $E_{h,\text{Total}}$ (inhalation annual effective radiation dose; default mode F) to the public due to natural isotopes of the airborne PM_{10} was in the range 17.56 ~ 83.74 nSv/y, depending on the age group. The $E_{h,\text{Total}}$ (15y, male) of Asian Dust was 498.84 nSv/y, which was 8.6 times higher than those of the Non-Event dust (58.17 nSv/y).

In 2014 the Ra_{eq} (radium equivalent activity) is 40.85 ~ 84.18 Bq/kg (mean: 52.24 ± 18.00 Bq/kg). According to UNSCEAR 1988, the world average Ra_{eq} is 89.0 Bq / kg in soils. So this study was measured to be similar to the world average Ra_{eq} .

In this study, the ratio of each nuclide was compared according to the inflow route. As a result, it was confirmed that the ratio of each nuclide was slightly different according to the inflow route. It is expected that this will be a preliminary data for analyzing the sources and various weather phenomena of fine dust on the peninsula.

I. 서론

우리가 생활하면서 방사선에 의한 피폭은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫번째로 X-ray 촬영 및 암치료와 같은 인공적으로 받는 인공방사선과 두번째로 자연방사성 물질에 의해 받을 수 있는 자연방사선로 나뉜다. 그 중 자연방사선은 우주방사선과 지각방사선으로 나눌 수 있으며 이 지각방사선이 약 85% 정도 차지한다. 이에 대하여 대표적으로 우라늄, 토륨, 포타슘이 있다(UNSCEAR, 2008). 우라늄과 토륨은 45억년전에 지구가 생성된 이후 단 반감기 핵종은 모두 붕괴하고 반감기가 1억년 이상인 핵종으로서 현재 지각을 구성하는 주요 3가지 방사성 핵종에 포함되어 있다. 이 핵종들은 붕괴할 때 방사선을 방출할 뿐만 아니라 붕괴로 생성된 단반감기 핵종들 또한 연쇄로 붕괴하면 방사선을 방출한다. 이러한 방사성 핵종 중 사람의 인체내부에 존재하는 소량의 방사성 핵종이 존재하는데 그 중 하나가 포타슘 이다(UNSCEAR, 1988).

국내의 경우 '생활주변 방사선 안전관리법'이 마련되면서 국민의 방사선에 대한 영향을 최소화 하기 위해 여러 대책을 추진하고 있다. 이러한 방사선은 높은 에너지의 입자 혹은 전자파(α 선, β 선, γ 선)를 말하며 음식, 음용수와 같은 섭취 또는 공기중에 aerosol을 통한 호흡과 같은 경로를 통해 인체에 침투할 하여 생체조직 등에 피해를 발생시킨다(NCRP No.94, 1987).

미세먼지 일반적으로 직경이 $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) 이하의 미세먼지와 $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$)의 초미세먼지로 구분할 수 있다. 이러한 미세먼지는 폐속에 침투하기 쉬운 성질을 가지고 있다. 미세먼지는 이러한 인체에 침투하기 쉬운 성질로 인해 국내의 환경부에서 2008년 조사한 '황사 및 미세먼지의 건강영향 연구'를 실시하였고 황사기간에 미세먼지 양이 증가하는 것을 추정할 수 있다.

황사는 aerosol이 증가 할 수 있는 기상인자 중 하나이다. 황사의 경우 봄철에 중국대륙이 건조해 지면서 타클라마사막, 고비 사막과 같은 지역에서 발생하는 흄먼지가 상승기류를 타고 3000 ~ 5000 m 상공으로 올라와 편서풍을 타고 우리나라에 올라오는 것이다. 보통 황사의 입자크기는 10 ~ 1000 μm 이며 우리나라는 황사(Asian Dust)라고 말해진다. 보통 황사는 연간 2 ~ 5일 정도이고 4~5월에 주로 관측된다. 그 이외의 기상인자로 연무, 박무와 안개, 그리고 비현상일로 나눌 수 있다. 연무의 경우 간단히 설명하면 상대습도가 75% 미만이면 시야가 흐려지는 기상현상이고 박무와 안개는 상대 습도가 80 ~ 90% 이상이면 시야가 흐려지는 현상을 말한다(Jo and Kim, 2010; Sun et al., 2006).

미세먼지 중 측정하고자 하는 핵종 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 우라늄, 토륨, 칼륨에서 자연존재비는 0.0117, 100, 99.27%를 가지고 있고 지각을 구성하는 천연 방사성 핵종들은 그 지역의 토양, 암석 분포에 따라 각각 핵종의 농도가 달라진다 (Veiga et al., 2006, H.A. Al-Trabulsy et al., 2011).

본 연구에서는 제주도 고산의 배경지역이라는 조건을 이용해 미세먼지(PM_{10})에 포함되어 있는 자연 방사성 핵종인 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 방사능 농도를 구하하고 이를 이용하여 연간유효선량과 Radium Equivalent Activity를 구하였다. 그리고 채집된 aerosol의 기원을 추적하기 위해 미국 대기국의 HYSPLIT4 역궤적 모델로 미세먼지의 유입경로를 중국, 한반도 위쪽, 일본, 태평양 4구역으로 나누어 각각 핵종의 비를 구하였다. 그리고 각각 유입경로에 따른 핵종의 비를 이용해 유입되는 aerosol의 기원을 추정할 수 있는 데이터베이스를 구축하고 한다.

II. 측정 및 분석 방법

1. 채집 장소 및 측정 기기

1.1 채집 장소

본 연구에서 채집된 PM_{10} 시료는 제주특별자치도 제주시 한경면 고산리 수월봉 정상에 위치해 있는 차귀도 부근의 고산기상대($33^{\circ}28'N$, $127.17^{\circ}E$)에서 약 200 m 정도 떨어진 해발 약 70 m 장소에서 채집되었다. 채집된 장소에는 바다가 보이는 외곽지역이며 간단한 작업을 할 수 있도록 컨테이너가 설치되어 있다. 또한 시료의 지상에 대한 영향을 최소화 할 수 있도록 aerosol을 기기를 높이 설치할 수 있는 구조물이 존재한다.

PM_{10} 의 채집장소는 Fig. 1에 나타내었다. 본 채집장소는 아시아의 여러 국가에 둘러싸여 있고 중국과 일본의 경계위치에 있다. 그리고 본 시료채집장소인 제주도 고산지역은 배경지역으로서 국내에 유입되는 국외 부유물질에 대한 국내 도시권 영향을 최소화 할 수 있는 장소이다. 이러한 고유 특성으로 인해 여러 aerosol에 관한 국제 실험이 진행되고 있는데 대표적으로 ACE-Asia (Aerosol Characterization Experiment-Asia) 와 ABC-EAREX 2005 (Atmospheric Brown Cloud-East Asia Regional Experiment 2005)등 여러 국제 실험들이 시행되고 있다(J. H Barry et al., 2003, T. Nakajima et al., 2007).

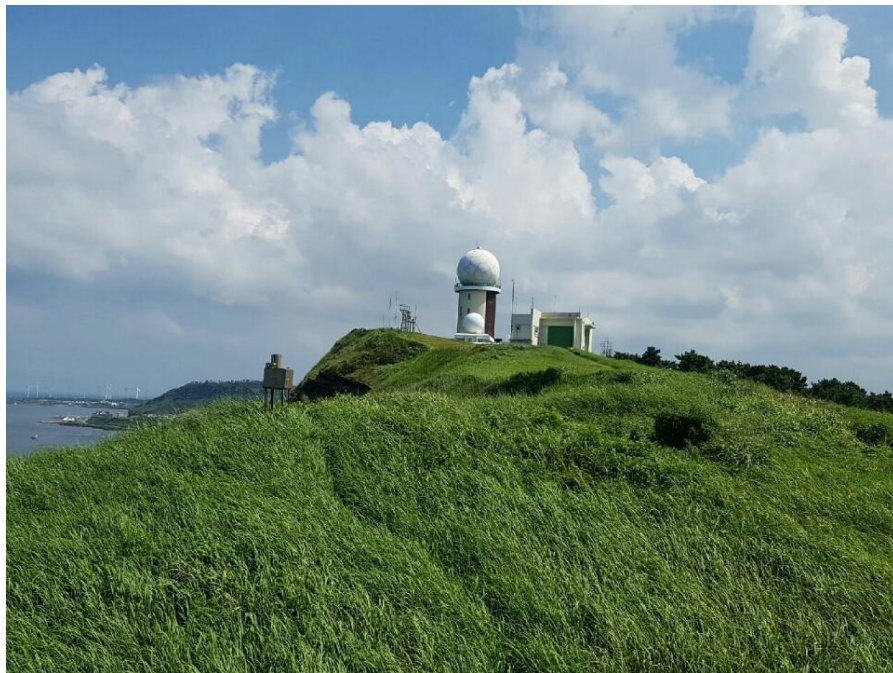


Fig. 1. PM₁₀ sampling site in Gosan, Jeju Island.

1.2 사용 기기

1.2.1. 시료채집 장치 PMS-103

시료채집에 사용될 기기는 PMS-103 (APM Engineering, PMS-103, Korea) 모델을 사용하여 PM_{10} 시료를 채집하였다. 이 aerosol 기기에 PM_{10} 시료와 $PM_{2.5}$ 시료를 동시에 채집할수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 PM_{10} 시료를 필터로 테프론 필터(Pall Corporation, ZeflourTM, 47 mm/2.0 μ m, USA)을 이용하여 시료의 수집 시간, 대기중 공기를 흡입할 공기유량을 설정 할 수 있는 MFC (mass flow controller)를 조작하여 시료를 채집하였다. 이 기기는 구조물의 약 6 m 높이에서 채취할 수 있도록 외부에 설치되어 있다. 그리고 MFC의 공기흡입 유량은 16.7 L/min으로 샘플마다 약 24시간 동안 채집하도록 설정하여 총 115개의 시료를 채집하였다. 시료를 채집후 측정기기가 부근에 있는 컨테이너에서 밀봉 후 가져와서 전처리를 실시하였다.



Fig. 2. PM_{10} sampler (APM Engineering, PMS-103, Korea).

1.2.2. ICP-DRC-MS

채집된 PM_{10} aerosol의 Uranium, Thorium, Potassium을 측정하기 위해 입자의 질량을 정밀하게 분석할 수 있는 장비인 유도 결합 플라즈마 질량 분석기 ICP-S 장비를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 ICP-DRC-MS (Perkin Elmer, model ELAN DRC-II, USA)기기는 유도플라즈마를 생성하여 측정하고자 하는 원소를 이온화하여 측정하는 질량측정장치로 DRC모델은 아르곤 가스를 이용해 생성된 플라즈마를 생성한다. 그리고 내부에서 발생하는 간섭을 암모니아나 메탄과 같은 반응성이 큰 기체를 셀 내에 주입하여 간섭원을 검출기에 도달하기 전에 제거하는 모델이다. 따라서 일반적인 유도 결합 플라즈마 질량 분석기가 $\mu\text{g/mL}$ 까지 측정 가능하다면 본 연구에서 사용한 Fig. 3의 ICP-DRC-MS ELAN DRC-II model은 pg/mL 이하 단위까지 측정이 가능 하다.



Fig. 3. ICP-DRC-MS (Perkin Elmer, model ELAN DRC- II , USA).

2. 시료의 전처리 및 U, Th, K Calibration

2.1 시료 전처리 방법

테프론 필터에 수집된 PM_{10} 시료를 미국 환경보호청(US-EPA : United States Environmental Protection Agency)의 부유물질의 여러 가지 전처리 방법을 제시한 EPA IO-3.1 방법(EPA, 1999) 중 마이크로파를 이용한 산분해법으로 시료를 전처리 하였다.

Fig. 5는 본 실험의 전처리에 사용된 순서를 간단하게 소개하였다. 전처리를 실시할 산용액(5.55% HNO_3 / 16.75% HCl)을 제조한 다음 측정할 시료필터를 잘게 잘라서 microwave (Milestone, START D, Italy) 기기의 용기에 자른 시료와 함께 혼합산 용액을 투입한다. 그리고 모든 시료를 용기에 혼합산 용액과 같이 넣어준다. 그리고 microwave 기기의 설정을 180 °C, 전압을 1000 W로 설정하고 약 20 분 동안 천천히 온도와 전압을 상승시켜준 다음 20분 동안 유지시켜준다. 그리고 상온에서 천천히 냉각시킨 후 용액화된 시료가 들어있는 용기를 혼합산 용액으로 2 ~ 3 회 세척해 주면서 주사기와 필터(Whatman, PVDF syringe filter, 0.45 $\mu g/mL$)를 이용해 잔여 불순물을 제거해 주었다. 그 후 전처리가 끝난 시료의 용량이 각각 다르기 때문에 이를 같게 하기 위해서 희석한 혼합산 용액(3 % HNO_3 /8% HCl) 용액을 제조하여 용량플라스크를 통해 25 mL로 맞추어 주었다.

