

KINS/HR-504

식품중 Th-230, Th-228 농도분포
특성 연구(I)

Distribution of Th-230 and Th-228 in Food (I)

2003. 3.

연구기관
경북대학교

한국원자력안전기술원

제 출 문

한국원자력안전기술원장 귀하

본 보고서를 “식품중 Th-230, Th-228 농도분포 특성 연구(Ⅰ)”의 연구보고서로 제출합니다.

2003. 3. 31

연구기관명 : 경북대학교

연구책임자 : 강 희 동

연구 원 : 김 도 성

김 완

임 수 경

최 민 석

김 찬 중

정 용 철

요 약 문

I. 제 목

식품중 Th-230, Th-228 농도분포 특성 연구(Ⅰ)

II. 연구개발의 목적과 필요성

식품중의 자연방사성핵종은 섭취에 의해 인체 내부피폭의 원인이 되므로 식품류 중의 자연방사성핵종의 방사능농도를 측정하고, 이로 인한 내부피폭선량을 평가하여야 한다. 현재까지 국내 식품류중의 자연방사성핵종 특히 Th의 방사능 농도는 측정된 바가 없어 이에 대한 연구가 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 식품중의 토륨을 분리 추출하기 위한 화학전처리법과 알파분광 분석에 의한 토륨의 정량분석법을 확립하며, 이를 토대로 전국 각지에서 채취한 우유(26개 시료), 고기(돼지고기 12개, 쇠고기 12개, 닭고기 12개), 곡물류(밀 12개, 콩 13개, 쌀 13개) 등 100 개 식품류 시료의 Th-230 과 Th-228 농도 분포를 조사하였다. 또한 시료중 Th 방사능농도의 지역적 분포특성을 조사함과 아울러 이들 식품류의 섭취에 의한 내부피폭선량을 평가한다.

IV. 연구개발결과

본 연구에서는 통상의 이온교환법에 옥살산 공침을 추가하여 시료중의 P성분을 제거함으로써 식품류 시료중의 토륨을 효과적으로 분치 추출할 수 있는 화학전처리법을 확립하였다.

본 연구에서 우유, 육류 및 곡류의 Th 방사능농도 측정결과는 다음과 같다. 우유의 Th-228은 0.51~8.52 mBq/kg-fresh, Th-230은 0.14~2.45 mBq/kg-fresh, Th-232는 0.01~2.46 mBq/kg-fresh의 범위였다. 돼지고기의 Th-228은 1.57~18.0 mBq/kg-fresh, Th-230은 2.98~8.97 mBq/kg-fresh, Th-232는 0.25~9.32 mBq/kg-fresh의 범위였으며, 쇠고기의 Th-228은 4.43~103 mBq/kg-fresh, Th-230은 1.94~9.80 mBq/kg-fresh, Th-232는 1.02~5.34 mBq/kg-fresh의 범위였으며, 닭고기의 Th-228은 4.03~67.2 mBq/kg-fresh, Th-230은 1.22~13.0 mBq/kg-fresh, Th-232는 0.56~4.98 mBq/kg-fresh의 범위였다. 밀의 Th-228은 54.1~235 mBq/kg-fresh, Th-230은 0.53~14.4 mBq/kg-fresh, Th-232는 0.53~20.0 mBq/kg-fresh의 범위였으며, 콩의 Th-228은 133~980 mBq/kg-fresh, Th-230은 8.44~91.6 mBq/kg-fresh, Th-232는 2.30~42.2 mBq/kg-fresh의 범위였으며, 쌀의 Th-228은 2.91~68.7 mBq/kg-fresh, Th-230은 0.43~2.35 mBq/kg-fresh, Th-232는 0.32~2.54 mBq/kg-fresh의 범위였다. 대부분의 시료에서 Th-228의 방사능 농도가 Th-230이나 Th-232보다 매우 높게 나타났는데, 이는 시료의 특성과 함께 시료채취시간과 측정시간과의 시간차가 많음으로 인하여 시료내의 Ra-228과 Ac-228로부터의 내부생성(ingrowth)의 영향이 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다.

본 연구에서 조사한 식품류의 Th에 의한 총 내부피폭선량은 우유, 돼지고기, 쇠고기, 닭고기, 밀, 콩, 쌀에 대해 각각 0.013, 0.009, 0.026, 0.023, 0.023, 0.045, 0.146 μ Sv/y로서, 주식인 쌀에 의한 내부피폭선량이 가장 높게 나타났다.

V. 연구개발결과의 활용계획

따라서 금번의 연구결과는 ① 자연방사성핵종에 의한 환경방사능 분석 및 평가의 기초자료로 활용될 수 있으며, ② 자연방사성핵종에 대한 식품류의 안정성 조사 연구와 ③ 우리나라 국민의 방사선 위해도 평가에 활용할 계획이다.

SUMMARY

I. PROJECT TITLE

Distribution of Th-230 and Th-228 in Food (I)

II. OBJECTIVE and IMPORTANCE of the PROJECT

Natural radioisotopes contained in foods can enter the human body by ingestion and contribute to internal doses to the population. It is necessary to measure the concentration of natural radioisotopes especially thorium in Korean foods and estimate the internal doses.

III. Scope and Contents of the Project

The concentrations of natural radioisotopes in Korean foods are measured to assess the environmental radiation and internal dose. In this study, we have established thorium measuring process based on the thorium extraction chemical process and alpha spectroscopic method. The concentration of Th-228, Th-230 and Th-232 in milk, meats(pork, beef and chicken) and grain(wheat, bean and rice) are measured and internal doses are estimated.

IV. Results and Recommendations for Application

In this study, concentrations of Th in Korean foods(milk, meat, grain) are measured with the method of calcium oxalate co-precipitation in addition to the conventional ion-exchange method and alpha spectroscopic measurement.

The concentrations of Th-228, Th-230 and Th-232 in milk were in the range of 0.51~8.52 mBq/kg-fresh, 0.14~2.45 mBq/kg-fresh and 0.01~2.46 mBq/kg-fresh, respectively. The concentrations of Th-228, Th-230 and Th-232 in the pork were in the range of 1.57~18.0 mBq/kg-fresh, 2.98~8.97 mBq/kg-fresh and 0.25~9.32 mBq/kg-fresh, respectively. The concentrations of Th-228, Th-230 and Th-232 in the beef were in the range of 4.43~103 mBq/kg-fresh, 1.94~9.80 mBq/kg-fresh and 1.02~5.34 mBq/kg-fresh, respectively. The concentrations of Th-228, Th-230 and Th-232 in the chicken were in the range of 4.03~67.2 mBq/kg-fresh, 1.22~13.0 mBq/kg-fresh and 0.56~4.98 mBq/kg-fresh, respectively. The concentrations of Th-228, Th-230 and Th-232 in the wheat were in the range of 54.1~235 mBq/kg-fresh, 0.53~14.4 mBq/kg-fresh and 0.53~20.0 mBq/kg-fresh, respectively. The concentrations of Th-228, Th-230 and Th-232 in the bean were in the range of 133~980 mBq/kg-fresh, 8.44~91.6 mBq/kg-fresh and 2.30~42.2 mBq/kg-fresh, respectively. The concentrations of Th-228, Th-230 and Th-232 in the rice were in the range of 2.91~68.7 mBq/kg-fresh, 0.43~2.35 mBq/kg-fresh and 0.32~2.54 mBq/kg-fresh , respectively.

The annual internal dose due to Th in the milk was also estimated and was in the range of 0.004 to 0.013 μ Sv/y. The annual internal dose due to milk in this study was much lower than that of other countries because of little intake of milk of Korean compare to other countries.

The results of this study may be used as environmental radiation research and applied to the safety research of foods and radiation risk of population.

CONTENTS

| | |
|---|----|
| Chapter 1. Introduction | 1 |
| Section 1. Background and Importance..... | 1 |
| 1. Technical Viewpoint | 1 |
| 2. Economical Viewpoint | 2 |
| 3. Social Viewpoint..... | 3 |
| Section 2. Scope..... | 3 |
| Chapter 2. Status of the Arts..... | 5 |
| Section 1. National Status | 5 |
| Section 2. International Status | 5 |
| Chapter 3. Results and Discussions..... | 7 |
| Section 1. Physical Properties of Thorium | 7 |
| Section 2. Chemical Process for Thorium Separation..... | 10 |
| 1. Chemical Process for Thorium Separation..... | 10 |
| 2. Removal of Phosphor by Calcium Oxalate Co-precipitation..... | 14 |
| Section 3. Measurement of Thorium by Alpha Spectrometry..... | 16 |
| 1. Measurement of Alpha Spectrum..... | 16 |
| 2. Calculation of Activity..... | 17 |
| Section 4. Some Considerations on Successive Decay..... | 23 |
| 1. Successive Decay of Radioisotopes | 23 |
| 2. Simulation Program for Successive Decay..... | 24 |
| 3. Activity of Thorium by Successive Decay | 28 |
| Section 5. Samples..... | 32 |
| Section 6. Thorium Distribution in Foods..... | 36 |
| 1. Thorium in Milk | 36 |
| 2. Thorium in Meats | 40 |
| 3. Thorium in Grain | 49 |

| | |
|--|----|
| Section 7. Internal Dose by Th in Foods..... | 58 |
| 1. Calculation of Internal Dose..... | 58 |
| 2. Internal Dose by Th in Foods..... | 59 |
| Section 8. Discussions..... | 62 |
| Chapter 4. Extent of the Achievements and Contributions..... | 64 |
| Chapter 5. Applications..... | 66 |
| Chapter 6. References..... | 67 |

목 차

| | |
|----------------------------------|----|
| 제1장 연구개발과제의 개요 | 1 |
| 제1절 연구개발의 목적 및 필요성 | 1 |
| 1. 기술적 측면..... | 1 |
| 2. 경제·산업적 측면 | 2 |
| 3. 사회·문화적 측면 | 3 |
| 제2절 연구개발의 목표 및 범위..... | 3 |
| 제2장 국내·외 기술개발 현황..... | 5 |
| 제1절 국내 연구개발현황과 전망 | 5 |
| 제2절 국외 연구개발현황..... | 5 |
| 제3장 연구개발수행 내용 및 결과 | 7 |
| 제1절 Th의 물리적 특성..... | 7 |
| 제2절 식품중 Th 측정을 위한 화학전처리..... | 10 |
| 1. 식품중 Th 분리를 위한 화학전처리 절차..... | 10 |
| 2. 옥살산 침전에 의한 인 성분의 제거효과..... | 14 |
| 제3절 Alpha 분광법에 의한 Th의 정량분석 | 16 |
| 1. α 스펙트럼의 측정 | 16 |
| 2. 방사능농도의 계산..... | 17 |
| 제4절 방사성핵종의 연속붕괴에 대한 고찰 | 23 |
| 1. 방사성핵종의 연속붕괴 | 23 |
| 2. 연속붕괴 Simulation 프로그램 | 24 |
| 3. 연속붕괴에 의한 Th-228의 방사능 변화 | 28 |
| 제5절 시료채취..... | 32 |
| 제6절 식품류의 Th 방사능농도의 분포특성 | 36 |
| 1. 우유의 Th 분포특성 | 36 |
| 2. 육류의 Th 분포특성 | 40 |
| 3. 곡류의 Th 분포특성 | 49 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 제7절 식품중 Th에 의한 내부피폭선량 | 58 |
| 1. 내부피폭선량의 계산..... | 58 |
| 2. 식품중 Th에 의한 내부피폭선량 | 59 |
| 제8절 종합평가..... | 62 |
| 제4장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 | 64 |
| 제5장 연구개발 결과의 활용계획..... | 66 |
| 제6장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술 정보..... | 67 |