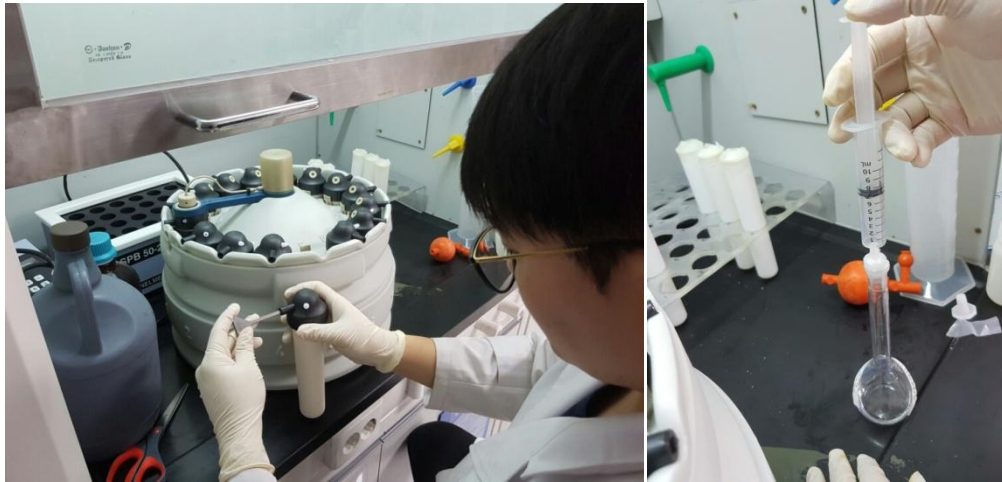


Fig. 4. Process of dissolving PM₁₀ filter with microwave and Filtration.

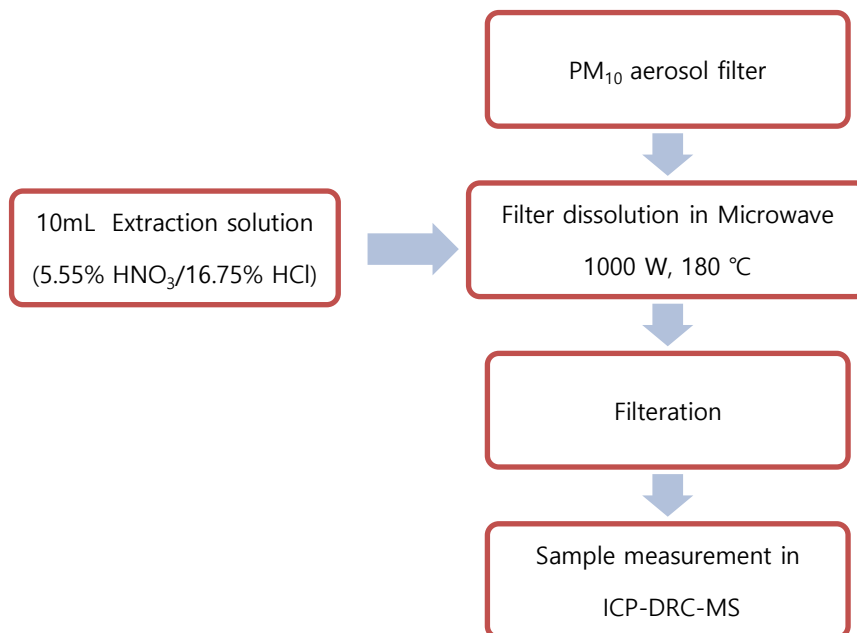


Fig. 5. PM₁₀ samples were pretreated with EPA IO-3.1.

2.2 U, Th, K Calibration

전처리를 통해 용출된 PM_{10} 시료를 측정하기 전에 우선 ICP-DRC-MS 기기를 측정에 알맞게 교정해줄 필요가 있다. 따라서 본 연구에서 측정하고자 하는 핵종은 U, Th, K이므로 핵종의 표준용액을 사용해 교정을 실시하였다.

본 연구의 U, Th, K 교정에 사용된 표준용액은 uranium의 경우 100 $\mu\text{g/mL}$ (Inorganic, MSU-100PPM, 125 mL)의 농도의 제품을 희석하여 사용하였고 마찬가지로 thorium 경우도 표준용액 100 $\mu\text{g/mL}$ (Inorganic, MSTH-100PPM, 125 mL)을 사용하였다. 다음 potassium은 미국의 Perkin Elmer사에서 판매중인 Multielement Calibration Standard3 (Perkin Elmer, 10 $\mu\text{g/mL}$) 물질을 사용하여 필요농도에 따라 효율을 계산하였다.

본 연구에서 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 표준용액 농도를 아주 낮은 농도인 PM_{10} aerosol을 측정하기 위해 ppt 단위까지 교정용액을 제조하였다. MSU-100PPM 와 MSTH-100PPM, Multielement Calibration Standard3를 각각 희석하여 50 ~ 500ppt (50 $\mu\text{g/mL}$ ~ 500 $\mu\text{g/mL}$)까지 5개를 제조하였다. 제조 시 무게법을 이용하였고 희석된 표준용액을 ICP-DRC-MS 전용 프로그램 ELAN software를 이용해 Calibration을 실시하였다.

3. 분석 방법

3.1 방사능 농도산출

다음은 ICP-DRC-MS로 측정된 값을 통해 핵종 uranium, thorium, potassium의 농도를 계산하였다.

다음 아래 식 (1)에서 ρ_i 단위 부피당 농도 농도 (pg/m^3)를 계산하기 위해 일단 ICP-DRC-MS 측정 후 나오는 측정농도는 C_i , 사용하지 않은 테프론 필터를 전처리 하여 측정된 값은 C_b 대입하였다. 그리고 인자 L 은 시료 전처리 시 최종적으로 용량플라스크를 통해 맞춰준 시료 용량인 25 mL이다. T 와 V 의 경우 aerosol 샘플을 채집할 때 채집기에 설정한 채집시간 및 단위 시간당 유량을 각각 인자에 사용하였다. 이를 통해 제조된 시료 25 mL에 대한 시료의 단위부당 농도를 계산하였다.

$$\rho_i = \frac{(C_i - C_b)}{T \times V} \times L \quad (1)$$

ρ_i : 핵종 i 의 단위 농도 (pg/m^3)

C_i : 측정된 핵종 i 의 농도 (pg/mL)

C_b : Blank 평균측정농도 (pg/mL)

L : 시료 측정 양 (25 mL)

T : 채집시간 (min)

V : 단위 시간당 채집유량 (L/min)

식 (2)을 통해 계산된 농도를 각각 공기 부피에 대한 방사능 농도 그리고 먼지 질량에 대한 핵종(^{39}K , ^{232}Th , ^{238}U)의 방사능 농도로 계산을 하였다.

공기 부피에 대한 방사능 농도측정은 이전의 식(1) 에서 구해진 ρ_i 을 아래 식 (2)에 대입하여 계산을 실시하였다. 여기서 인자는 반감기 $T_{1/2}$, 측정농도 ρ_i 핵종의 자연 자연존재비율 m_e ($^{40}\text{K}=0.0117\%$, $^{232}\text{Th}=100\%$, $^{238}\text{U}=99.27\%$), 측정하고자 하는 핵종($^{40}\text{K}=39.9963$, $^{232}\text{Th}=232.038$, $^{238}\text{U}=238.05$)의 몰 질량(g/mol), 아보가드로 수 $N(6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})$ 을 대입하여 결과값으로 핵종(^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U)의 방사능 농도 (Bq/m^3)를 얻을 수 있다.

$$A_i = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \frac{\rho_i \times m_e}{M_i} \times N \quad (2)$$

$T_{1/2}$: 반감기(s)

ρ_i : 핵종의 농도

m_e : 핵종의 자연존재비율

M_i : 핵종의 몰 질량(g/mol)

N : 아보가드로 수($6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

A_i : 핵종(^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U)의 방사능 농도(Bq/m^3)

3.2 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 에 의한 연간 유효 선량

본 연구에서는 ICP-DRC-MS를 통해 측정된 PM_{10} 시료를 위의 방사선 농도 식으로 각각 핵종(^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U)의 방사선 농도를 이용해 연간 유효선량을 구하기 위해 실내 실외 공기 중 방사성 핵종 흡입에 대한 유효선량 계산식인 (3)을 사용하여 계산하였다(UNSCEAR 2000). 여기서 A_i 의 경우 위의 식(2)에서 구한 핵종(^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U)에 대한 방사능 농도를 사용하였고 F_r 의 경우 UNSCEAR 2000에 따라 0.3으로 설정하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} E_{h,i} &= A_i \times B \times d_{h,i}(1 - F_0) + A_i \times B \times d_{h,i} \times F_0 F_r \\ &= A_i \times B \times d_{h,i} \times (1 - F_0 + F_0 F_r) \end{aligned} \quad (3)$$

$E_{h,i}$: 핵종에 의한 연간 유효선량(Sv/y)

A_i : 핵종의 방사능 농도(Bq/m^3)

B : 조건에 따른 호흡률(m^3/y)

$d_{h,i}$: 핵종의 유효선량 환산계수(Sv/Bq)

F_0 : 실내 실외 활동 중 실내 거주 점유 계수

F_r : 실내 공기에 실외 공기 비율($F_r=0.3$)

다음 조건은 ICRP에서 제시한 여러 가지 호흡률 그리고 연령별 자료를 활용하여 계산을 실시하였다. 그 중 B 호흡률(m^3/y)의 경우 다양한 연령대인 생 후 3개월의 아이부터 성인 남성까지 6개 그룹으로 나누어 사람들의 각각 운동량 및 변수에 대한 하루 호흡률을 나타낸 ICRP Publication 89 자료를 사용하였고 실내 실외 활동 중 실내 거주율 F_0 또한 ICRP Publication 89를 참고하였다. 그리고 이 자료를 아래 Table 1에 정리하였다.

Table 1. The respiration rate and indoor residence rate of various age groups are summarized briefly.

Age group	3m	1y	5y	10y	15y		Adult	
					male	female	male	female
B (m^3/d)	2.8	5.1	8.8	15.2	20.1	15.8	22.2	18.2
F_0	1	0.96	0.88	0.88	0.88	0.92	0.92	0.92

d_{hi} 는 ICRP Publication 119 에서 제시한 여러 핵종의 방사능당 유효선량을 흡수에 따른 3가지 그룹 F, M, S type으로 분류하여 정리한 자료를 정리하여 Table 2에 정리하여 나타내었다.

F type(fast rate of absorption)의 경우 호흡 기관에서 혈액으로 순조롭게 흡수될 때 물질들의 유형, M type(moderate rate of absorption)의 경우는 호흡 기관에서 혈액에 보통으로 흡수될 때 물질들의 유형, S type(slow rate of absorption)은 호흡 기관으로부터 비교적 인체에 용해되지 않고 천천히 물질이 흡수되는 유형을 의미한다.

본 연구에서는 호흡 기관으로부터 혈액에 순조롭게 흡수될 때 녹아 붙는 물질들의 유형인 F type으로 가정하여 실험을 진행하였다.

Table 2. Effective dose coefficients e for inhalation (AMAD = 1 μ m) of radionuclides for members of the public

Nuclide	T1/2	Type	Infant		f _i		e(Sv/Bq)					
			f _i	e(Sv/Bq)	≥ 1year	f _i	1year	5years	10years	15years	Adult	
K-40	1.28E9 y	F	1.00	2.4E-08	1.0	1.7E-08	7.5E-09	4.5E-09	2.5E-09	2.1E-09		
U-238	4.468E9 y	F	0.04	1.9E-06	0.02	1.3E-06	8.2E-07	7.3E-07	7.4E-07	5.0E-07		
		M	0.04	1.2E-05	0.02	9.4E-06	5.9E-06	4.0E-06	3.4E-06	2.9E-06		
		S	0.02	2.9E-05	0.002	2.5E-05	1.6E-05	1.0E-05	8.7E-06	8.0E-06		
Th-232	1.405E1 y	F	0.005	2.3E-04	0.0005	2.2E-04	1.6E-04	1.3E-04	1.2E-04	1.1E-04		
		M	0.005	8.3E-05	0.0005	8.1E-05	6.3E-05	5.0E-05	4.7E-05	4.5E-05		
		S	0.005	5.4E-05	0.0005	5.0E-05	3.7E-05	2.6E-05	2.5E-05	2.5E-05		
Ra-226	1600 y	F	0.6	2.6E-06	0.3	9.4E-07	5.5E-07	7.2E-07	1.3E-06	3.6E-07		
		M	0.2	1.5E-05	0.1	1.1E-05	7.0E-06	4.9E-06	4.5E-06	3.5E-06		
		S	0.02	3.4E-05	0.01	2.9E-05	1.9E-05	1.2E-05	1.0E-05	9.5E-06		

Type F materials : Deposited materials that are readily absorbed into blood from the respiratory tract (fast rate of absorption)

Type M materials : Deposited materials that have intermediate rates of absorption into blood from the respiratory tract (moderate rate of absorption)

Type S materials : Deposited materials that are relatively insoluble in the respiratory tract (slow rate of absorption)

f_i : Absorbed fraction to body fluid

3.3 Radium equivalent activity

다음 위의 먼지에 대한 단위 질량당 방사능 농도를 산출농도를 이용하여 음 라듐 등가지수 Ra_{eq} (Radium equivalent activity) 를 산출하였다. 이 라듐등가지수는 해당 물질에서 자핵종의 선량으로 인한 방사능 위해 지수로서 흔히 생물학적 위험지수로 나타내는 방법 중 하나이다(Mohamed A. Zytoon, 2014). 이 라듐등가지수는 단위 질량당 핵종 $^{238}\text{U} = 370$, $^{232}\text{Th} = 259$, $^{40}\text{K} = 4810$ Bq/kg일 때 γ 선량률이 동일하다는 전제에서 성립된다. 본 연구에서는 2014년간 수집된 PM_{10} 시료의 핵종(^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U)의 식(2)를 통해 먼지 질량에 대한 농도를 계산한 다음 이를 활용하여 라듐등가지수 Ra_{eq} 를 계산하여 분석을 실시하였다. 그리고 이를 통해 나온 결과값이 제한치인 370 Bq/kg 미만인지 확인해 본다(Sam, A.K and Abbas, N., 2010).

$$Ra_{eq} = \left(\frac{A_U}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) \times 370 \quad (4)$$

A_U : ^{238}U 의 방사능 농도

A_{Th} : ^{232}Th 의 방사능 농도

A_K : ^{40}K 의 방사능 농도

Ra_{eq} : 라듐 등가 지수

3.4 역궤적 분석

본 실험의 국내 배경지역이라고 볼 수 있는 측정지점인 고산 기상대에서 측정된 PM_{10} aerosol의 유입경로를 살펴보기 위해 역궤적 분석을 실시하였다. 사용된 이를 분석하기 위해 사용한 프로그램은 대기확산 컴퓨터 예측모델 중 하나인 HYSPLIT4 (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델으로 미국의 환경대기국 (NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 운영하는 프로그램이다. 이 모델은 부유물질 및 오염물질의 이동경로 및 발생원을 추적하는데 유용하게 사용되고 원하는 지점과 특정 날짜를 설정하여 역궤적을 산출해 주는 프로그램이다. 다음 Fig. 6는 해당 프로그램의 설정 화면이다. 본 연구에서는 측정 지점의 좌표는 고산($33.28^{\circ} N, 127.17^{\circ} E$)에서 황사가 중국에서 발생하여 4일 이내의 시간으로 한반도에 도착한다는 점을 고려하여 역궤적 시간을 5일로 설정하였다. 다음 Fig. 7는 HYSPLIT4를 통해 얻은 결과값 중 하나이다. 구해진 역궤적 자료를 총 4가지 구역으로 나누어 분석을 실시하였다.