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발의 목적과 필요성

1. 기술적 측면

인간의 생활환경은 항상 자연방사선에 노출되어 있으며, 우리가 자연으로부터 받게 되는 환경방사선은 우주선으로부터의 방사선과 지각방사선에 기인한다. 지각방사선은 지구에 존재하는 자연방사성핵종에 기인하며, 지각방사선에 의한 피폭은 외부피폭과 내부피폭으로 나눌 수 있다. 흙이나 암석에 존재하는 우라늄계열과 토륨계열 자연방사성핵종들이 빗물이나 지하수를 통해 곡물류와 식수에 흡수된 후 사람의 소화를 통해 인체 내로 들어가고, 공기중의 방사성핵종은 사람들의 호흡을 통하여 대기중의 매우 작은 양이 인체 내로 흡수되어 내부피폭의 주된 원인이 된다. 따라서 사람들이 섭취하는 식품과 식수 등에서의 방사성핵종분포와 이들의 섭취에 의한 내부피폭선량의 평가가 매우 중요하다. UNSCEAR[1]에 의하면 일반인이 1년간 받는 자연방사선에 의한 피폭선량은 우주선으로부터 약 0.38 mSv(외부피폭만), 지각방사선을 구성하는 자연방사성핵종으로부터 약 2.03 mSv(외부 0.410, 내부 1.6 mSv) 등 총 약 2.4 mSv로 알려져 있다(표1 참조).

현재 각국에서는 식품류중의 자연방사성핵종에 대한 연구[2-17]가 활발하게 이루어지고 있으며, 아시아권[2-8]에서도 일본과 중국, 인도를 중심으로 각종 식품류중의 자연방사성핵종의 농도 조사와 식품류중의 자연방사성핵종의 섭취에 의한 내부피폭에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 반면에 국내에서는 이 방면에 대한 연구가 거의 전무한 상태이다.

원자력분야의 선진국 대열에 들어선 우리나라에서는 식품류중의 인공방사성핵종에 대해서는 일부 연구가 진행되어 있으나, 식품중의 자연방사성핵종의 중요성에 대한 인식이 부족하고, 이에 의한 내부피폭선량평가가 거의 이루어져 있지 않다. 따라서 우리나라에서 생산되고 있는 식품류를 통한 내부피폭선량에 대한 안전성을 확

보하기 위해서는 인공방사성핵종은 물론이고, 자연방사성핵종의 농도분포도 정확히 조사되어야 하며, 식품류중의 자연 방사성핵종, 특히 Th의 분포특성에 대한 조사는 전무한 실정으로서 자연방사성핵종에 대한 우리나라 식품류의 방사선 안전성을 확인할 수 없는 상황이다.

본 연구에서는 각종 식품류 중의 Th 측정을 위한 화학전처리법을 확립하고, Th-230과 Th-228의 방사능농도 분포특성을 조사하고 식품섭취를 통한 Th에 의해 우리나라 국민이 받게 되는 내부피폭선량을 조사·평가함과 아울러 자연방사성핵종조사와 환경방사능 평가의 기초 자료를 확보하고자 한다.

표 5. 자연방사선에 의한 피폭선원과 피폭선량

| 선원 | | 년평균 선량(mSv) | | 범위(mSv) |
|---------------|----------|-------------|-------|---------|
| 우주선 및 우주선생성핵종 | | 0.38 | | 0.3~1.0 |
| 외부 지각방사선 | | 0.48 | | 0.3~0.6 |
| 호흡에 의한 피폭 | U, Th 계열 | 1.26 | 0.006 | 0.2~10 |
| | Rn-222 | | 1.15 | |
| | Rn-220 | | 0.10 | |
| 섭취에 의한 피폭 | K-40 | 0.29 | 0.17 | 0.2~0.8 |
| | U, Th 계열 | | 0.12 | |
| 계 | | 2.4 | | 1~10 |

2. 경제·산업적 측면

우리나라에서 생산되고 있는 각종 식품류의 방사선 안전성을 확보하기 위해서는 식품류중의 인공방사성핵종은 물론이고, 자연방사성핵종의 농도분포도 정확히 조사되어야 한다. 일부 식품류중의 인공방사성핵종에 대한 조사는 이루어지고 있으나, 자연방사성핵종의 분포특성에 대한 조사는 전무한 실정으로서 자연방사성핵종에 대

한 우리나라 식품류의 방사선 안정성을 확인할 수 없는 상황이다. 따라서 금번의 조사를 통하여 우리나라에서 생산되는 식품류의 자연방사성핵종에 대한 방사선 안정성을 확보할 수 있으며, 우리나라 국민들이 받게 되는 내부피폭선량을 평가하여 국민의 안전을 확보할 수 있을 것이다.

3. 사회·문화적 측면

선진 각국에서는 식품류중의 자연방사성핵종의 농도측정이 활발하게 이루어지고 있으며, 아시아권에서도 일본과 중국, 인도를 중심으로 각종 식품류 중의 자연방사성핵종의 농도 조사가 이루어져 UNSCEAR의 보고서를 통해 보고되고 있다. 원자력분야의 선진국 대열에 들어선 우리나라에서는 식품류중의 인공방사성핵종에 대해서는 일부 연구가 진행되어 있으나, 식품류중의 자연방사성핵종의 중요성에 대한 인식이 부족하고, 이에 의한 내부피폭선량평가가 이루어져 있지 않다. 따라서 본 연구를 통해 식품류의 섭취에 의한 자연방사성핵종에 의한 내부피폭선량을 정확히 평가하여 우리나라 국민들의 방사선 위해도를 조사함으로써 국민들의 안전을 도모하고 과학 선진국으로서의 면모를 갖출 수 있을 것이다.

제2절 연구개발의 목표 및 범위

본 연구에서는 식품류중의 Th의 방사능농도를 평가하기 위하여 ① 각종 식품류중의 Th의 화학분리법과 알파 분광분석법에 의한 Th 동위원소의 정량측정법을 확립하며, ② 이를 토대로 연차별로 국내산 각종 식품류(우유, 육류, 곡류, 과일류, 채소류, 어·패류)중의 Th-228과 Th-230의 방사능 농도를 분석하며, 그 분포 특성을 조사한다. ③ 또한 각 식품류의 소비량과 선량환산인자로부터 식품류 섭취에 의해 Th으로부터 받게 되는 내부피폭선량을 분석, 평가하여 자연방사성핵종에 의한 국민위해도를 평가함을 최종목표로 하고 있다.

본 연구의 연차별 목표 및 연구내용과 범위를 요약하면 표 2와 같다.

표 6. 연차별 연구목표 및 연구내용

| 년차 | 연구개발목표 | 연구개발 내용 및 범위 |
|-----------------|-----------------------------------|--|
| 제1차년도 (2002) | 우유, 고기, 곡물류의 Th-230과 Th-228 농도 조사 | <ul style="list-style-type: none"> - Th 추출, 분리 및 측정분석법 확립 - 우유, 고기, 곡물류 시료 100개의 Th-230과 Th-228의 농도분포 특성조사 - 우유, 고기, 곡물류의 Th에 의한 내부 피폭 선량평가 |
| 제2차년도 (2003) | 채소, 과일류의 Th-230과 Th-228 농도 조사 | <ul style="list-style-type: none"> - 채소, 과일류 시료 100개의 Th-230과 Th-228의 농도분포 특성조사 - 채소, 과일류의 Th에 의한 내부피폭 선량평가 |
| 제3차년도 (2004) | 어·패류의 Th-230과 Th-228 농도 조사 | <ul style="list-style-type: none"> - 어류와 패류 시료 100개의 Th-230과 Th-228의 농도분포 특성조사 - 어·패류의 Th에 의한 내부피폭 선량평가 |
| 최종평가 | 식품류에 의한 내부피폭 선량 및 위해도 평가 | <ul style="list-style-type: none"> - 식품류 섭취에 의해 Th-230과 Th-228로부터 받게되는 내부피폭선량과 이로 인한 국민위해도 평가 |

제2장 국내·외 기술개발 현황

제1절 국내 연구개발현황과 전망

식품류를 포함한 각종 환경시료에 대한 방사선계측은 주로 인공방사성핵종을 대상으로 하여 한국원자력안전기술원(KINS)와 지방방사능측정소를 중심으로 수행되어 오고 있다. 특히 Cs-137이나 Co-60과 같은 감마방출핵종과 Sr-90, H-3 및 C-14 등의 인공방사성핵종 계측기술은 선진국 수준에 도달해 있다. 그러나 국내에서 식품류 중의 Th이나, Pb, Po 및 U과 같은 자연방사성핵종의 계측과 분포 특성을 조사한 연구는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다. 또한 이들 자연방사성핵종의 섭취에 의한 우리나라 국민의 내부피폭선량 평가도 되어 있지 않은 실정이다.

따라서 금번의 연구를 통해 각종 식품류 중의 Th-230과 Th-228과 같은 자연방사성핵종의 계측기술이 확립될 수 있으며, 아울러 자연방사성핵종의 섭취에 의한 내부피폭선량의 평가기술도 확립될 수 있을 것이다.

본 연구에서 조사대상으로 하는 식품류 시료자체가 우리나라에서 생산되고, 우리나라 국민들이 섭취하는 식품류를 대상으로 하고 있으며, 국내의 방사선 계측기술이 상당한 수준이므로 식품류 중의 자연방사성핵종 계측기술을 우리 자체에서 개발하여야 할 것이다.

제2절 국외 연구개발현황

인도에서는 H.S.Dang을 중심으로[2], 중국에서는 Zhu를 중심으로 한 연구진[3]에 의해 식품류 중의 자연방사성핵종에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 일본의 경우 K.Shiraishi(National Institute of Radiological Sciences)를 중심으로 한 연구진[4-7]에 의해 일본에서 소비되는 각종 식품류 중의 Th과 U에 대한 연구와 이들 자연방사성핵종의 섭취에 의한 일본인들의 내부피폭선량평가 등을 연구한 바 있다. 또한 미국에서는 I.M.Fisenne(EML)를 중심으로 한 연구진[9]에 의해 뉴욕시 거주자의 자연방사

성핵종의 일일섭취에 대한 연구 등을 수행하였으며, 영국에서는 E.J.Bradley를 중심 [10]으로 환경매체중의 방사성핵종에 관한 연구가 수행되었다. 폴란드에서는 Z. Pietrzak-Flis(Central Laboratory of Radiological Protection) 등[11-13]을 중심으로 한 연구진에 의해 폴란드내의 식품류 중의 자연방사성핵종의 섭취에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 브라질의 경우 E.E.Santos 등[14]을 중심으로 한 연구진에 의해 Rio de Janeiro시 거주자의 채소류중의 각종 자연방사성핵종의 섭취에 대한 연구가 수행되었다.

또한 캐나다에서는 F.V.Clulow등[15]이, 방글라데시에서는 N.M.Alam 등[16]이 스페인에서는 M.J.Vargas 등[17]이 각각 어류, 담치 및 식물 등에서의 자연방사성핵종의 분포특성을 조사하여 보고하고 있다.

선진 각국의 이러한 연구결과는 UNSCEAR의 보고서를 통해 식품류중의 자연방사성핵종의 농도와 섭취에 의한 내부피폭선량평가 결과가 주기적으로 보고 있다(아시아에서는 일본, 중국, 인도의 결과가 보고되고 있음).

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 Th의 물리적 특성

지구상에 존재하는 자연방사성핵종은 그 기원별로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 우주선과 대기와의 상호작용에 의하여 생겨난 우주선 기원핵종(^{14}C , ^3H , ^7Be , ^{22}Na 등)이며, 다른 하나는 지구의 지각 중에 존재하는 원시 동위원소의 붕괴에 의해 생성된 자연방사성핵종(^{238}U 계열, ^{232}Th 계열, ^{40}K 등)들이다. 이 원소들 중 토륨은 원자번호 90인 악티노이드(Actinoids)계열 원소 중의 하나로서 1828년 J.J.베르셀리우스가 노르웨이에서 산출된 광석에서 발견하였다[18].

토륨은 유일하게 +4가에서만 산화 상태로 존재한다. 토륨의 동위원소는 질량수가 223에서 235까지 존재하며, 반감기는 짧게는 $2.23 \times 10\text{min}$ (^{233}Th)에서 길게는 $1.405 \times 10^{10}\text{y}$ (^{232}Th)까지 다양하다. 그 중에서 ^{230}Th , ^{234}Th 가 우라늄계열, ^{228}Th , ^{232}Th 는 토륨계열, ^{227}Th , ^{231}Th 이 악티늄계열에 속하는 자연방사성핵종이며(표 4 ~ 표 6 참조), 이 밖에는 인공적으로 만들어진 것들이다.

표 3은 자연방사성핵종인 ^{230}Th , ^{234}Th , ^{228}Th 및 ^{232}Th 의 반감기, 붕괴양식, 주요 α 입자의 에너지와 감마선의 에너지 등의 물리적 특성을 요약한 것이다.

표 7. Th 동위원소의 물리적 특성

| 동위원소 | 반감기 | 붕괴양식 | Alpha Energy(keV) (Intensity) | Gamma Energy(keV) (Intensity) |
|--------|------------|-----------|----------------------------------|---|
| Th-228 | 1.9116 y | α | 5423.15(72.2) 5340.36(27.2) | 84.373(1.22) 215.983(0.25) |
| Th-230 | 75380 y | α | 4687.0(76.3) 4620.5(23.4) | 67.672(0.373) 143.872(0.0483) |
| Th-232 | 1.405E10 y | α | 4012.3(78.2) 3947.2(21.7) | 63.81(0.263) 140.88(0.021) |
| Th-234 | 24.1 d | β^- | - | 63.29(4.84) 92.38(2.81) 92.80(2.77) |

Th은 반응성이 높고 자연환경에 유입되는 경로가 독특하여 오염물질의 환경내 거동이나 지구 구성성분 측정, 지구화학적과정 추정 등의 여러 가지 용도로 활용되고 있다. 자연계에서 Th은 구성요소마다 각기 다른 분포를 보이는데 지각을 구성하는 토륨의 농도[19]는 수 ppm에 달하며, 대기 중에는 수십 ppm, 해수에는 수~수백 ppq가 존재하는 것으로 알려져 있다.

표 4~ 표 6은 자연방사성핵종의 토륨이 속하는 우라늄계열, 토륨계열 및 악티늄계열의 방사성핵종과 반감기 및 붕괴양식을 간략히 요약한 것이다.

표 8. 우라늄(4n+2)계열의 자연방사성동위원소

| 방사성핵종 | 반감기 | 붕괴양식 |
|---------|------------------------|---------------------------------------|
| U-238 | 4.468×10^9 yr | α |
| Th-234 | 24.10 d | β^- |
| Pa-234m | 1.17 m | $\beta^-(99.87\%), \text{IT}(0.13\%)$ |
| Pa-234 | 6.70 h | β^- |
| U-234 | 2.454×10^5 yr | α |
| Th-230 | 7.54×10^4 yr | α |
| Ra-226 | 1602 yr | α |
| Rn-222 | 3.825 d | α |
| Po-218 | 3.11 m | $\alpha(99.98\%), \beta^-(0.02\%)$ |
| Pb-214 | 26.8 m | β^- |
| At-218 | 1.6 s | $\alpha(99.9\%), \beta^-(0.1\%)$ |
| Bi-214 | 19.9 m | $\alpha(0.02\%), \beta^-(99.98\%)$ |
| Po-214 | 163.69 μ s | α |
| Tl-210 | 1.30 m | β^- |
| Pb-210 | 22.3 yr | β^- |
| Bi-210 | 5.013 d | β^- |
| Po-210 | 138.376 d | α |
| Tl-206 | 4.20 m | β^- |
| Pb-206 | | stable |

표 5. 토륨(4n)계열의 천연방사성동위원소

| 방사성핵종 | 반감기 | 붕괴양식 |
|--------|---------------------------|-------------------------------------|
| Th-232 | 1.405×10^{10} yr | α |
| Ra-228 | 5.75 yr | β^- |
| Ac-228 | 6.13 h | β^- |
| Th-228 | 1.913 yr | α |
| Ra-224 | 3.66 d | α |
| Rn-220 | 55.6 s | α |
| Po-216 | 150 ms | α |
| Pb-212 | 10.64 h | β^- |
| Bi-212 | 1.0092 h | $\alpha(35.94\%), \beta^-(64.06\%)$ |
| Po-212 | 298 ns | α |
| Tl-208 | 3.053 m | β^- |
| Pb-208 | | stable |

표 6. 악티늄(4n+3)계열의 천연방사성동위원소

| 방사성핵종 | 반감기 | 붕괴양식 |
|--------|------------------------|--------------------------------------|
| U-235 | 7.037×10^8 yr | α |
| Th-231 | 1.0633 d | β^- |
| Pa-231 | 3.276×10^4 yr | α |
| Ac-227 | 21.77 yr | $\alpha(1.38\%), \beta^-(98.62\%)$ |
| Th-227 | 18.718 d | α |
| Fr-223 | 21.8 m | $\alpha(0.006\%), \beta^-(99.994\%)$ |
| Ra-223 | 11.43 d | α |
| At-219 | 54 s | $\alpha(97\%), \beta^-(3\%)$ |
| Rn-219 | 3.96 s | α |
| Bi-215 | 7.4 m | β^- |
| Po-215 | 1.780 ms | $\alpha, \beta^-(0.00023\%)$ |
| Pb-211 | 36.1 m | β^- |
| At-215 | 100 μ s | α |
| Bi-211 | 2.14 m | $\alpha(99.727\%), \beta^-(0.273\%)$ |
| Tl-207 | 4.77 m | β^- |
| Po-211 | 516 ms | α |
| Pb-207 | | stable |

제2절 식품중 Th 측정을 위한 화학전처리

1. 식품중 Th 분리를 위한 화학전처리 절차

시료중의 토륨을 분리 추출하는 일반적인 화학적전처리 방법으로[20-23]는 음이온교환법, 용매추출법, 용매추출과 음이온교환법 등이 있다. 그러나 식품류 시료의 경우 단순히 음이온교환법과 용매추출법을 사용하면, 토륨의 화학적 회수율이 크게 떨어져 정확한 토륨의 방사능농도를 산출하는데 어려움이 있다. 또한 용매추출과 음이온교환법을 사용하면 화학적회수율이 크게 개선되지만 절차가 너무 복잡하여 본 연구에서와 같이 많은 수의 환경시료(식품류)를 분석하는데는 부적합하다. 때문에 본 연구에서는 식품류중의 토륨을 효과적으로 분석하기 위하여 통상의 음이온교환법을 사용하되, 회수율을 향상시킬 수 있는 방법을 추가하여 식품류의 토륨을 분리 추출할 수 있는 화학적전처리 방법을 확립하였다.

일반적인 음이온교환법으로 식품류 시료를 전처리 할 경우에는 화학적 회수율이 크게 떨어지며, 이는 식품류 시료에 포함된 인(P)성분에 기인하는 것으로 알려져 있다. 즉, 시료중에 P성분의 함량이 높으면 음이온교환시 Th의 resin에 대한 흡착계수를 크게 떨어뜨린다[23]. 특히 식품류 시료중에는 많은 양의 P성분이 들어있으며(우유시료의 경우 P 성분은 평균 15%정도임), 따라서 음이온교환전에 시료중의 P성분을 충분히 제거해야 한다. 일반적으로 음이온교환전에 철공침을 통하여 불필요한 금속 성분을 제거하는데 이때 P성분도 같이 공침되므로 철공침법만으로는 P성분을 제거할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 철공침전에 옥살산 공침을 추가함으로써 시료중의 P성분을 제거하였으며, 식품류 시료중의 토륨을 분리하여 시료중의 Th의 방사능농도를 평가하는 전체적인 절차의 개요는 그림1과 같다.

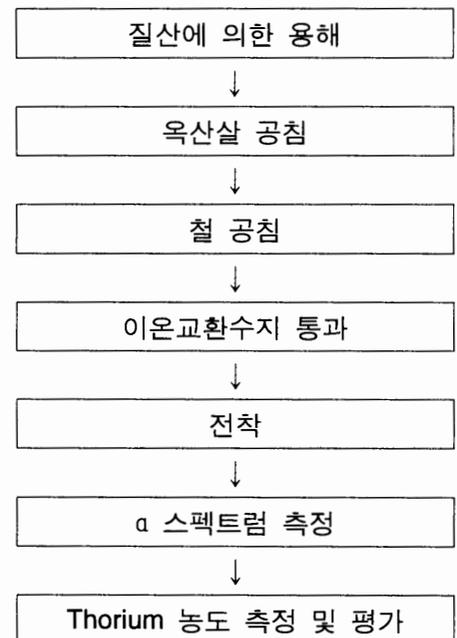


그림 1. 식품중 토륨(Th) 분석절차

시료중의 토륨을 분리하기 위한 전체적인 화학전처리절차는 그림 2와 같다.