Model Run Details

The archived data file (GDAS1) has data beginning at 05/29/14 0000 UTC.

[Request trajectory](#)

Model Parameters

Trajectory direction: Forward Backward (Change the default start time!) [More info](#)

Vertical Motion: Model vertical velocity Isobaric Isentropic [More info](#)

Start time (UTC): year: 14, month: 05, day: 29, hour: 9 [More info](#)
 Current time: 01:58

Total run time (hours): 120 [More info](#)

Start a new trajectory every: 0 hrs **Maximum number of trajectories:** 24 [More info](#)

Start 1 latitude (degrees): 33.170000 [More info](#)
Start 1 longitude (degrees): 126.100000 [More info](#)
Start 2 latitude (degrees):
Start 2 longitude (degrees):
Start 3 latitude (degrees):
Start 3 longitude (degrees):

Level 1 height: 500 meters AGL meters AMSL [More info](#)
Level 2 height: 0
Level 3 height: 0

Fig. 6. Setting screen of reverse trajectory model of HYSPLIT4.

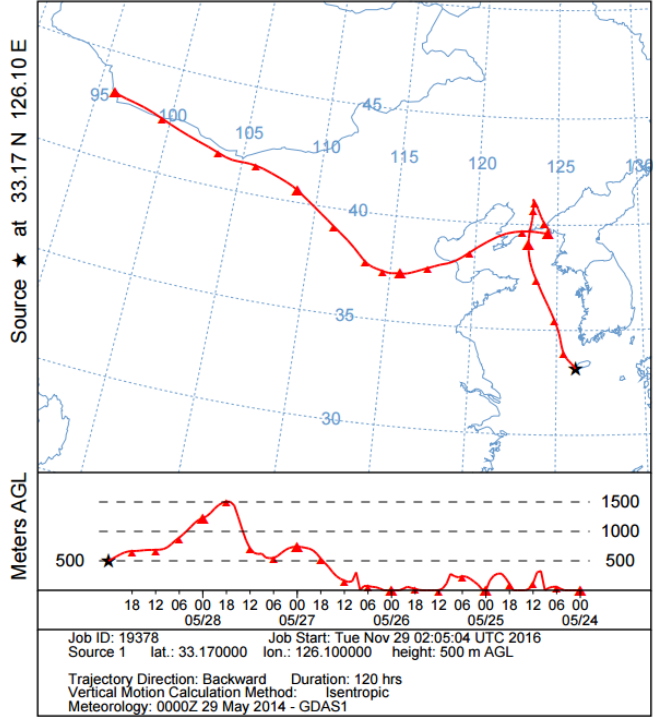


Fig. 7. Result data of HYSPLIT4 reverse trajectory program.

III. 결과 및 고찰

1. 기기검출한계

다음 본 연구에서 측정하고자 하는 기기로 시료를 측정 시 신뢰할 수 있는 최소 측정농도를 확인하기 위해 핵종 U, Th, K 에 대하여 Calibration을 실시하여 준 다음 가장 낮은 농도의 표준용액을 이용해서 기기검출한계(Instrumental Detection Limit: IDL)를 측정하기 위해 측정 시 7번 반복하여 측정을 실시하였고 측정에 대해 얼마나 분산되어있는지 확인하기 위해 변동계수(Variation of Coefficient: CV)를 구하였다.

본 연구에서는 가장 낮은 농도의 신뢰수준을 98 %로 설정하고 하였으므로 이에 대한 t값 (factor for confidence)은 반복측정 7번과 신뢰구간 98 % 에 해당하는 3.143으로 설정하였다. 그리고 측정된 표준편차(Standard Deviation : SD)을 이용해서 변동계수를 구하였다.

측정결과 ^{39}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 IDL 측정치는 각각 27.12 $\mu\text{g/L}$, 2.11 ng/L , 2.89 ng/L 로 확인 할 수 있었고 측정된 농도와 표준편차를 통해 변동계수를 구하였는데 측정값 모두 3 %가 넘지 않으므로 신뢰할 수 있는 결과로 확인할 수 있었다. 10% 보다 매우 작은 값이므로 기기검출한계에 대한 결과는 인정할 수준의 결과값이었다고 판단된다.

Table 3. Results for Instrumental Detection Variation and Limit of Coefficient measured with ICP-DRC-MS (n=7)

	^{238}U (ng/L)	^{232}Th (ng/L)	^{39}K ($\mu\text{g/L}$)
IDL	2.89	2.11	27.12
CV (%)	1.54	1.40	2.24

2. 미세먼지 중 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 측정 결과

2.1 미세먼지의 질량에 따른 농도분석

고산지역에서 채집된 PM_{10} 의 먼지 질량에 따른 aerosol 농도분석에 대한 실시하였다. aerosol은 대기의 기상현상에 지대한 영향을 가지기 때문에 기상현상은 중요한 변수로 작용을 한다. 따라서 본 연구에서는 aerosol에 영향을 가지는 황사(Asian Dust), 연무(Haze), 박무(fog-mist)와 비현상일(Non-event)로 나누어 분석하였고, 또한 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 농도 비를 구하여 먼지의 특성을 연구하였다. 기상현상에 대한 자료는 고산지점 기상청의 자료를 수집하였다.

본 연구에서 측정된 시료는 총 115개 이며 황사기간이 5개 연무기간이 6개 안개 및 박무기간이 57개 그리고 비현상일이 47개로 측정되었다. Fig. 8 ~ 10에는 각각 핵종에 따른 먼지 질량에 따른 농도와 공기 부피에 대한 농도를 나타내었다 우선 먼지에 대한 질량에 대한 농도(Bq/kg)분석을 실시하였다. 그리고 분석한 결과를 Table 4 ~ 6에 나타내었다. 그 결과 핵종의 방사능 농도는 ^{40}K 의 경우 1.94 ~ 605.76 Bq/kg (mean: 146.90 ± 101.84 Bq/kg), ^{232}Th 의 경우 0 ~ 16.86 Bq/kg (mean: 4.16 ± 2.98 Bq/kg), ^{238}U 의 경우 0 ~ 62.07 Bq/kg (mean: 6.48 ± 7.43 Bq/kg) 값으로 산출되었다.

황사 기간 중 채집된 시료는 1월에 1개와 5월에 4개의 총 5개의 관측되었으며 이에 대한 각각 핵종의 농도범위는 ^{40}K 은 176.63 ~ 605.76 Bq/kg (mean: 328.05 ± 169.23 Bq/kg), ^{232}Th 은 7.44 ~ 16.86 Bq/kg (mean: 11.38 ± 3.83 Bq/kg), ^{238}U 은 9.19 ~ 13.45 Bq/kg (mean: 10.71 ± 1.72 Bq/kg) 로 측정되었다.

연무의 경우 채집된 시료 중 1월, 2월, 12월에 각각 2개씩 관측됨에 따라 총 6개이며 각각 핵종의 농도범위는 ^{40}K 은 64.48 ~ 259.44 Bq/kg (mean: 162.56 ± 69.33 Bq/kg), ^{232}Th 은 2.4 ~ 8.27 Bq/kg (mean: 5.05 ± 2.06 Bq/kg), ^{238}U 은 3.75 ~ 13.35 Bq/kg (mean:

11.38 ± 3.83 Bq/kg) 으로 측정되었다.

박무의 경우 시료 중 가장 많은 57개로 측정되었으며 측정된 농도범위가 ^{40}K 은 1.94 ~ 405.12 Bq/kg (mean: 140.08 ± 88.61 Bq/kg), ^{232}Th 은 0 ~ 11.34 Bq/kg (mean: 3.82 ± 2.69 Bq/kg), ^{238}U 은 0 ~ 62.07 Bq/kg (mean: 7.58 ± 9.83 Bq/kg)로 측정되어 황사와 비교하여 박무의 의 평균 질량농도 분석결과 ^{40}K 은 2.34배, ^{232}Th 은 2.98, ^{238}U 은 1.41배의 차이를 확인할 수 있었다.

비현상일의 측정된 평균농도는 다른 현상일과 비교하여 가장 낮은 값으로 ^{40}K 은 133.90 ± 96.43 Bq/kg, ^{232}Th 은 3.68 ± 2.29 Bq/kg, ^{238}U 은 4.52 ± 3.08 Bq/kg로 측정되었지만 황사와 비교했을 때 ^{40}K 은 2.44배, ^{232}Th 은 3.09, ^{238}U 은 2.37 낮은 값으로 확인되었다.

Fig. 8 ~ 10은 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 먼지에 대한 질량농도와 공기부피에 따른 농도를 비교 분석한 결과이다. ^{40}K , ^{232}Th 은 황사기간에 농도가 부피농도와 비슷하게 증가하는 것을 확인할 수 있었지만 ^{238}U 의 질량 농도가 크게 증가하지 않는 것을 확인할 있었다 반면 ^{238}U 의 경우에는 8월 14일에 높은 농도인 5.04 mg/kg을 확인할 수 있었다. 이는 황사기간과 상관없이 ^{238}U 는 다른 ^{40}K , ^{232}Th 은과 비교 하였을 때 거의 일정한 농도를 가지지만 8월 높은 농도인 5.04 mg/kg로 이는 다른 요인에 의해 ^{238}U 농도가 증가했다고 판단된다

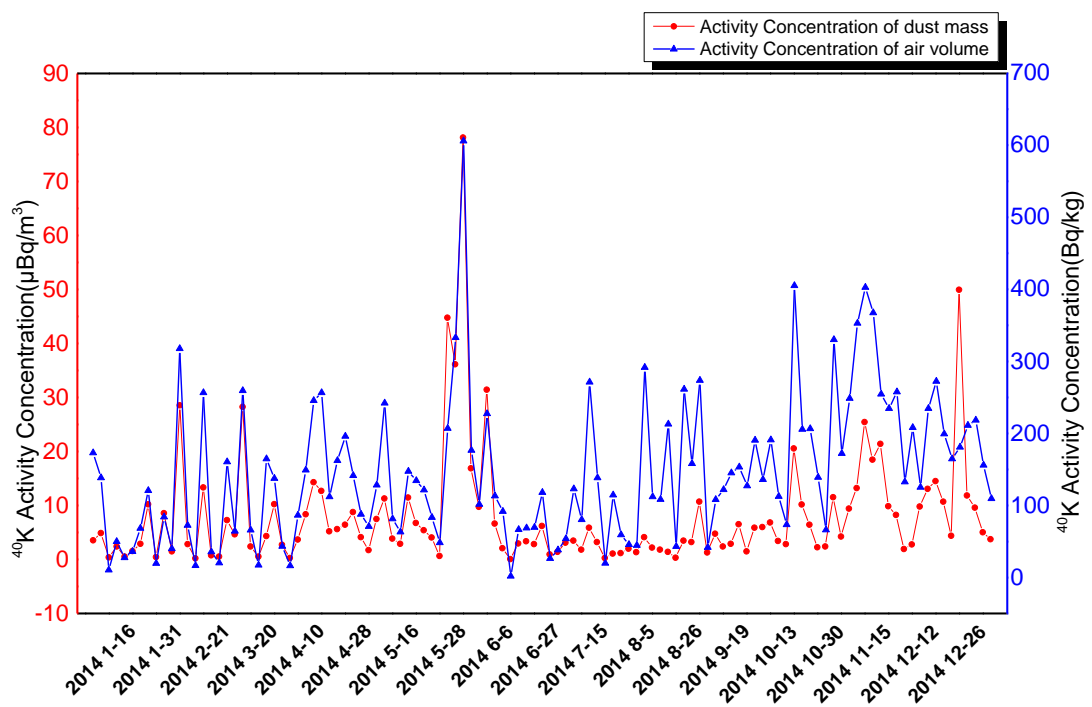


Fig. 8. Comparing the concentration of ^{40}K to air volume and dust mass.