① 금속이온의 용해 : 식품류 회화시료 10g을 취하여 ^{229}Th 표준용액(0.19 Bq/g) 1g을 첨가한 후 Conc.질산(70%) 150ml를 넣어 50 ml 이하가 될 때까지 가열 농축한 후 시료 용액의 발포에 주의하면서 hydrogen peroxide (H_2O_2 , 15%) 10ml를 첨가한다. 시료용액이 흰색투명이 될 때까지 (유기물 완전분해) 3~4회 가열 농축 절차를 반복한다(사진 1 참조). 시료용액을 100ml까지 가열농축한 후 3차증류수를 1L 추가한다.

② 옥살산 공침 : 가열하면서 옥살산을 60g과 Ca^{2+} 를 0.5g정도 추가한다. 옥살산과 칼슘염이 완전용해하면 시료 용액에 암모니아수를 첨가하여 pH를 1.5를 만든다(pH를 1.5로 조절하여 옥살산칼슘침전을 생성시킨다). 생성된 옥살산칼슘침전을 5C여과지로 여과하여 적외선등으로 건조한 후 회화로에서 550℃ 온도에서 24시간 소결한다. 소결된 침전물에 7.8M 질산 100ml를 첨가한후 3차증류수를 300ml를 추가한다.

③ 철공침 : 시료용액에 철운반체용액 Fe^{3+} 10mg을 첨가하여 충분히 교반한 후 암모니아수로 pH를 9로 맞추어 철침전을 생성하여 토륨을 공침시킨다. 상층액을 버리고 침전물을 잔액과 함께 원심분리기에 넣고 3,000 rpm으로 약 15분 원심분리를 한 후, 상층액을 버린다. 7.8M 질산 150ml를 침전물에 첨가한 후, 가열농축하여 Glass Fiber Filter(GF/C, 55mm Φ)로 흡인 여과하여(사진 2 참조), 100ml 정도로 만든다.

사진 1. 가열농축과정



사진 2. 흡인, 여과 과정

④ 이온교환수지 통과 : 칼럼에 음이온교환수지 (BIO-RAD AG 1-X8 or Dowex 1x8, 100-200 mesh)를 8cm 높이 까지 채운 다음 실험 1주일 전에 4M HNO₃ 용액으로 Resin을 충분히 세척하여 Cl[AgNO₃로 흰색침전유무를 체크]를 제거한다. 질산 7.8 M 120ml를 2g/min의 유속으로 칼럼에 통과시킨다(사진 3 참조). 시료용액은 1g/min 이하의 유속으로 칼럼에 통과시킨 후 질산 7.8M 150ml를 2g/min의 유속으로 칼럼에 통과시킨다. 염산 8M 200ml를 2g/min의 유속으로 칼럼에 통과시키고, 칼럼통과액을 증발건고하며, 만약 흰색잔여물이 명확히 관측되면 음이온 교환절차를 반복한다.



사진 3. Resin 통과과정

⑤ 전착 : 증발건고가 끝나면, 질산(70%) 2ml, 과염소산(HClO₄) 1ml와 과산화수소수(H₂O₂) 4-5 방울을 첨가하여 증발건고하며, 이 과정을 2회 실행한다. 마지막으로 자체 제작한 전착용액 12ml(pH: 1.7)으로 비이커를 충분히 세척하여 전착셀에 옮긴 다음, 0.75A의 전류로 2시간 동안 전착한 후(사진 4 참조) 토치로 전착판을 가열하여 방냉한다.

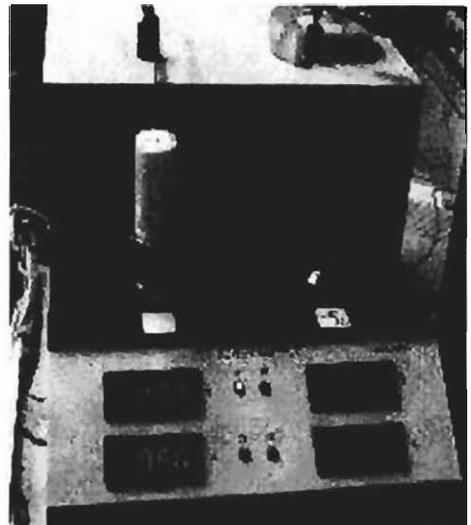


사진 4. 전착장치

⑥ α 스펙트럼 측정 : 전착판을 알파분광시스템에 장착하여 α 스펙트럼을 측정하고, Th의 방사능 농도를 분석, 평가한다.

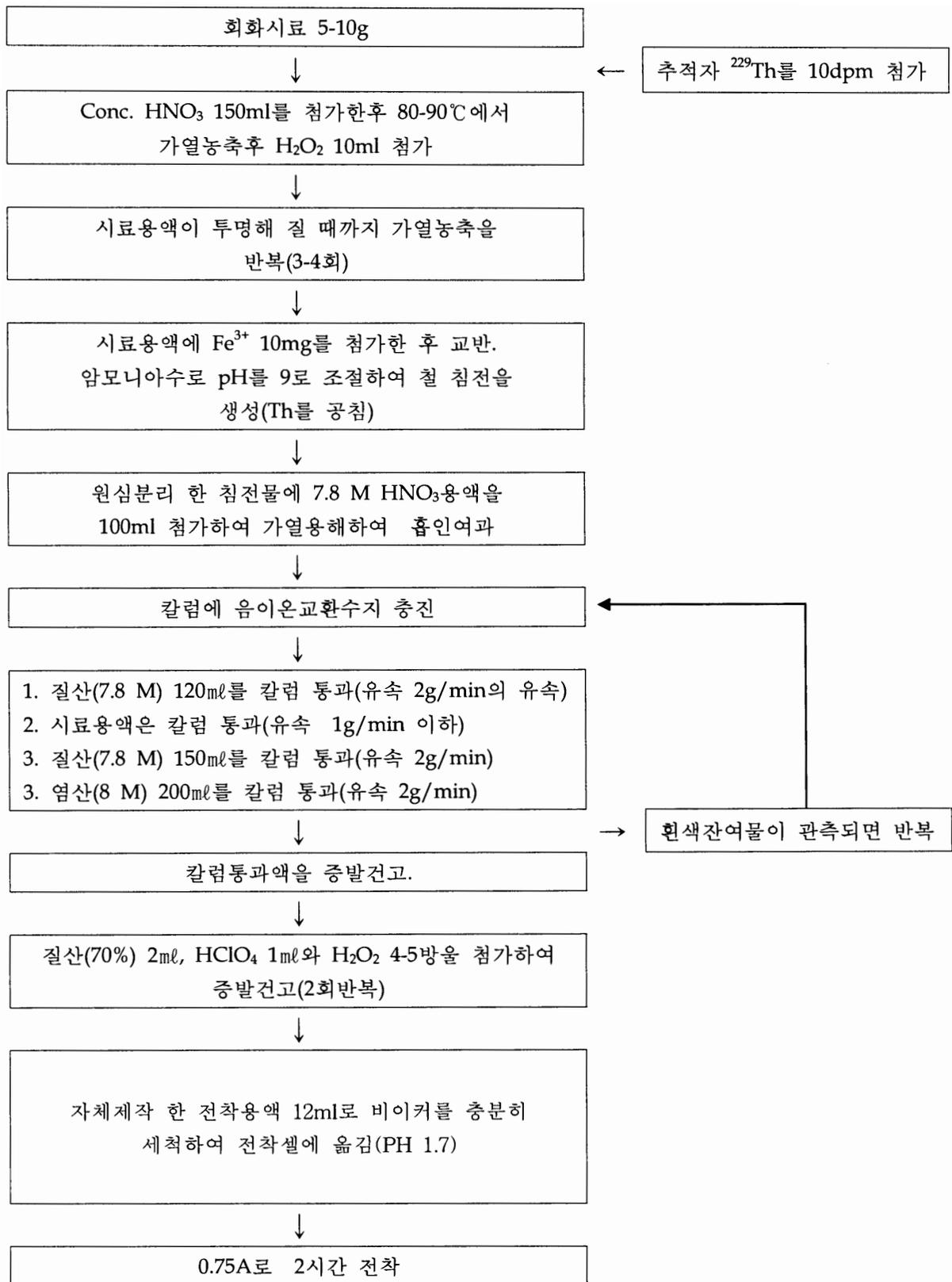


그림 2. 식품중 Th의 분리를 위한 화학전처리 절차

2. 옥살산 침전에 의한 P 성분의 제거효과

본 연구에서는 Th 분리를 위한 화학전처리에서 옥살산 공침을 추가였으며, 그 결과 시료중의 P 성분을 대부분 제거할 수 있었다. 그림 3과 그림 4는 옥살산 공침 전과 옥살산 공침 후의 우유 시료의 형광 X-선 스펙트럼이다. 옥살산 공침을 하지 않은 경우에는 시료중의 P 성분(평균 15%정도)이 그대로 남아있었으며, 옥살산 공침을 한 경우에는 P 성분(0.02%)이 거의 다 제거되었음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 도입한 옥살산 공침에 의하여 식품류 시료중의 P 성분을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인할 수 있었다.

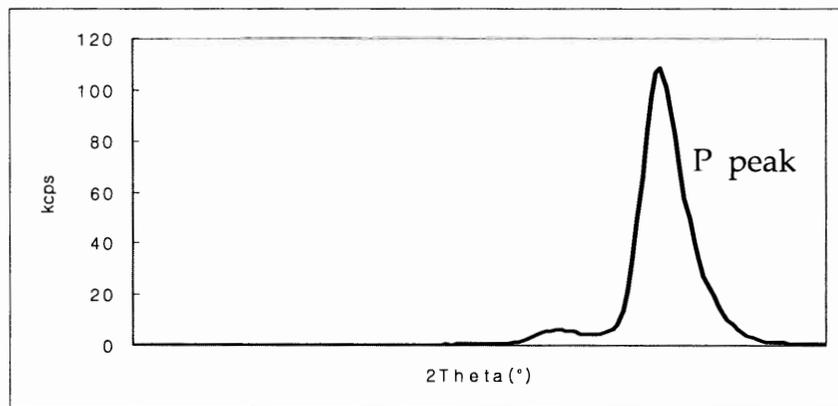


그림 3. 옥살산 공침전 시료의 형광 X-선 스펙트럼.