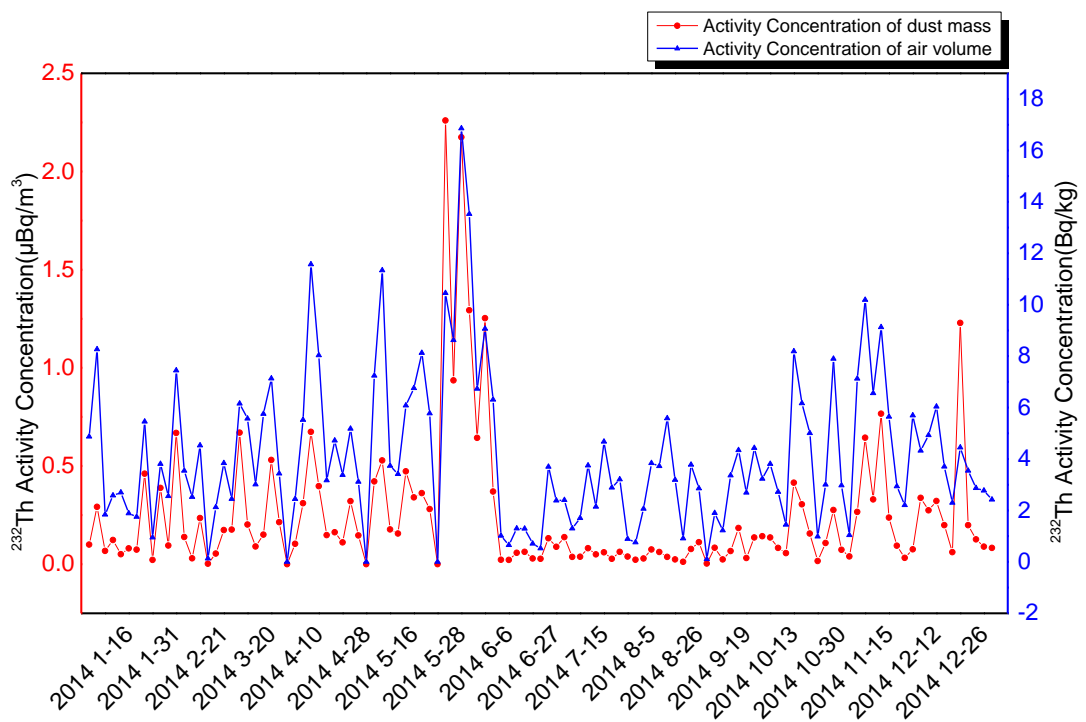


Fig. 9. Comparing the concentration of ^{232}Th to air volume and dust mass.

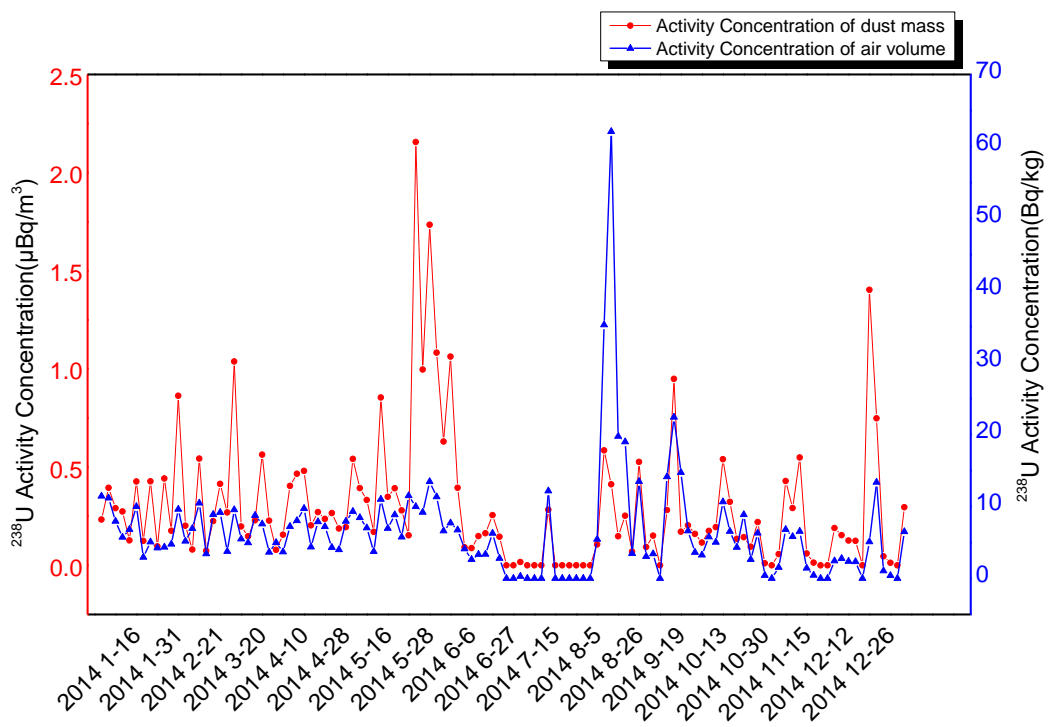


Fig. 10. Comparing the concentration of ^{238}U to air volume and dust mass.

Table 4. Analysis according to the weather phenomenon of ^{40}K in PM_{10} sample

	^{40}K		
	mg/kg	Bq/kg	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
AD(5)	1.24±0.64	328.05±169.23	40.89±23.20
HA(6)	0.61±0.26	162.56±69.33	18.29±17.73
FM(57)	0.53±0.33	140.08±88.61	5.58±6.24
NE(47)	0.51±0.36	133.90±96.43	5.85±4.67
All(115)	0.56±0.39	146.90±101.84	7.89±10.89

Table 5. Analysis according to the weather phenomenon of ^{232}Th in PM_{10} sample

	^{232}Th		
	mg/kg	Bq/kg	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
AD(5)	2.81±0.94	11.38±3.83	1.46±0.72
HA(6)	1.25±0.5	5.05±2.06	0.50±0.40
FM(57)	0.94±0.66	3.82±2.69	0.17±0.23
NE(47)	0.91±0.57	3.68±2.29	0.17±0.15
All(115)	1.03±0.73	4.16±2.98	0.25±0.37

Table 6. Analysis according to the weather phenomenon of ^{238}U in PM_{10} sample

	^{238}U		
	mg/kg	Bq/kg	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
AD(5)	0.87±0.14	10.71±1.72	1.37±0.55
HA(6)	0.65±0.32	7.99±3.90	0.50±0.44
FM(57)	0.62±0.80	7.58±9.83	0.24±0.24
NE(47)	0.37±0.25	4.52±3.08	0.19±0.16
All(115)	0.53±0.60	6.48±7.43	0.30±0.35

2.2 대기 중 부피에 따른 농도분석

다음은 대기 중 공기 부피에 따른 자연방사핵종 농도분석 결과를 Table 4 ~ 6에 정리하여 나타내었다. 시료 중 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 부피에 대한 평균 농도의 범위는 0.246 ~ 7.89 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 로 확인할 수 있었고 각각 핵종의 농도는 ^{40}K 은 0.06 ~ 78.14 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 7.89 \pm 10.89 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{232}Th 은 0 ~ 2.26 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 0.25 \pm 0.37 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{238}U 이 0 ~ 2.16 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 0.30 \pm 0.35 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)으로 측정되었다.

황사의 경우 채집된 시료 각각 핵종의 농도범위는 ^{40}K 은 16.88 ~ 78.14 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 40.89 \pm 23.21 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{232}Th 이 0.86 ~ 2.16 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 1.47 \pm 0.72 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{238}U 이 0.86 ~ 2.16 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 1.37 \pm 0.55 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) 로 측정되었다.

연무의 경우 1월, 2월, 12월에 각각 2개씩 관측됨에 따라 총 6개이며 각각 핵종의 농도범위는 ^{40}K 은 4.64 ~ 49.93 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 18.30 \pm 17.74 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{232}Th 은 0.18 ~ 1.23 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 0.50 \pm 0.40 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{238}U 의 경우 0.27 ~ 1.40 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 0.71 \pm 0.44 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) 로 측정됨에 따라 전체적으로 황사에 비해 ^{40}K 2.31 배, ^{232}Th 2.91배, ^{238}U 1.91배 정도 낮은 값으로 측정되었다.

박무 경우 농도범위는 ^{40}K 은 0.06 ~ 31.44 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 5.58 \pm 6.25 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{232}Th 은 0 ~ 1.25 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 0.17 \pm 0.23 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{238}U 의 경우 0 ~ 1.06 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 0.24 \pm 0.24 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)로 측정되었다. 이는 황사와 비교 하였을 때 ^{40}K 은 7.32배, ^{232}Th 은 8.47, ^{238}U 은 5.64배 정도 낮은 값으로 측정되었다.

마지막으로 비현상일의 농도범위는 ^{40}K 은 0.19 ~ 18.49 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 5.86 \pm 4.67 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{232}Th 은 0.003 ~ 0.67 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mean: 0.17 \pm 0.15 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{238}U 의 경우 0 ~ 0.63 (mean: 0.19 \pm 0.16 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)으로 측정되었다. 이는 황사기간의 농도와 비교하여 ^{40}K 은 6.98배, ^{232}Th 은 8.57배, ^{238}U 은 7.04배 정도 낮은 값으로 측정되었다.

다른 핵종과 비교하여 ^{40}K 의 농도가 높게 나오는 것을 확인할 수 있었고 황사가

집중되어있는 5월 26 ~ 29일 사이에 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 모두 높은 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 이를 통하여 대기 공기 중 부피에 대한 각각 핵종의 농도는 황사기간의 미세먼지(PM_{10})가 다른 기간에 비하여 많이 발생했음을 확인할 수 있다.

2.3 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 농도 비교분석

^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 농도 비는 지각에서 기원한 물질의 출처를 확인하는데 뒷받침이 된다. 따라서 각각 핵종의 비를 통해 각각 기상현상에 따라 나누어 분석해 보았다. 기상현상에 대한 미세먼지 중 각각 핵종의 비를 Table 7에 나타내었다. Table 7에서 2014년간 채집된 시료의 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 의 평균 농도 비는 0.64로 확인 할 수 있었다. 이는 UNSCEAR, 2000에서 조사된 세계 평균 ^{238}U 과 ^{232}Th 비 1.1에 과 비교해 차이를 확인 할 수 있었다. 하지만 황사기간의 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 를 확인결과 이에 근접한 1.062를 확인 할 수 있었고 연무, 박무, 비현상일 순으로 각각 0.63, 0.50 그리고 0.82로 확인 되어 ^{232}Th 의 농도보다 ^{238}U 의 농도가 높음을 확인 할 수 있었다. $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 의 비에서는 먼지 질량에 대한 농도와 공기부피에 대한 전체농도가 0.028, 0.031로 측정되었고 두 농도 모두다 황사기간이 높게 측정되었다. 하지만 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$ 의 비는 두 농도 모두 박무가 높게 측정되어 0.430, 0.054의 값으로 확인할 수 있었다. 이를 통해 황사기간에는 $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 농도는 높게 측정되었지만 $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 농도는 비교적 낮게 측정되었고 박무의 경우 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$ 의 농도는 낮게 측정되었지만 반대로 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$ 농도는 높게 측정된 것을 확인할 수 있었다.

Table 7 . Comparison of air volume and dust mass ratio of ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U nuclides

	$^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$		$^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	
	<i>volume ratio</i>	<i>mass ratio</i>	<i>volume ratio</i>	<i>mass ratio</i>	<i>volume ratio</i>	<i>mass ratio</i>
AD(5)	0.033	0.033	0.036	0.035	1.073	1.062
HA(6)	0.039	0.049	0.028	0.031	0.707	0.632
FM(57)	0.043	0.054	0.031	0.027	0.715	0.504
NE(47)	0.033	0.034	0.029	0.027	0.882	0.815
All	0.037	0.044	0.031	0.028	0.830	0.641

이들의 상관계수를 확인하기 위해 2014년간 질량에 대한 각각 핵종의 비를 Fig. 11 ~ 13에 나타내었다. Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 ^{238}U 과 ^{232}Th 의 상관계수 $R^2=0.049$ 로 측정되었고 ^{232}Th 과 ^{40}K 의 $R^2=0.426$ 로 측정되었다. 따라서 ^{232}Th 과 ^{40}K 의 상관관계는 다소 일치하는 것을 확인 할 수 있었지만 다른 핵종은 다소 차이를 확인 할 수 있었다. ^{238}U 의 경우 특정구간인 8월을 제외하고 크게 농도변화가 없으므로 비교적 기상현상에 따라 농도화의 영향이 미약하다고 판단된다.