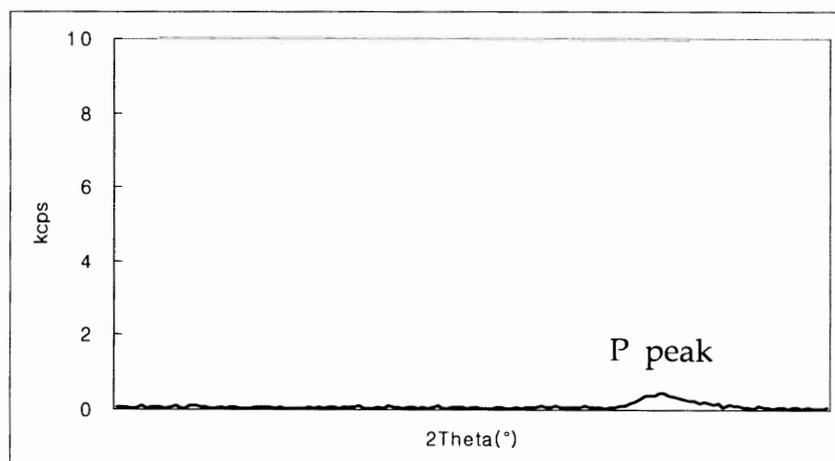


그림 4. 옥살산 공침후의 형광 X-선 스펙트럼

본 연구에서 옥살산 공침을 추가한 토륨 전처리법으로 화학처리한 경우의 알파 스펙트럼(그림 5)은 옥살산침전을 사용하지 않고 음이온교환법만으로 처리한 경우의 알파스펙트럼(그림 6)보다 스펙트럼 peak의 분해능이 뛰어나고 계수치도 훨씬 많았다. 그리고 옥살산 공침을 하지 않고 음이온교환법만으로 처리한 경우에는 Th의 화학회수율이 매우 낮았으나, 옥살산 공침에 의해 P 성분을 제거하면 Th의 화학회수율이 70% 이상으로 향상되었다.

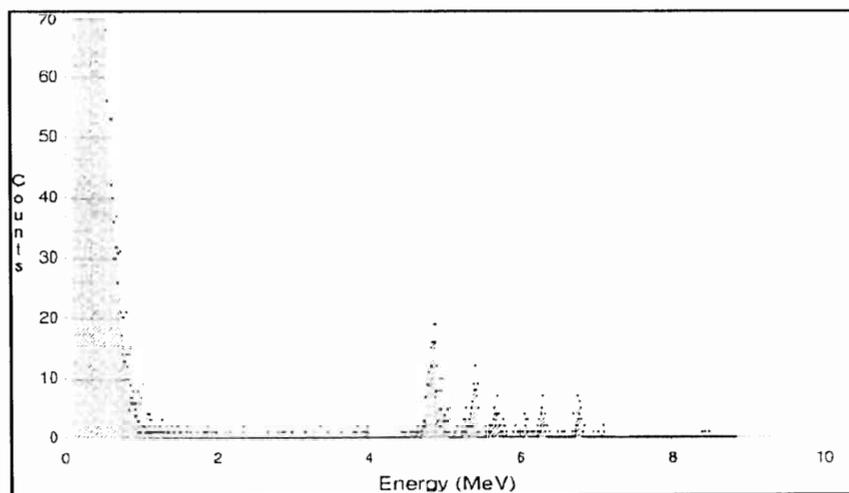


그림 5. 옥살산 공침을 하지 않은 경우의 α 스펙트럼

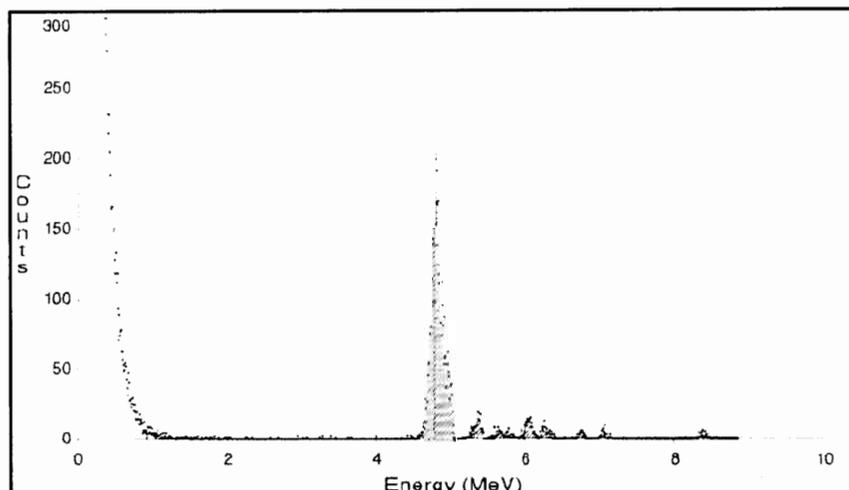


그림 6. 옥살산 공침을 한 경우의 α 스펙트럼

제3절 Alpha 분광법에 의한 Th의 정량 분석

1. α 스펙트럼의 측정

화학전처리를 통해 얻은 전착판을 α 분광시스템을 사용하여 α -선 스펙트럼을 계측하여 Th의 방사능농도를 측정하였다. 일반적인 α 분광시스템의 구성은 그림 7과 같으며, 본 연구에서는 사진 5와 같은 α 분광시스템(Model 7401, Canberra Co.)을 사용하였으며 계측시간은 300,000 초로 하였다.

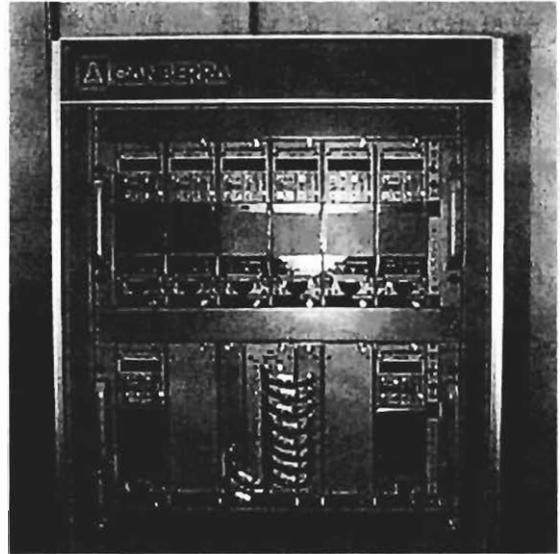


사진 5. Alpha Spectrometer의 외형 (Canberra Model 7401)

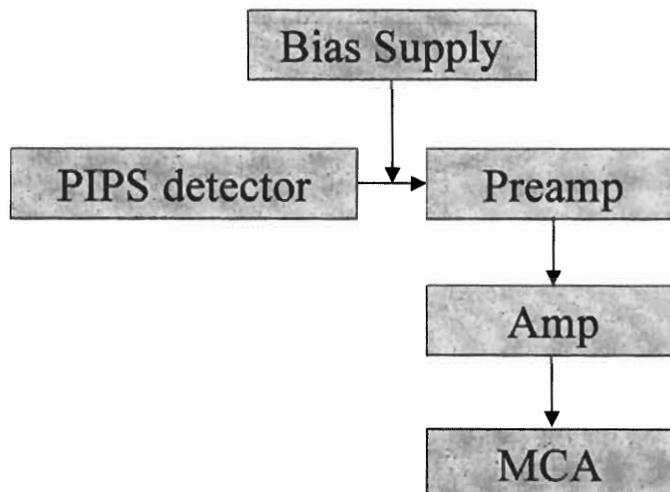


그림 7. Alpha spectrometer의 구성

α 분광시스템으로 측정된 시료의 α 스펙트럼상의 표준선원 ^{229}Th 의 peak로부터 화학적 회수율을 산출하고 Th-228, Th-230 및 Th-232의 peak로부터 방사능농도를 산출한다. 그림 8은 식품류 시료의 대표적인 α 스펙트럼이다.

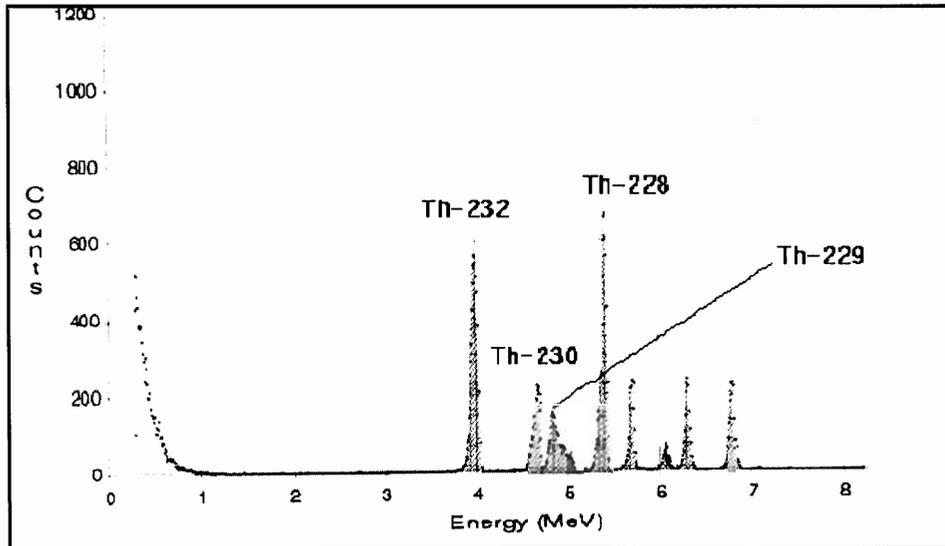


그림 8. 시료의 α 선 스펙트럼

2. 방사능농도의 계산[24]

가. 참계수율

시료의 α 스펙트럼에서 분석 대상핵종 및 첨가한 표준시료 핵종 각각의 peak에 대해 참계수율을 구한다.

(1) 시료의 계수율

- ① 대상 핵종의 peak영역에의 계수치를 합계하고, background를 포함한 총계수치 (N)를 구한다.
- ② 분석 대상 핵종 peak가 스펙트럼 속에 없는 경우에는, 대상 핵종의 peak가 나타날 영역을 가정하여 총계수치를 구한다(peak 중심으로부터 저에너지 측으로 80 keV,

고에너지 측으로 40 keV, 즉 합계 120 keV 정도를 peak 영역으로 가정한다).

③ 총계수치를 측정시간(t)으로 나누어, background를 포함한 시료의 계수율(n)을 구한다.

$$\begin{aligned} n &= \frac{N}{t} \\ \sigma &= \frac{N^{\frac{1}{2}}}{t} \end{aligned} \tag{1}$$

단, 여기서

n : 시료의 계수율(cps)

N : 시료의 총계수율(counts)

t : 시료의 측정시간(sec)

σ : 시료의 계수율 오차(cps)

를 나타낸다.

(2) Background의 계수율

① Blank 시료로서 세척한 전착판을 시료측정 전과 후에 측정하여, background 스펙트럼으로 한다.

② 시료측정 전과 후에 측정한 background 스펙트럼으로부터 시료 중 peak영역과 같은 영역의 총계수치(N_{b1} , N_{b2})를 구한다.

③ 2개의 총계수치(N_{b1} , N_{b2})와 측정시간(t_{b1} , t_{b2})으로부터 다음 식에 따라 background의 계수율(n_b) 및 그 계수오차(σ_b)를 구한다.

$$\begin{aligned} n_b &= \frac{N_{b1} + N_{b2}}{t_{b1} + t_{b2}} = \frac{N_b}{t_b} \\ \sigma_b &= \frac{(N_{b1} + N_{b2})^{1/2}}{t_{b1} + t_{b2}} = \frac{N_b^{\frac{1}{2}}}{t_b} \end{aligned} \tag{2}$$

단, 여기서

n_b : background의 계수율(cps)

N_{b1} : 시료측정 전의 background 총계수치(counts)

N_{b2} : 시료측정 후의 background 총계수치(counts)

N_b : 시료측정 전후의 background 총계수치의 합

t_{b1} : 시료측정 전의 background 측정시간(sec)

t_{b2} : 시료측정 후의 background 측정시간(sec)

t_b : 시료측정 전후의 background 측정시간의 합(sec)

σ_b : background 계수율의 계수오차(cps)

를 나타낸다.

(3) 참계수율

시료의 계수율(n)과 background(n_b)에서 다음 식에 따라 참계수율(n_s)을 구한다.

$$n_s = n - n_b$$
$$\sigma_s = \left(\frac{N}{t^2} + \frac{N_b}{t_b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

단, 여기서 n_s 은 참계수율(cps), σ_s 은 참계수율의 계수오차(cps)를 나타낸다.

나. 방사능농도의 산출

시료 중의 대상 핵종의 방사능농도(A)는 다음 식에 따라 구한다.

$$A = \frac{n_s \cdot D}{n_{add} \cdot W} \quad (4)$$

$$\sigma_A = A \cdot \left(\frac{\sigma_s^2}{n_s^2} + \frac{\sigma_{add}^2}{n_{add}^2} + \frac{\sigma_D^2}{D^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

단, 여기서

A : 대상 핵종의 방사능농도(Bq/kg, Bq/L 등)

σ_A : 대상 핵종의 방사능농도의 계수오차(Bq/kg, Bq/L 등)

n_s : 대상 핵종의 참계수율(cps)

σ_s : 대상 핵종의 참계수율에 대한 계수오차(cps)

W : 시료량(kg, L 등)

D : 첨가한 표준 핵종의 방사능량(Bq)

σ_D : 첨가한 표준 핵종의 방사능량의 오차(Bq)

n_{add} : 계측시료에 첨가한 표준 핵종의 참계수율(cps)

σ_{add} : 계측시료에 첨가한 표준핵종 참계수율의 오차(cps)

를 나타낸다.

위의 식에서 알 수 있듯이 방사능농도의 산출에 있어서는, 대상 핵종과 첨가한 표준 핵종의 참계수율과 방사능량 및 분석 시료량만이 필요하고, 계수효율이나 화학수율은 필요하지 않다.

또, 실제 시료에서는 화학분리가 불충분하기 때문에 전착판에 미량의 불순물이 혼입되는 경우를 생각할 수 있다. 이러한 경우에는 α -선 스펙트럼에 tailing이 보이며, 또 불순물에 의한 α -선 흡수 때문에 계수효율이 낮아지고, 위의 방법으로 산출한 화학수율은 실제로 전착한 양보다 낮아진다. 그러나 화학수율은 방사능 농도를 산출함에 있어서 필요가 없기 때문에 문제가 되지 않는다.

다. 계측효율과 화학수율

방사능농도를 산출함에 있어서, 계측효율과 화학수율이 반드시 필요한 것은 아니지만, 검출하한 등을 알기 위해서는 필요하다. 또 분석절차가 올바르게 행해지고

있는지 여부를 확인하기 위해 첨가한 핵종이 어느 정도 회수되었는지도 알 필요가 있다. 이 때문에 계측효율과 화학수율을 구해 두는 것이 바람직하다. 이를 위하여 표준선원을 계측하고, 검출기의 계측효율과 화학수율을 측정한다.

(1) 표준선원

표준선원은 측정시료와 같은 형상의 것을 사용하고, 가능하면 분석 대상핵종과 같은 핵종의 것이 좋다. 만약 동일 핵종이 없으면 측정시료와 동일한 형태, 동일한 면적의 다른 핵종의 표준선원을 대용할 수 있다.

또한 위와 같은 표준선원이 입수되지 않는 경우에는, 일정량의 α-방사성핵종(첨가 Tracer 등)을 측정시료 조제방법과 동일한 방법으로 전착하고, 2π Gas flow proportional 계수관 등으로 표정을 하여, 표준선원으로 사용할 수 있다.

본 연구에서 사용한 Th-229 표준선원은 미국표준연구소(NIST)의 Standard Reference Material(SRM) 4328A로서 물리화학적 특성은 표 9와 같다.

표 7. Th-229 표준선원의 물리화학적 특성

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| Radionuclide | Th-229 |
| Source Identification | SRM 4328A |
| Source Composition | Th-229 in 1M nitric acid |
| Source Density | 1.032±0.002 g/mL at 22.6℃ |
| Radioactivity Concentration | 32.8 Bq/g |

(2) 계측효율의 산출

표준선원의 α스펙트럼의 peak를 계측하고, 계측효율(F)를 다음 식으로 구한다.

$$F = \left(\frac{N_{s0}}{t_{s0}} - \frac{N_b}{t_b} \right) \cdot S_0^{-1} \tag{5}$$

$$\sigma_F = F \cdot \left[\frac{N_{S_0} \cdot t_b^2 + N_b \cdot t_{S_0}^2}{(N_{S_0} \cdot t_b - N_b \cdot t_{S_0})^2} + \frac{\sigma_{S_0}^2}{S_0^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

단, 여기서

F : 계측효율

σ_F : 계측효율의 오차

N_{S_0} : 표준시료의 총계수치(counts)

N_b : background의 총계수치(counts)

t_{S_0} : 표준시료의 측정시간(sec)

t_b : background의 측정시간(sec)

S_0 : 표준시료의 방사능(Bq)

σ_{S_0} : 표준시료의 방사능오차(Bq)

를 나타낸다.

(3) 화학수율

첨가한 표준 핵종의 방사능(D), 계측시료 중 첨가한 표준 핵종의 참계수율(n_{add}) 및 계수효율(F)로부터 화학수율(Y)를 다음 식으로 구한다.

$$Y = \frac{n_{add}}{F \cdot D}$$

$$\sigma_Y = Y \cdot \left(\frac{\sigma_{add}^2}{n_{add}^2} + \frac{\sigma_F^2}{F^2} + \frac{\sigma_D^2}{D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

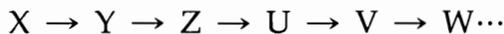
단, 여기서 Y : 화학수율, σ_Y : 화학수율의 오차를 나타낸다.

제4절 방사성핵종의 연속붕괴에 대한 고찰

1. 방사성핵종의 연속붕괴

본 연구에서 분석대상으로 한 토륨의 방사성동위원소중에서 Th-230과 Th-232는 반감기가 충분히 길기 때문에 시료채취후의 경과시간에 따른 방사능농도의 변화가 거의 없다. 그러나 Th-228의 경우에는 반감기가 1.913 y으로서 시료채취후의 경과시간에 따른 방사능의 변화가 예상되며, 또한 방사성붕괴계열에서 Th-228의 모핵종인 Ra-228과 Ac-228의 반감기(Ac-228은 6.13 h, Ra-228은 5.75 y)가 충분히 길지 않으므로 시료채취후에 Ra-228 또는 Ac-228의 붕괴로 시료내부에서의 Th-228의 내부생성(ingrowth)가 일어날 수 있으므로 시료채취로부터 측정시간까지의 경과시간이 길어지면 시료채취시의 Th-228의 방사능농도의 평가가 곤란하다.

따라서 이 절에서는 방사성핵종이 연속적으로 붕괴할 때의 방사성핵종의 방사능의 변화를 고찰해 본다. 다음과 같이 방사성붕괴계열을 형성하여 연속붕괴를 하는 경우를 가정한다.



이때 시간 $t=0$ 에서의 각 핵종의 원자수를 각각 $N_{10}, N_{20}, N_{30}, \dots$ 라 하고, $t=t$ 에서의 각 핵종의 원자수를 각각 N_1, N_2, N_3, \dots , 각 핵종의 붕괴상수를 각각 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 라고 하면, 붕괴계열의 첫 모핵은 자신의 붕괴상수에 따라 붕괴하고, 그 이하의 자핵종들은 안정된 핵종이 될 때까지 모핵종으로부터의 생성과 자체의 붕괴가 일어나므로 시간에 따른 각 핵종의 원자수의 변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

(6)

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \lambda_3 N_3 - \lambda_4 N_4$$

:

:

따라서 위의 미분방정식을 연립으로 풀이하여 해를 구하면 붕괴계열상의 각 핵종의 원자수의 변화나 방사능의 변화를 구할 수 있다. 그러나 붕괴계열을 형성하는 핵종의 수가 많아지면 이 연립방정식의 해를 일반적으로 구하는 것은 매우 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 Runge-Kutta 법으로 미분방정식의 수치해를 구하여 연속붕괴시의 자핵종들의 방사능의 변화를 고찰해 보았다.

2. 연속붕괴 Simulation 프로그램

본 연구에서는 Th-228의 방사능의 변화가 조사대상이며, Th-228은 토륨붕괴계열인 $\text{Th-232} \rightarrow \text{Ra-228} \rightarrow \text{Ac-228} \rightarrow \text{Th-228} \rightarrow \text{Ra-224} \dots$ 등의 붕괴과정에 속하므로 Th-232로부터 3대 자핵종인 Th-228까지 4회의 연속붕괴에 대해 식(7)과 같은 4개의 연립 1계 미분방정식을 세우고, 이를 Runge-Kutta 법에 의한 수치해석적 방법으로 미분방정식을 풀이하여 simulation 하는 프로그램을 작성하였다. 프로그래밍 언어는 Visaul Basic 6.0을 사용하였으며, 작성된 program code는 프로그램 1과 같다.