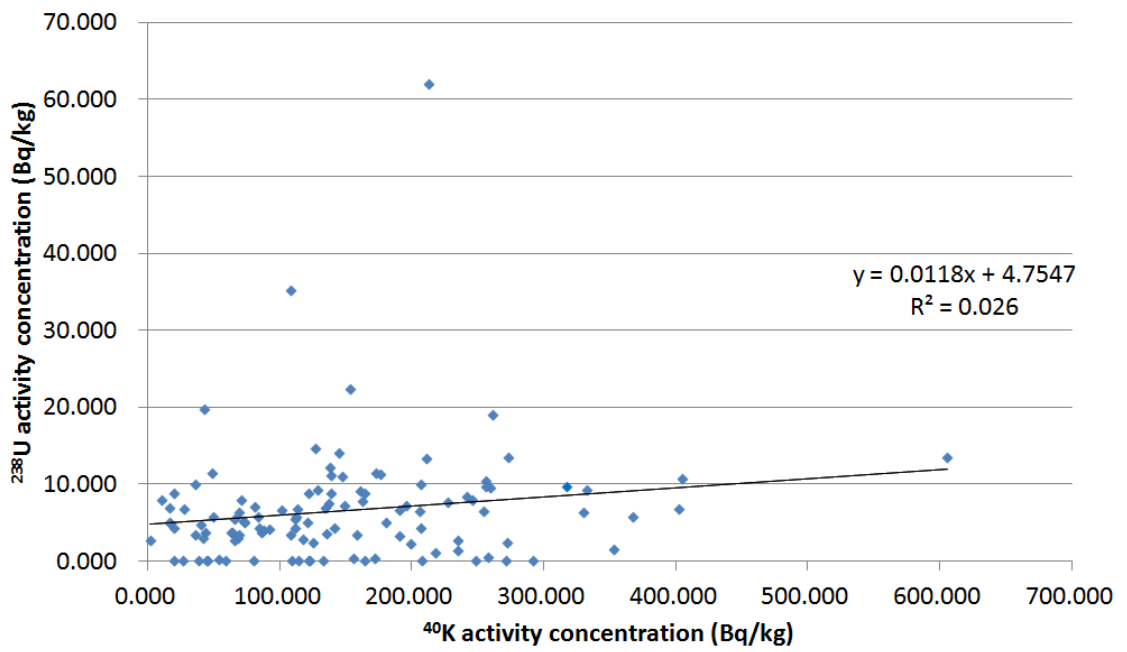


Fig. 11. Correlation between ^{238}U and ^{232}Th in PM_{10} aerosols.

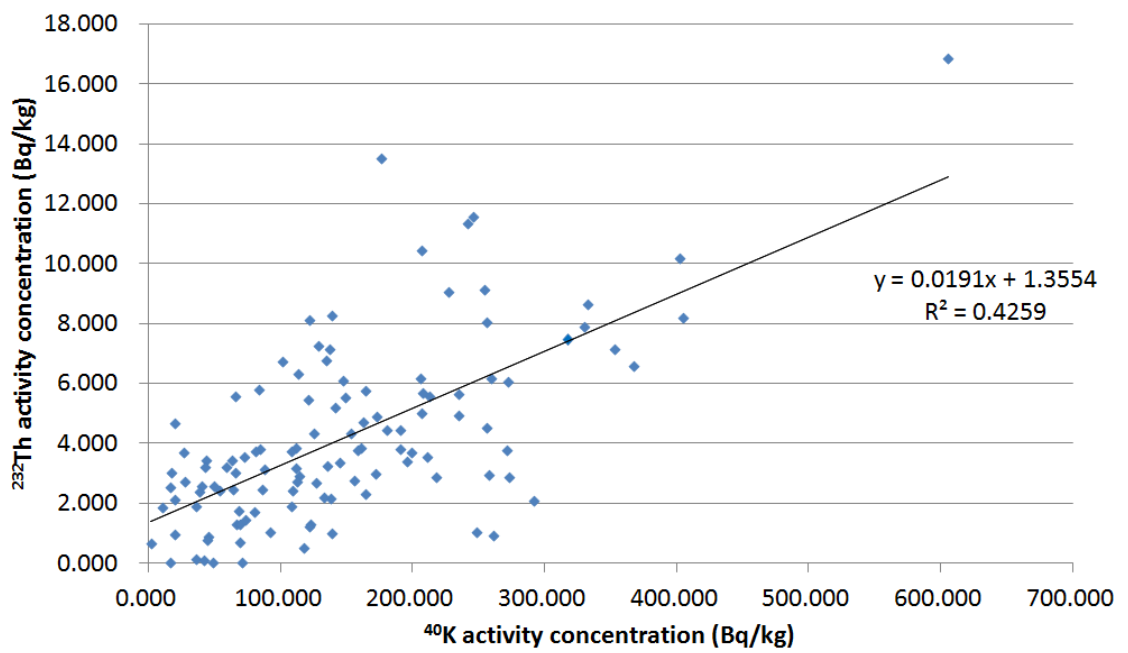


Fig. 12. Correlation between ^{40}K and ^{232}Th in PM_{10} aerosols.

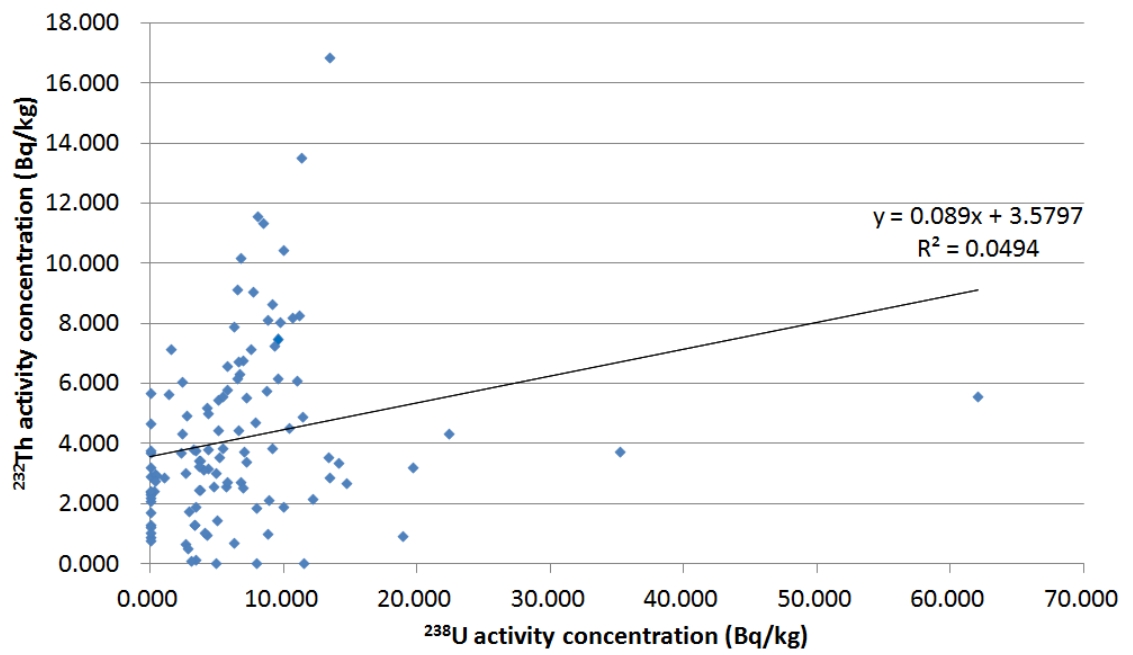


Fig. 13. Correlation between ^{238}U and ^{232}Th in PM_{10} aerosols.

3. 역 궤적 분석

2014년간 채집된 총 115개 시료를 미국 해양대기국 NOAA에서 제공하는 역궤적 분석 모델 HYSPLIT4를 통해서 분석하였다. 제주도는 주변이 해양으로 다른 대기 오염원이 거의 없어 외부에서 장거리로 유입되는 aerosol을 모니터링 하기에 적합한 지역이다. 따라서 본 연구에서는 역궤적 분석을 통하여 각각 Sector를 4개의 구역으로 나누어 중국(Sector I), 한반도 위쪽(Sector II), 일본(Sector III), 태평양(Sector IV)에서 유입된 aerosol에 따른 영향을 분석해 보았다.

다음은 각각 aerosol 유입경로에 따른 기상현상의 분포를 분석해 보았다. 이를 통해 기상현상에 대한 유입경로 비율 분석결과를 Table 8로 나타내었고 그 결과 황사 기간 중 Sector I 이 100%로 되었고 연무의 경우 Sector I 이 66% Sector II가 33.3%로 확인할 수 있었다. 박무의 경우 Sector I 38.6%, Sector II 24.6%, Sector III 22.8%, Sector IV 14.0% 그리고 비현상일의 경우 Sector I 48.9%, Sector II 40.4%, Sector III 10.6% 이고 전체적으로는 Sector I, II, III, IV의 비율이 34.8, 22.6, 11.6, 5.2 %로 확인할 수 있었다. 그리고 각각 Sector로 유입되는 aerosol 시료수는 Sector I에서는 54개의 시료가 유입되었고 Sector II는 35개, Sector III 18개, Sector IV는 8개로 확인되었다. 4개의 Sector에 따른 aerosol의 유입경로를 Fig. 14 ~ 17에서 확인 할 수 있다

Table 8. The rate of meteorological phenomena entering each sector

Sector	AD(n=5)	HZ(n=6)	FM(n=57)	NE(n=47)	All(n=115)
	Percent(%)				
I (n=54)	100.0	66.7	38.6	48.9	34.8
II (n=35)	0.0	33.3	24.6	40.4	22.6
III (n=18)	0.0	0.0	22.8	10.6	11.6
IV (n=8)	0.0	0.0	14.0	0.0	5.2

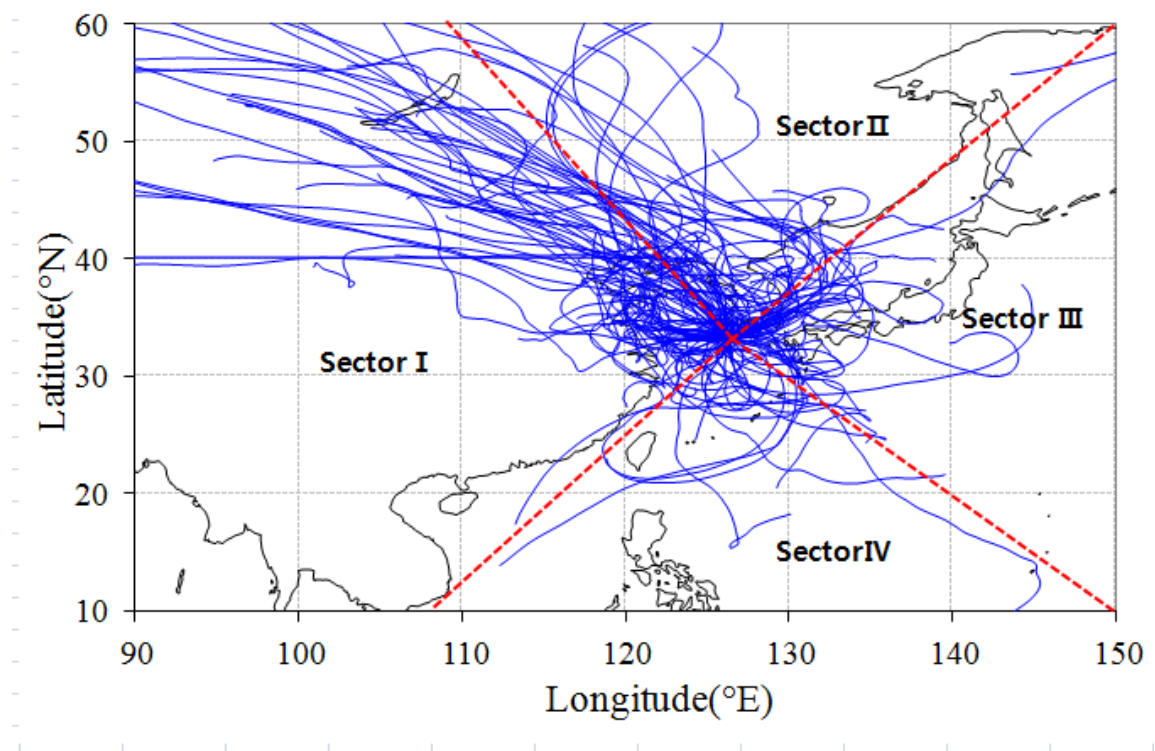


Fig. 14. The total reverse trajectory of the PM₁₀ sample measured in 2014.

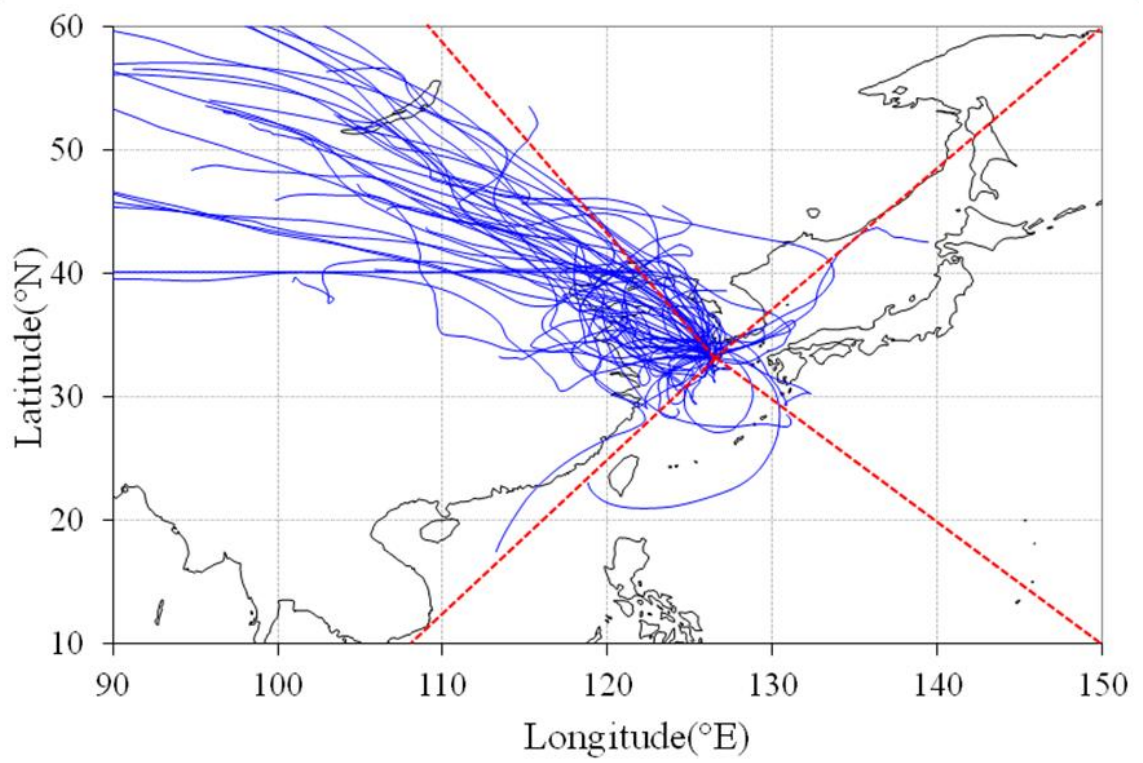


Fig. 15. The reverse trajectory of the sample entering sector I .

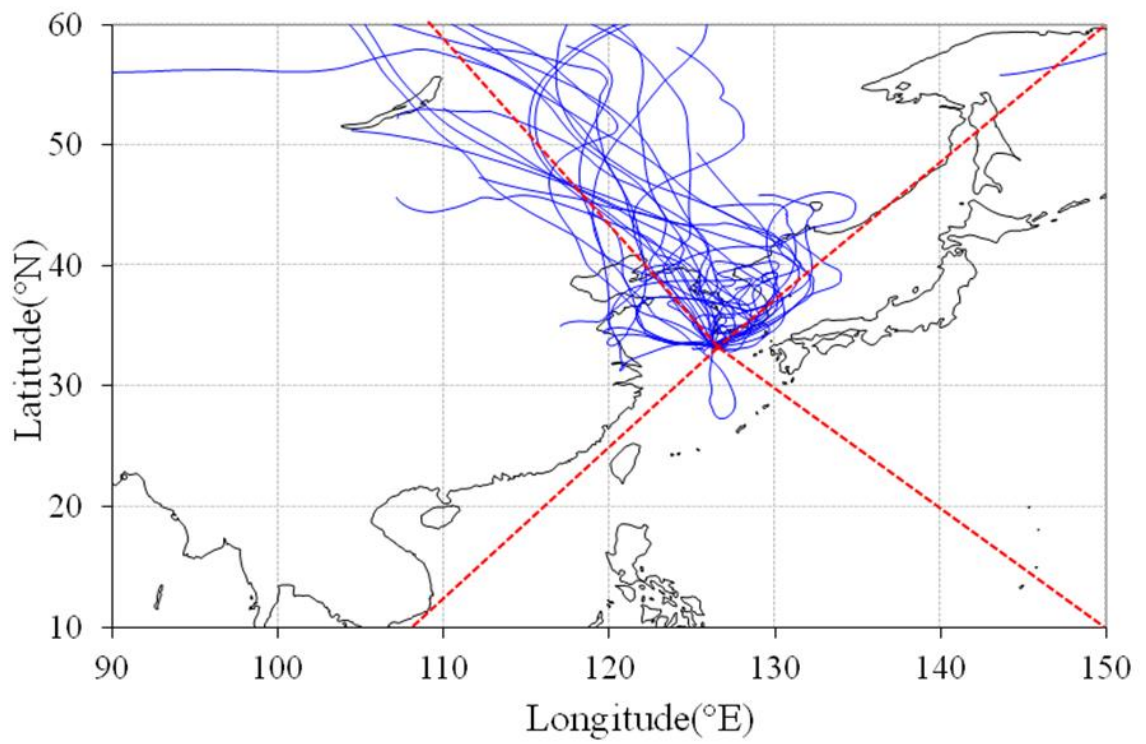


Fig. 16. The reverse trajectory of the sample entering sector II.

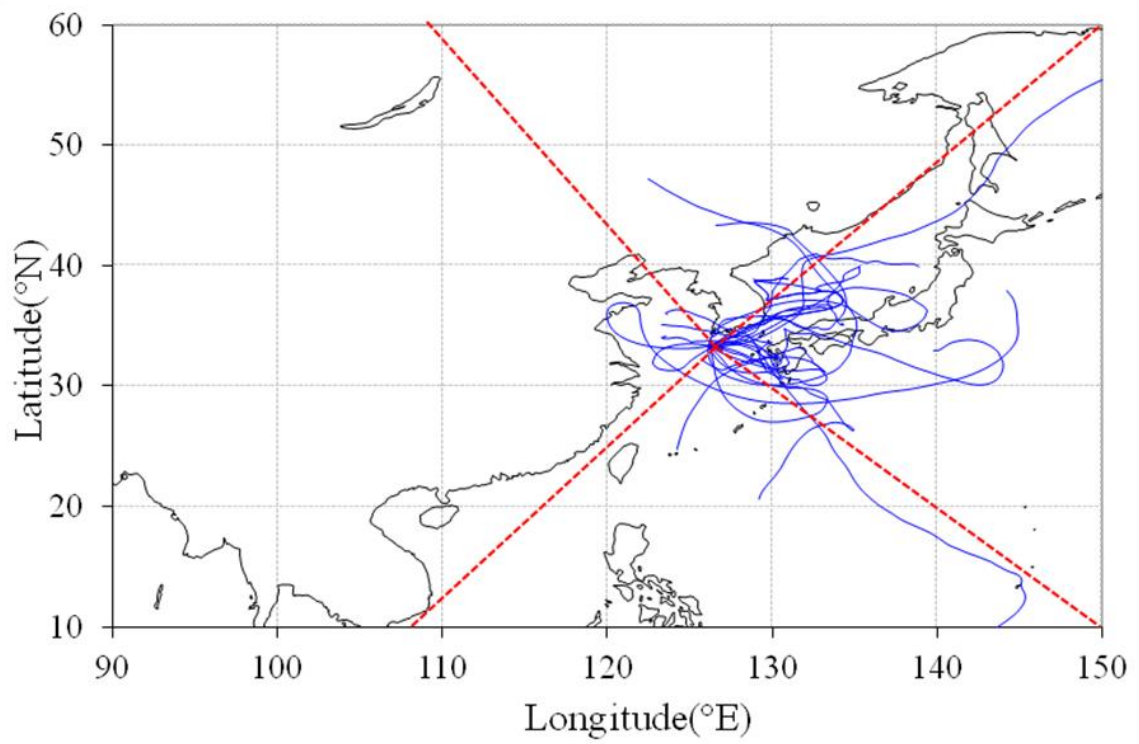


Fig. 17. The reverse trajectory of the sample entering sector III.

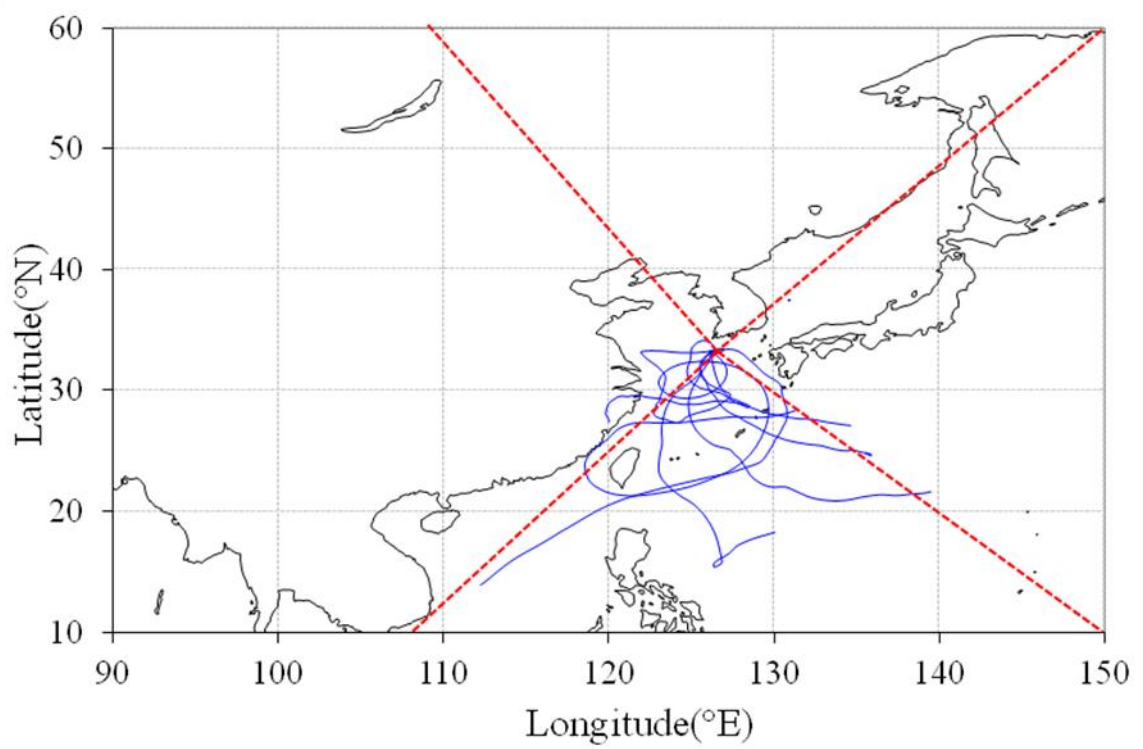


Fig. 18. The reverse trajectory of the sample entering sector IV.

Table 9. Concentration of nuclides according to air volume and dust mass of the sector

Sector	^{40}K		^{232}Th		^{238}U	
	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	Bq/kg	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	Bq/kg	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	Bq/kg
I	11.38±14.24	169.52±111.67	0.37±0.48	5.09±3.32	0.41±0.43	6.81±5.37
II	5.88±5.45	128.22±76.99	0.18±0.17	3.90±2.41	0.24±0.24	5.90±4.75
III	4.11±4.84	116.22±106.81	0.10±0.12	2.73±2.35	0.14±0.15	4.75±5.25
IV	2.10±1.40	144.96±99.42	0.03±0.02	2.21±1.71	0.09±0.16	10.75±21.75

4개의 Sector에 따라 각각 핵종의 농도를 Table 9로 나타내었다. 분석결과 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 평균 농도는 먼지 질량의 ^{238}U 농도를 제외하면 Sector I에서 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 모두 가장 높은 평균농도로 측정되었고 가장 낮은 농도를 가지는 유입경로는 Sector IV로 ^{232}Th , ^{40}K 의 공기 부피에 대한 평균농도 모두 가장 낮은 값으로 측정 하지만 질량농도 측면에서는 Sector IV에서 ^{238}U 의 농도가 8월의 14일 영향으로 인해 $10.75 \pm 21.75 \text{ Bq}/\text{kg}$ 으로 다른 유입경로보다 가장 높은 것으로 측정되었다.

각각 핵종의 비는 PM_{10} 의 기원을 추적하는데 도움이 되므로 공기 부피에 대해 그리고 먼지 질량에 대한 각각 핵종의 비를 Table 10과 Table 11에 나타내어 비교하였다. $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 각각 핵종의 공기 부피에 대한 농도 비와 먼지 질량에 대한 농도 비를 비교해본 결과 Sector I에서 공기 부피에 대한 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 의 농도 비는 0.036, 0.032로 확인 되었고 먼지 질량에 대한 $^{38}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 의 농도 비는 0.040, 0.030로 확인 할 수 있었다. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 의 공기 부피에 대한 농도비는 0.886로 나왔고 먼지 질량에 대한 농도 비는 0.747로 확인되었다. Sector II의 경우 먼지 질량에 대해 각각 핵종의 비는 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$ 의 경우 0.046, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 은 0.030, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 의 비율은 0.662으로 확인되었고 공기에 대한 부피농도는 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 는 0.042, 0.032, 측정되었다. Sector II에서는 공기의 부피에 대한 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 농도비가 0.762, 먼지 질량에 대한 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 의 농도 비 0.662로 Sector I 보다 낮아진 것을 확인할 수 있었다. Sector III는 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 전체적인 비율이 모두 감소 하

는 것을 확인 할 수 있었다. Sector IV의 경우 다른 유입경로와 다르게 부피 비와 질량 비 모두 $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 과 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 의 비는 감소하지만 반대로 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$ 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 10. The ratio of concentration to air volume of each sector

	$^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$
Sector I	0.036	0.032	0.886
Sector II	0.042	0.032	0.762
Sector III	0.034	0.025	0.713
Sector IV	0.044	0.014	0.328

Table 11. The concentration ratio of the dust mass of each sector

	$^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$
Sector I	0.040	0.030	0.747
Sector II	0.046	0.030	0.662
Sector III	0.041	0.024	0.575
Sector IV	0.074	0.015	0.205

4. 대기 중 Aerosol에 대한 연간 유효선량 평가

본 연구에서 측정된 PM₁₀의 각각 핵종(⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U)의 방사능 농도를 연간 유효선량으로 계산해 보았다. 그 결과를 다음 위에서 구한 공기 부피에 대한 각각 핵종의 평균 방사능 농도는 ⁴⁰K은 7.89 μBq/m³, ²³²Th은 0.25 μBq/m³, ²³⁸U의 경우 0.30 μBq/m³으로 측정되었고 이 결과를 식(3)에 대입하였고 호흡 기관으로부터 혈액에 순조롭게 흡수될 때 녹아 붙는 물질들의 유형인 F type으로 가정하여 실험을 진행하였다. 결과값은 Table 12과 같이 정리를 하였다.