그림 9는 개발된 프로그램을 실행한 초기 화면으로서 본 연구의 대상인 Th-228 붕괴계열이외의 다른 연속붕괴 핵종에도 적용할 수 있도록 하였으며, 각 핵종의 초기방사능농도의 값에 따른 변화도 알아 볼 수 있도록 각 핵종의 반감기와 초기방사능 값을 사용자가 입력할 수 있게 하였다. 또한 최대계산시간을 변화할 수 있도록 하여 붕괴시간범위에 따른 변화를 알아볼 수 있도록 하였다. 그리고 프로그램을 다시 실행하지 않고 입력값을 변화한 후 simulation 결과를 계속해서 볼 수 있도록 화면지우기 기능을 추가하였으며, 연속 붕괴하는 4개 핵종의 방사능을 서로 다른 색상의 그래프로서 Simulation 결과를 나타내도록 하였다.

```

Dim h, n As Double
Dim x0, x1, lambda1, lambda2, lambda3, lambda4 As Double
Dim p0, q0, r0, s0, p1, q1, r1, s1 As Double
Dim a1, a2, a3, a4 As Double
Dim v1, v2, v3, v4 As Double
Dim w1, w2, w3, w4 As Double
Dim u1, u2, u3, u4 As Double
Dim z1, z2, z3, z4 As Double
Private Sub Command1_Click()
lambda1=0.693/(Val(Text2.Text)*365*86400)
lambda2=0.693/(Val(Text5.Text)*365*86400)
lambda3=0.693/(Val(Text8.Text)*365*86400)
lambda4=0.693/(Val(Text11.Text)*365*86400)
a1=Val(Text3.Text) ' 초기 방사능
a2=Val(Text6.Text) ' 초기 방사능
a3=Val(Text9.Text) ' 초기 방사능
a4=Val(Text12.Text) ' 초기 방사능
p0=a1/lambda1 '초기 Th-232의 수
q0=a2/lambda2 '초기 Ra-228의 수
r0=a3/lambda3 '초기 Ac-228의 수
s0=a4/lambda4 '초기 Th-228의 수
x0=0 '출발시간
xm=Val(Text13.Text) * 365 * 86400 '계산 최대시간(초)
n=30000
h=(xm - x0) / n
Picture1.Scale (xm * (-0.1), 1.2)-(xm * 1.2, -0.1)
Picture1.Line (0, 0)-(xm * 1.1, 0)
Picture1.Line (0, 0)-(0, 1.1)
For k = 1 To 5
Picture1.Line (k*xm/5, 0)-(k*xm/5, 1/30)
Picture1.Line (0, k/5)-(xm/30, k/5)
Next
For I=0 To n-1 ' Runge-Kutta method

v1=fnf(x0, p0, q0, r0, s0)
w1=fng(x0, p0, q0, r0, s0)
u1=fnh(x0, p0, q0, r0, s0)
z1=fnj(x0, p0, q0, r0, s0)

```

프로그램 1. 연속붕괴 simulation 프로그램 code

```

v2=fnf(x0+h/2, p0+h*v1/2, q0+h*w1/2, r0+h*u1/2, s0+h*z1/2)
w2=fng(x0+h/2, p0+h*v1/2, q0+h*w1/2, r0+h*u1/2, s0+h*z1/2)
u2=fnh(x0+h/2, p0+h*v1/2, q0+h*w1/2, r0+h*u1/2, s0+h*z1/2)
z2=fnj(x0+h/2, p0+h*v1/2, q0+h*w1/2, r0+h*u1/2, s0+h*z1/2)
v3=fnf(x0+h/2, p0+h*v2/2, q0+h*w2/2, r0+h*u2, s0+h*z2)
w3=fng(x0+h/2, p0+h*v2/2, q0+h*w2/2, r0+h*u2, s0+h*z2)
u3=fnh(x0+h/2, p0+h*v2/2, q0+h*w2/2, r0+h*u2, s0+h*z2)
z3=fnj(x0+h/2, p0+h*v2/2, q0+h*w2/2, r0+h*u2, s0+h*z2)
v4=fnf(x0+h/2, p0+h*v3, q0+h*w3, r0+h*u3, s0+h*z3)
w4=fng(x0+h/2, p0+h*v3, q0+h*w3, r0+h*u3, s0+h*z3)
u4=fnh(x0+h/2, p0+h*v3, q0+h*w3, r0+h*u3, s0+h*z3)
z4=fnj(x0+h/2, p0+h*v3, q0+h*w3, r0+h*u3, s0+h*z3)
p1=p0+h*(v1+2*v2+2*v3+v4)/6
q1=q0+h*(w1+2*w2+2*w3+w4)/6
r1=r0+h*(u1+2*u2+2*u3+u4)/6
s1=s0+h*(z1+2*z2+2*z3+z4)/6
x1=x0+h
x0=x1 : p0=p1 : q0=q1 : r0=r1 : s0=s1
Picture1.PSet (x1, p1*lambda1), QBColor(15) ' Th-232 흰색
Picture1.PSet (x1, q1*lambda2), QBColor(9) ' Ra-228 연파랑
Picture1.PSet (x1, r1*lambda3), QBColor(14) ' Ac-228 연노랑
Picture1.PSet (x1, s1*lambda4), QBColor(12) ' Th-228 연빨강
Next I
End Sub

Public Function fnf(ByVal t As Double, ByVal n1 As Double, ByVal n2 As Double, ByVal
n3 As Double, ByVal n4 As Double) As Double
    fnf = -lambda1 * n1
End Function

Public Function fng(ByVal t As Double, ByVal n1 As Double, ByVal n2 As Double, ByVal
n3 As Double, ByVal n4 As Double) As Double
    fng = lambda1 * n1 - lambda2 * n2
End Function

Public Function fnh(ByVal t As Double, ByVal n1 As Double, ByVal n2 As Double, ByVal
n3 As Double, ByVal n4 As Double) As Double
    fnh = lambda2 * n2 - lambda3 * n3
End Function

```

프로그램 1. 연속붕괴 simulation 프로그램 code(계속)

```

Public Function fnj(ByVal t As Double, ByVal n1 As Double, ByVal n2 As Double, ByVal
n3 As Double, ByVal n4 As Double) As Double
    fnj = lambda3 * n3 - lambda4 * n4
End Function

Private Sub Command2_Click()
    Picture1.Cls
End Sub

Private Sub Command3_Click()
    End
End Sub

```

프로그램 1. 연속붕괴 simulation 프로그램 code(계속)

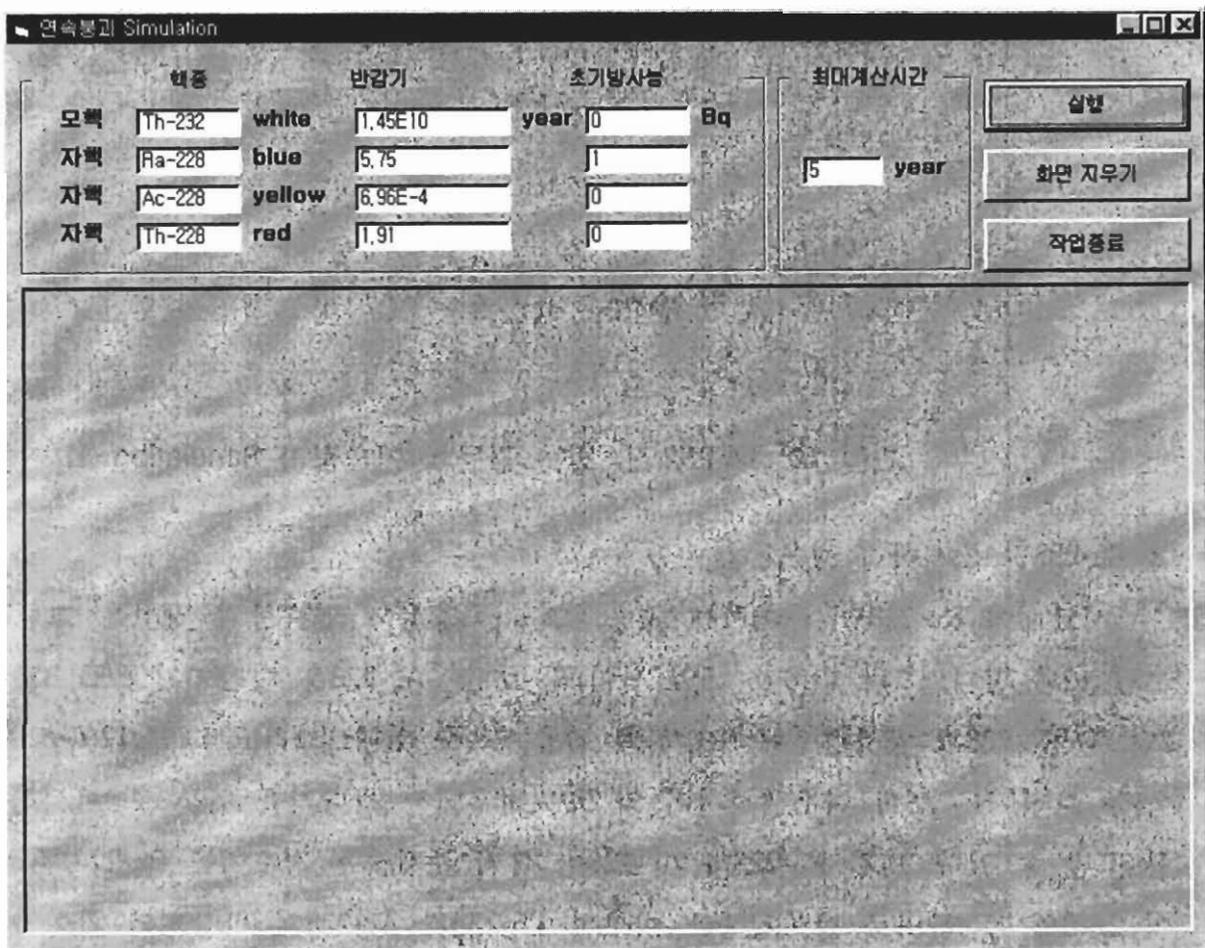


그림 9. 연속붕괴 simulation 프로그램 실행 화면

3. 연속붕괴에 의한 Th-228의 방사능 변화

① Th-232만 존재하는 경우

시료내에 Th-232만 존재한다고 가정한 경우에 Th-232와 그 자핵종들의 연속붕괴 양상은 그림 10과 같다. Ra-228과 Ac-228은 곧바로 방사평형에 도달하므로 동일한 방사능 가지게 되며, 약 50년 후에는 Th-232와 그 자핵종들이 모두 방사평형에 도달하게 된다. 그러나 방사평형에 도달하기 전이라도 상당량의 Th-228의 방사능이 내부 생성(ingrowth)됨을 알 수 있다.