각각 핵종 평균농도로 연간 유효선량 평가 결과 생후 3개월의 아이부터 성인 남성까지 17.56 ~ 83.74 nSv/y로 나타났고 그 중 15세 남성의 청소년이 가장 높은 83.74 nSv/y로 측정되었다. 그리고 핵종 ⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U의 연간 유효선량 그래프를 Fig. 19에 나타내었다. Fig. 19를 통해 확인해 본 결과 ²³²Th가 다른 ²³⁸U, ⁴⁰K 보다 연간 유효선량 평가에서 10배 이상 높은 값으로 측정되어 ²³²Th가 평가에 많은 부분을 기여하고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 12. Annual effective dose(nSv/y) calculated using the average concentration of each nuclide in 2014

	3m	1y	5y	10y	15y(M)	15(F)	Adult(M)	Adult(F)
⁴⁰ K	0.06	0.08	0.07	0.08	0.06	0.03	0.05	0.04
²³⁸ U	0.17	0.24	0.30	0.46	0.62	0.45	0.43	0.35
²³² Th	17.33	33.01	48.49	68.05	83.07	60.54	77.97	63.92
Total	17.56	33.32	48.86	68.59	83.74	61.02	78.45	64.31

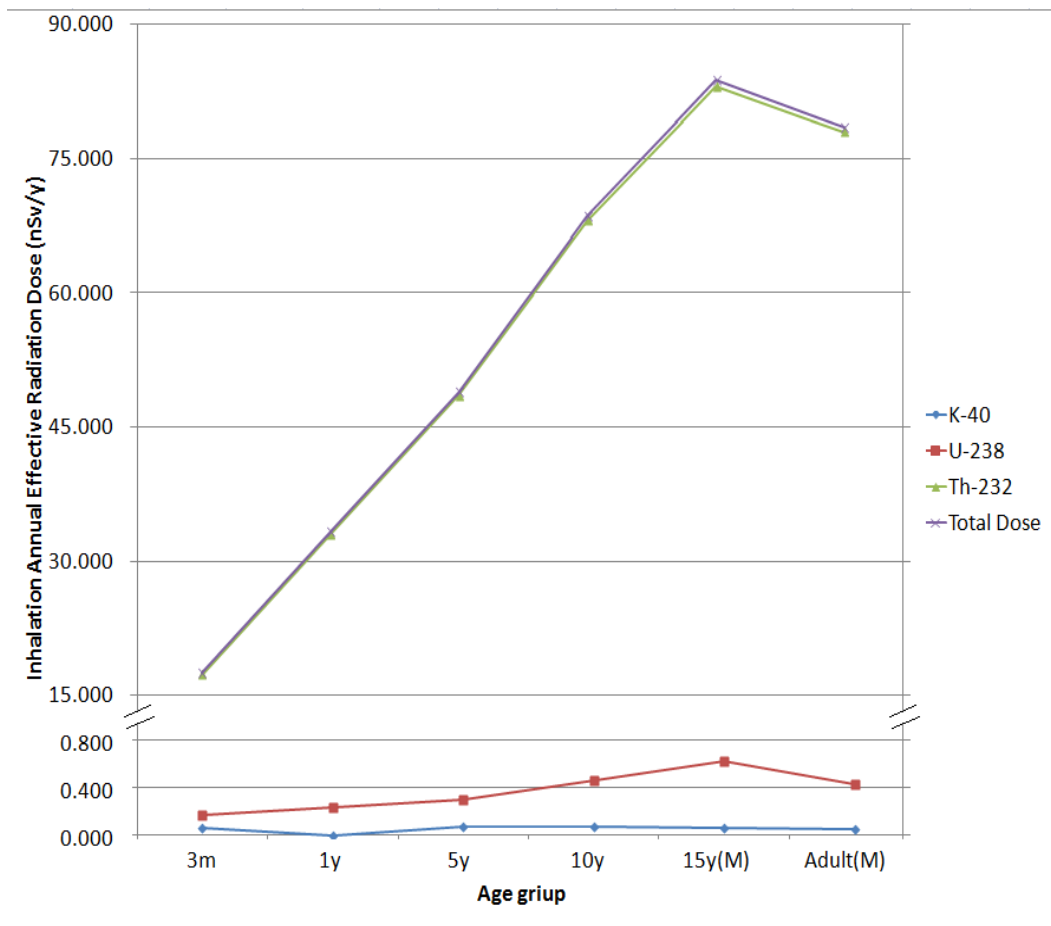


Fig. 19. Annual effective dose for type F and dose for ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U nuclide.

다음은 비 현상일과 황사의 각각 핵종의 평균 농도로 연간 유효선량 평가를 실시하였다. 그 결과 비현상일은 12.196 ~ 58.167 nSv/y의 값을 얻을 수 있었고 황사의 경우 104.497 ~ 498.842 nSv/y의 결과를 얻을 수 있었다. Table 13에서 현상별 비교 결과 황사의 연간유효선량 평가가 비 현상일 보다 약 8.6배 정도 높은 값으로 나온 것을 확인할 수 있었다.

Table 13. Annual effective dose comparison of Asia dust and Non-event

nSv/y	3m	1y	5y	10y	15y(M)	15(F)	Adult(M)	Adult(F)	
NE	⁴⁰ K	0.04	0.06	0.05	0.06	0.04	0.03	0.04	0.03
	²³⁸ U	0.11	0.15	0.20	0.30	0.40	0.29	0.28	0.23
	²³² Th	12.0	22.94	33.70	47.29	57.72	42.07	54.18	44.42
	Total	12.12	23.15	33.95	47.65	58.17	42.39	54.49	44.68
AD	⁴⁰ K	0.30	0.42	0.38	0.39	0.29	0.21	0.25	0.20
	²³⁸ U	0.80	1.09	1.38	2.13	2.85	2.08	1.97	1.73
	²³² Th	103.40	196.96	289.37	406.10	495.70	361.25	465.28	381.44
	Total	104.50	198.47	291.13	408.62	498.84	363.52	467.49	383.38

5. Radium Equivalent Activity (Ra_{eq})

다음 연구에서 PM_{10} 의 먼지 질량에 대한 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 농도를 라듐등가치수 계산식(4)을 통해 Ra_{eq} 를 구하였다. 그리고 계산 결과를 기상현상 황사, 연무, 박무, 비현상일로 나누어 Table 14에 정리하였고 먼지 질량농도, 공기 부피농도를 이용한 각각 라듐등가치수를 비교하기 위해 다음 Fig. 20에 나타내었다. 그 결과 먼지 질량에 대한 $3.716 \sim 86.43 \text{ Bq/kg}$ (mean: $23.722 \pm 14.52 \text{ Bq/kg}$)와 공기 부피에 Ra_{eq} 값은 $0.10 \sim 10.60 \mu\text{Bq/m}^3$ (mean: $1.26 \pm 1.64 \mu\text{Bq/m}^3$)을 얻을 수 있었다.

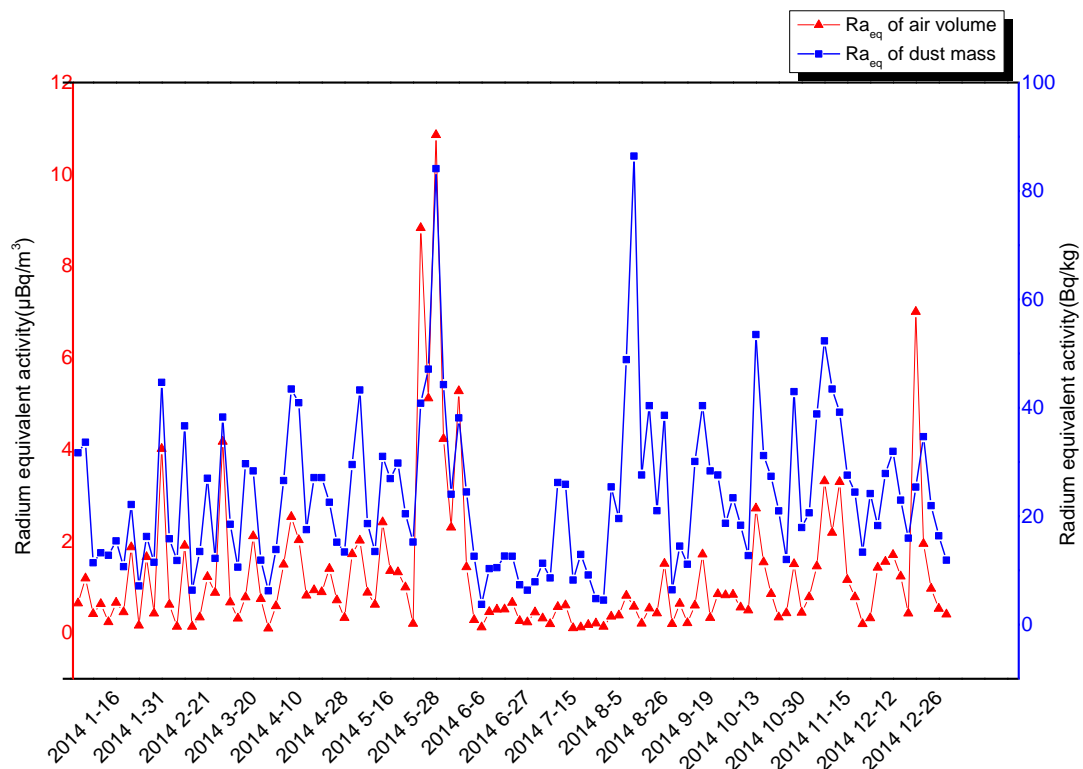


Fig. 20. Comparison of dust mass and air volume concentration of Ra_{eq} .

먼지의 질량에 대한 라듐 등가지수는 황사의 경우 40.85 ~ 84.18 Bq/kg (mean: 52.24 ± 18.00 Bq/kg) 이라는 결과를 얻을 수 있었으며 현상과 비교했을 때 평균값이 가장 높을 수치로 분석되었다. 하지만 2014년간 전체적인 라듐 등가지수 분석에서는 가장 높은 값이 박무에서 86.45 Bq/kg로 측정되었는데 이러한 결과의 원인은 ²³⁸U의 영향을 많이 받으므로 위의 Fig. 10에서 먼지에 대한 질량농도 분석 중 8월 중 ²³⁸U의 농도가 높은 peak를 가지는데 기인한 것으로 판단된다. 하지만 이 모두 토양에 대한 제한치인 370 Bq/kg에 보다 낮은 값으로 확인 할 수 있었다. 그리고 가장 낮은 값은 박무에서 3.72 Bq/kg 으로 확인 할 수 있었다.

다음은 공기 부피에 대한 라듐 등가지수를 계산한 결과 황사기간 중 4.02 ~ 10.86 μBq/m³ (mean: 6.61 ± 3.07 μBq/m³) 의 값을 얻을 수 있었고 이 또한 다른 현상과 비교하였을 때 가장 높은 값으로 측정되었다. 반면 가장 낮은 값은 박무 일 때 가장 낮은 값 0.098 μBq/m³ 으로 측정되었다.

Table 14. Ra_{eq} of each meteorological phenomenon on dust mass and air volume

	Ra_{eq}	
	Bq/kg	μBq/m ³
AD(5)	52.24 ± 18.00	6.61 ± 3.07
HA(6)	27.73 ± 9.72	2.84 ± 2.34
FM(57)	23.82 ± 15.08	0.92 ± 0.98
NE(47)	20.09 ± 10.20	0.89 ± 0.62
All	23.72 ± 14.52	1.26 ± 1.64

다음 라듐등가지수 Ra_{eq} 를 평가해본 결과 2014년간 평균 라듐 등가지수는 23.72 Bq/kg 으로 토양에서 세계 평균치인 89.0 Bq/kg 와 비교 하였을 때 약 3.7 배 정도 낮은 값으로 측정되었다(UNSCEAR, 1988). 그리고 공기 부피에 대한 라듐등가지수는

황사기간이 집중되어 있는 5월에 높은 값을 가지는 반면 먼지 질량에 대한 농도를 이용해 라듐등가지수를 계산해 본 결과 앞에서 설명했듯이 ^{238}U 의 농도가 높게 측정되는 8월 달 또한 높게 측정됨을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 국내의 배경지역이라고 도시권 aerosol의 영향을 거의 받지 않는 제주도 고산지역에서 2014년 1월부터 12월까지 총 115개의 시료를 채집 하였다. 그리고 EPA-IO-3.1 방법을 참고하여 전처리를 실시하였고 ICP-DRC-MS기기를 이용해 측정을 실시 하였다.

본 연구에서 연구 기간 동안 PM_{10} 의 전체 평균 질량 농도는 46.31 mg/kg 이었다. 그리고 PM_{10} 중 ^{40}K , ^{232}Th 및 ^{238}U 의 질량 평균 농도는 각각 0.56, 1.03 및 0.53 mg / kg 이었다.

다음 각각 핵종의 측정결과로 핵종의 먼지 질량에 따른 농도분석과 대기 중 공기 부피에 대한 농도분석을 진행하였다. 우선 먼지 질량에 따른 방사능 농도분석 결과 ^{40}K 의 경우 1.94 ~ 605.76 Bq/kg (mean: 146.90 \pm 101.84 Bq/kg), ^{232}Th 의 경우 0 ~ 16.86 Bq/kg (mean: 4.16 \pm 2.98 Bq/kg), ^{238}U 의 경우 0 ~ 62.07 Bq/kg (mean: 6.48 \pm 7.43 Bq/kg)로 확인할 수 있었다. 그 중 ^{238}U 의 경우 다른 ^{232}Th 와 ^{40}K 와 다르게 황사기간에도 농도 값이 크게 변하지 않는 것을 확인 할 수 있었지만 8월 중 8일 14일 17일 농도가 크게 오르는 현상을 확인 할 수 있었다. 이를 분석해 결과 채집된 당일의 해당 기상은 박무 현상이었지만 역궤적 결과가 각각 다른 Sector I, IV, III 로 확인되었다. 따라서 해당결과는 다른 요인에 의한 증가로 판단된다.

공기 부피에 대한 농도분석결과 각각 핵종의 부피에 대한 평균 방사능 농도의 범위는 0.25 ~ 7.894 $\mu Bq/m^3$ 로 확인할 수 있었고 각각 핵종들의 농도는 ^{40}K 은 0.06 ~ 78.14 $\mu Bq/m^3$ (mean: 7.89 \pm 10.89 $\mu Bq/m^3$), ^{232}Th 은 0 ~ 2.26 $\mu Bq/m^3$ (mean: 0.25 \pm 0.37 $\mu Bq/m^3$), ^{238}U 이 0 ~ 2.16 $\mu Bq/m^3$ (mean: 0.30 \pm 0.35 $\mu Bq/m^3$)으로 측정되었다. 본 실험 결과는 모두 황사기간에 핵종 모두가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 각각

현상별 황사에 대하여 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 농도가 연무의 경우 ^{40}K 2.31 배, ^{232}Th 2.91배, ^{238}U 1.91배, 박무 ^{40}K 은 7.32배, ^{232}Th 은 8.47, ^{238}U 은 5.64배, 비현상일이 ^{40}K 은 6.98배, ^{232}Th 은 8.57배, ^{238}U 은 7.04배 농도 값이 낮게 나오는 것으로 확인되었다.

이런 먼지 질량에 대한 농도와 공기 부피에 대한 측정 결과 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 는 부피에 대한 농도와 비교했을 때 ^{238}U 의 질량농도와 비교하여 부피농도 값이 황사, 연무, 박무 비 현상일 순서로 0.13, 0.09, 0.03, 0.05배로 측정되었고 다른 핵종 ^{232}Th 은 0.13, 0.10, 0.05, 0.05배 그리고 ^{40}K 이 0.13, 0.11, 0.04, 0.05배와 같이 서로 비슷한 측정되었다. 그리고 Table 7에서 먼지 질량에 대한 전체 평균 농도 비는 0.64로 확인 할 수 있었다. UNSCEAR, 2000에서 조사된 세계 평균 비율인 1.1에 과 다소 차이가 있음을 확인 할 수 있었다. 반면 황사기간의 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 를 확인결과 이에 근접한 1.062를 확인 할 수 있었고 연무, 박무, 비현상일 순으로 각각 0.63, 0.50 그리고 0.82로 확인되어 ^{232}Th 의 농도보다 ^{238}U 의 농도가 높음을 확인 할 수 있었다. 각각 핵종의 상관관계를 조사한 결과 그리고 ^{232}Th , ^{40}K 의 농도비가 비례 가장 하여 측정된 것을 확인 할 수 있었다. ^{238}U 의 경우 특정구간인 8월을 제외하고 크게 농도변화가 없으므로 비교적 기상현상에 따라 농도변화의 영향이 미약하다고 판단된다.

다음 유입경로를 4개로 나누어 2014년간 채집된 총 115개 시료를 미국 해양대기국 NOAA에서 제공하는 역궤적 분석 모델 HYSPLIT4를 통해서 분석한 결과 4개의 Sector에 따른 분석결과 핵종 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 평균 농도는 Sector I 에서 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 모두 가장 높은 평균농도로 측정되었고 가장 낮은 농도를 가지는 유입경로는 Sector IV로 ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U 의 공기 부피에 대한 평균농도 모두 가장 낮은 값으로 측정 하지만 질량농도 측면에서는 Sector IV에서 ^{238}U 의 농도가 $10.75 \pm 21.75 \text{ Bq/kg}$ 으로 다른 유입경로보다 가장 높은 것으로 측정되었다. 그리고 각각 Sector의 시료개수는 Sector I에서는 54개의 시료가 유입되었고 Sector II는 35개, Sector III 18개, Sector

IV는 8개로 분석되었다. 유입경로의 농도나 유입경로를 통해 들어온 시료 수로 보아 2014년 제주 고산지역의 대기 aerosol이 Sector I의 영향을 가장 크고 SectorIV의 영향이 가장 낮다고 판단된다.

다음은 기상현상에 따른 유입경로의 비율과 그에 따른 대기 중 공기부피에 대한 농도 분석을 실시하였다. 그 결과 황사기간 중 Sector I이 100%로 되었고 연무의 경우 Sector I이 66% SectorII가 33.3%로 확인할 수 있었다. 박무의 경우 Sector I 38.6% SectorII 24.6 SectorIII 22.8% SectorIV 14.0 그리고 비현상일의 경우 Sector I 48.9% SectorII 40.4 SectorIII 10.6%로 확인되었으며 황사의 경우 100% 비율로 있는 Sector I에서 유입되므로 Table 7의 비와 Sector I의 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 핵종의 비율과 비교해 보았다. 그 결과 공기 부피에 대한 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 의 농도는 0.036, 0.032와 비슷한 농도 비율인 0.033, 0.036으로 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 의 경우 Sector I은 0.886로 나왔고 황사가 보다 높은 비율인 1.073 확인되었다. 그리고 먼지 질량에 대한 해당 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 의 비율은 공기에 대한 부피농도의 비는 비슷하게 0.033, 0.035, 1.062로 측정되었다. 이는 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 0.886로 황사가 보다 높은 비율인 1.062과 다소 차이를 확인할 수 있는데 이는 황사의 발생지에 의한 미세먼지의 농도 차이로 판단된다.

위에서 구해진 각 핵종의 공기 부피당 농도를 이용하여 연간 유효선량 평가를 실시하였다. F type(fast rate of absorption) 호흡 기관으로부터 혈액에 순조롭게 흡수될 때 녹아 붙는 물질들의 유형을 사용하여 다음 연간 유효선량을 구한 결과 생후 3개월의 아이부터 성인 남성까지 17.56 ~ 83.74 nSv/y로 나타났고 그 중 15세 남성의 청소년이 가장 높은 83.74 nSv/y로 측정되었다. 본 연구에서 연간 유효선량에 가장 영향력을 가지는 핵종은 ^{232}Th 로서 다른 ^{238}U , ^{40}K 보다 연간 유효선량 평가 10배 이상 높은 수치로 확인 할 수 있었다.

본 연구에서 생물학적 위험지수로 나타내는 방법 중 하나로 사용되는 라듐 등가 지수를 계산하여 토양에 대한 세계 평균의 라듐등가지수인 89.0 Bq/kg 와 비교해본 결과 2014년간 평균 라듐 등가지수는 23.72 ± 14.52 Bq/kg 로 확인되었고 가장 높은 값이 84.18 Bq/kg로 측정되었으며 가장 낮은 값은 3.72 Bq/kg으로 확인 할 수 있었다. 이러한 결과값으로 세계 평균 라듐등가지수와 비교해본 결과 최대치 84.18 Bq/kg는 비슷한 수치로 확인 할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 측정된 라듐등가지수 평균치는 23.72 Bq/kg로 토양에 대한 라돈 제한치인 370 Bq/kg 보다 낮은 값으로 측정 되었다.

본 연구를 진행한 제주도 고산지역은 국내의 배경지역으로서 국내에 유입되는 부유물질을 오염원에 방해를 거의 받지 않고 측정할 수 있는 장소이다. 본 연구에서는 미세먼지(PM₁₀)에 대한 연구를 진행하였고 이를 역계적, 연간 유효선량 평가, 라듐등가지수, 그리고 각각 핵종의 비를 통해 유입된 미세먼지가 가지는 국내에 대한 영향력의 기초자료가 될 수 있음을 확인하였다. 빈번하게 발생하는 미세먼지에 대해서 좀 더 정확한 영향력을 평가하려면 좀 더 세부적이고 심화하여 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

UNSCEAR, Sources And Effects Of Ionizing Radiation, Volume I: Sources, Report to the General Assembly Scientific Annexes A and B, 1-6, 2008.

UNSCEAR, Sources, Effects And Risks Of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General Assembly, with annexes, 41-80, 1988.

H.A. Al-Trabulsy, A.E.M. Khater, F.I. Habbani, Radioactivity levels and radiological hazard indices at the Saudi coastline of the Gulf of Aqaba. Radiation Physics and Chemistry 80, 343-348, 2011.

NCRP Report No. 94 Exposure of the Population in the United States and Canada from Natural Background Radiation, Recommendations of the national council on radiation protection and measurements, 48-67, 1987.

H.Y. Jo, C.H. Kim, Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena, Atmosphere, 20(2), 161- 172, 2010.

T. Nakajima, S.C. Yoon, V. Ramanathan, G.Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B.J. Sohn, S.W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.H. Lin, C.T. Lee, D. Goto, and N. Schutgens, Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. Journal of Geophysical Research Vol. 112, D24591, doi: 10.1029/2007JD009009.,2007

EPA, IO-3.1, Selection, Preparation and Extraction of Filter Material Extraction Solution, 1-15, 1999.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly. In: Sources and Effects of Ionizing Radiation, vol. I. New York, 35-38, 2000.

ICRP, The International Commission on Radiological Protection, Basic Anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. ICRP publication 89. Ann. ICRP 32 (3-4), 2002.

ICRP, The International Commission on Radiological Protection, Compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60. ICRP publication 119. ICRP 41, 2012.

B.J. Huebert, T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. Journal of Geophysical Research Vol. 108, No. D23, 8633, doi: 10.1029/2003JD003550, 2003.

A.Z. Mohamed, M.A. Hani, I.A. Mohammed, Journal of Environmental Radioactivity: Determination of ^{40}K , ^{232}Th and ^{238}U activity concentrations in ambient $\text{PM}_{2.5}$ aerosols and the associated inhalation effective dose to the public in Jeddah City, Saudi Arabia, 148-155, 2014.

Sam, A.K and Abbas, N, Assessment of radioactivity and associated hazards in local and imported cement types used in Sudan. Radiation Protection Dosimetry 88, 225-260, 2010.

UNSCEAR, SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION, United Nations
Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General
Assembly, with annexes, 1988.

감사의 글

석사과정을 시작한지 어느덧 2년이라는 시간이 흘러 이제 그 끝을 마무리 하는 때가 가까이 다가왔습니다. 그 2년이라는 시간 동안 부족함이 많은 저에게 많은 도움을 주신 분들께 감사의 인사와 고마운 마음을 전하고자 합니다.

먼저 석사과정에 있어 기초적인 지식과 학문의 길의 방향에 대해서 지도해주신 박재우 교수님께 진심을 담아 감사의 인사를 드립니다. 그리고 기본적인 연구자세와 본 논문에 대한 많은 지식과 정보를 알려주신 한충훈 박사님께 2년 동안 정말로 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다. 그리고 저의 논문심사 위원장을 맡아주시고 아낌 없는 충고와 조언을 해주신 최수석 교수님께도 다시 한번 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

지금은 먼저 졸업 떠나간 나의 친구들 이영규와 오정민 그리고 지금 제주지방측 정소의 김덕우형에게 나의 인생에 깊이 새길 수 있는 추억을 만들어 주어서 고맙다는 인사를 전하고 싶습니다. 그리고 RI실험실에서 같이 웃으며 같이 지냈던 양우석, 이호진, 좌민경, 한민희, 김주현, 그리고 막내인 박성민 이 학생들에게 고마움을 전합니다.

대학원생들의 편의를 위해 힘써준 과거 학과 사무실의 조교를 하신 박경호, 모용현 조교 형들과 현재 조교를 하고 있는 강제원, 강경운 조교에게 감사의 말을 전하고 싶습니다. 그리고 이번에 같이 졸업하게 되는 15학번 대학원 동기들에게 졸업을 축하한다는 말을 전합니다. 그리고 16학번 대학원생들에게 남은 1년 동안 보람찬 대학원 생활이 되기를 바란다는 격려의 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 제 인생의 곁에서 때때로 따뜻한 안식처가 되어주시고 때때는 인생에 길잡이가 되어주시는 사랑하는 나의 어머니, 아버지에게 사랑과 믿음으로 지켜봐 주

셔서 감사하고 사랑한다는 말씀을 드리고 싶습니다. 이 외에도 언급되지는 않았지만 감사의 인사를 전하고 싶은 분들이 많습니다.

이제 저는 사회라는 입구에 들어섰습니다. 지난 대학과 대학원 생활을 하면서 배운 것들을 이용해서 앞으로 점점 발전하는 모습을 보여드리겠습니다. 끝으로 저에게 도움과 격려를 주신 모든 분들에게 감사의 마음을 담아 본 논문을 바칩니다.