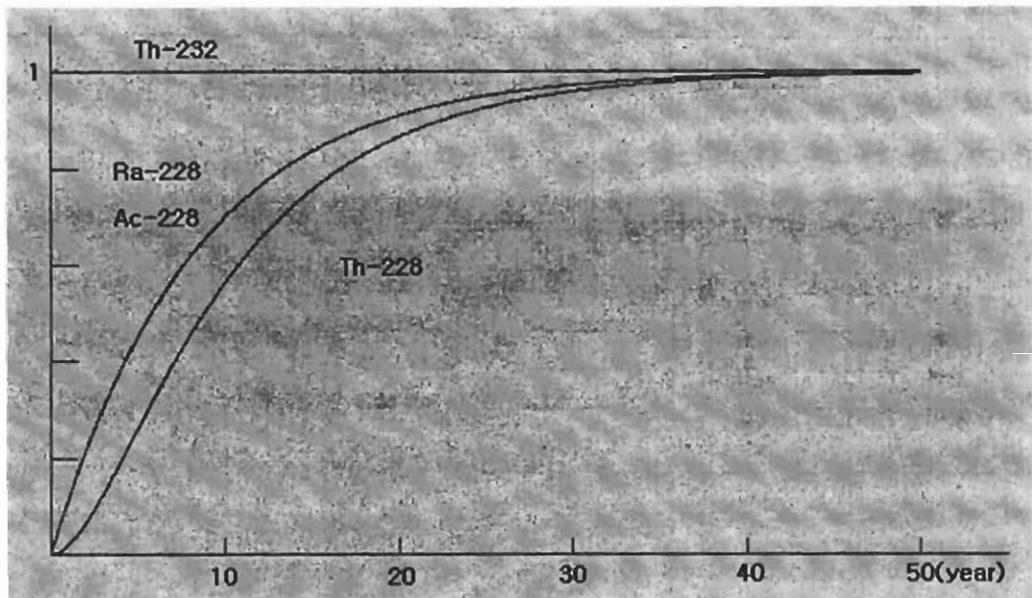


그림 10. Th-232 만 있는 경우의 연속붕괴 Simulation

② Ra-228만 존재하는 경우

시료내에 Ra-228만 존재하는 경우, 그 자핵종들의 연속붕괴 양상은 그림 11~그림 12와 같다. 그림 11(0 ~ 5일 사이)을 보면 Ac-228은 반감기가 6.13 h로서 약 2일 후 Ra-228과 방사평형에 도달하게 됨을 알 수 있다. 그리고 그림 12(0~10년 사이)를 보면 Th-228이 내부생성되어 약 5년 전후에서 최대치를 이룬 후 서서히 감소함을 알 수 있다. 또한 Ra-228과 Ac-228이 함께 존재하는 경우에는 Ra-228과 Ac-228이 2~3일 후 곧바로 방사평형을 이루며 Th-228과 Ac-228의 반감기의 차이가 크므로 Ac-228의 방사능이 매우 크지 않는 한 Ac-228의 방사능은 Th-228의 방사능에 영향을 거의 주지 않는다.

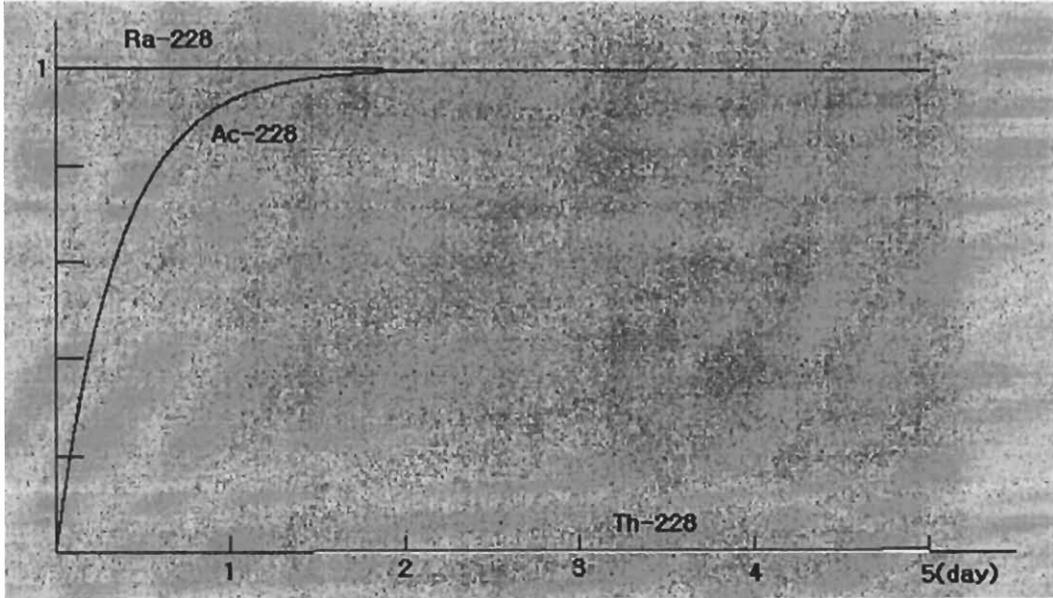


그림 11. Ra-228만 존재하는 경우의 연속붕괴 simulation(0-5 day).

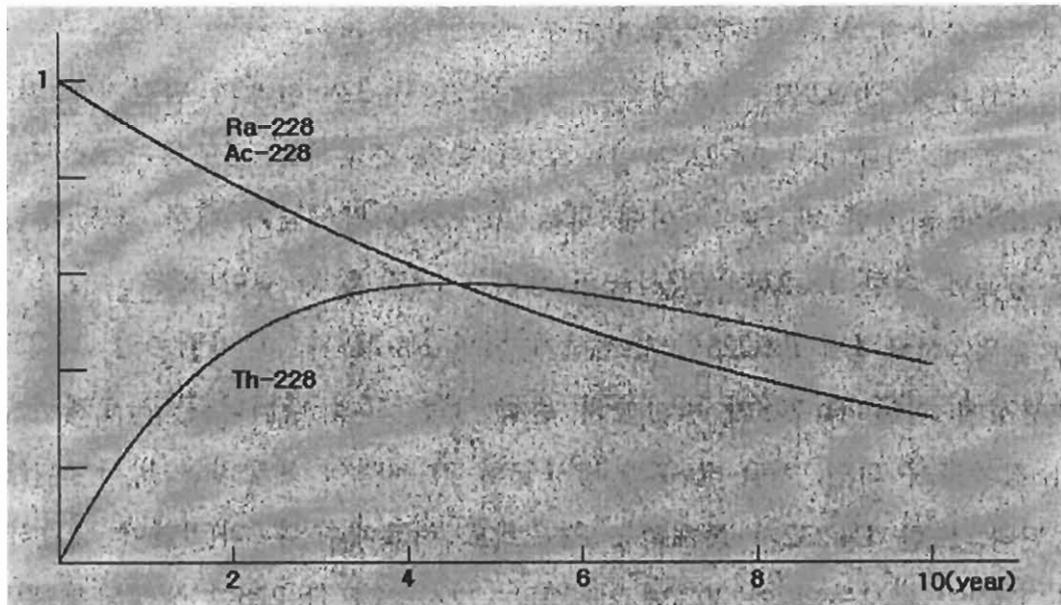


그림 12. Ra-228 있는 경우의 연속붕괴 simulation(0-10 year).

③ Ac-228만 존재하는 경우

시료내에 Ac-228만 존재하는 경우에는 그림 13과 같이 Ac-228이 2~3일 후 대부분 붕괴하여 Th-228로 변환되지만 Th-228과 Ac-228의 반감기로 차이로 Ac-228의 방사능이 Th-228의 방사능에 거의 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

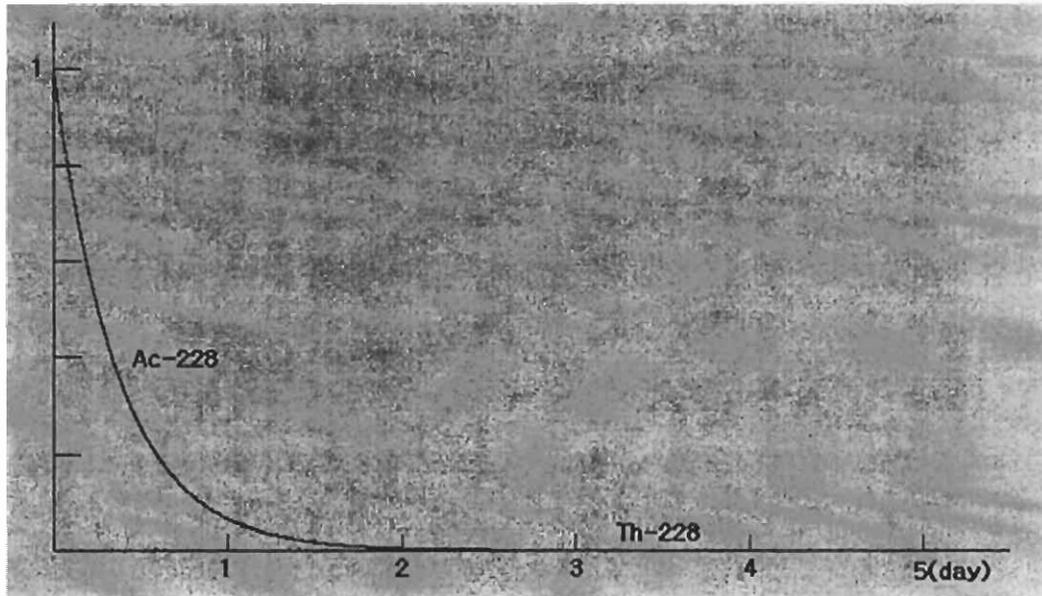


그림 13. Ac-228만 존재하는 경우의 연속붕괴 simulation.

④ 연속붕괴에 의한 Th-228의 방사능

시료내에 Th-228만이 존재하는 경우에는 Th-228 자체의 반감기에 따라 붕괴하게 될 것이며, 시료내에 Ac-228과 Th-228이 함께 존재하는 경우에는 Ac-228이 붕괴하여 Th-228이 되지만 반감기 차이에 의해 Ac-228의 방사능이 매우 크지 않는 한 Ac-228의 붕괴에 의한 Th-228의 방사능의 증가는 크지 않을 것이다.

반면, 시료내에 Ra-228이 존재하게 되면 Ra-228과 그 자핵종인 Ac-228에 의한 내부생성에 의해 Th-228의 방사능의 변화 매우 크게 나타난다. 시료채취 후 약 4-5년이 경과하게 되면, 처음 Ra-228 방사능의 약 60%에 해당하는 방사능의 Th-228이 생성된다. 또한 Th-232가 존재하는 경우에도 시료채취 후 약 5년이 경과하게 되면, 처음 Th-232 방사능의 약 30%에 해당하는 방사능의 Th-228이 생성되게 된다.

따라서 식품류 시료중에 토륨계열의 방사성핵종이 존재하고 시료채취 후 상당한 시간이 경과한 후에 Th-228의 방사능을 분석하는 경우 Th-228만의 측정으로는 시료채취시의 Th-228의 방사능을 정확히 평가할 수 없으며, 방사평형을 이루고 있는 Ra-228과 Ac-228의 방사능을 정확히 알아야만 시료채취시의 Th-228의 방사능을 평가할 수 있다. 그림 14는 시료내에 0.1 Bq의 Th-228, 0.2 Bq의 Th-232, 1 Bq의 Ra-228, 0.3 Bq의 Ac-228이 있는 경우 각 핵종의 방사능의 변화를 simulation 한 것

이다. 앞서 살펴본 바와 같이 Ac-228는 방사능이 매우 크지 않는 한 Th-228의 방사능에 큰 영향을 주지 않으며, Th-232는 식품류 중에 그 방사능이 크지 않으므로 Th-228의 방사능에 큰 영향을 주지 않으며, 주로 Ra-228이 Th-228의 내부생성에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

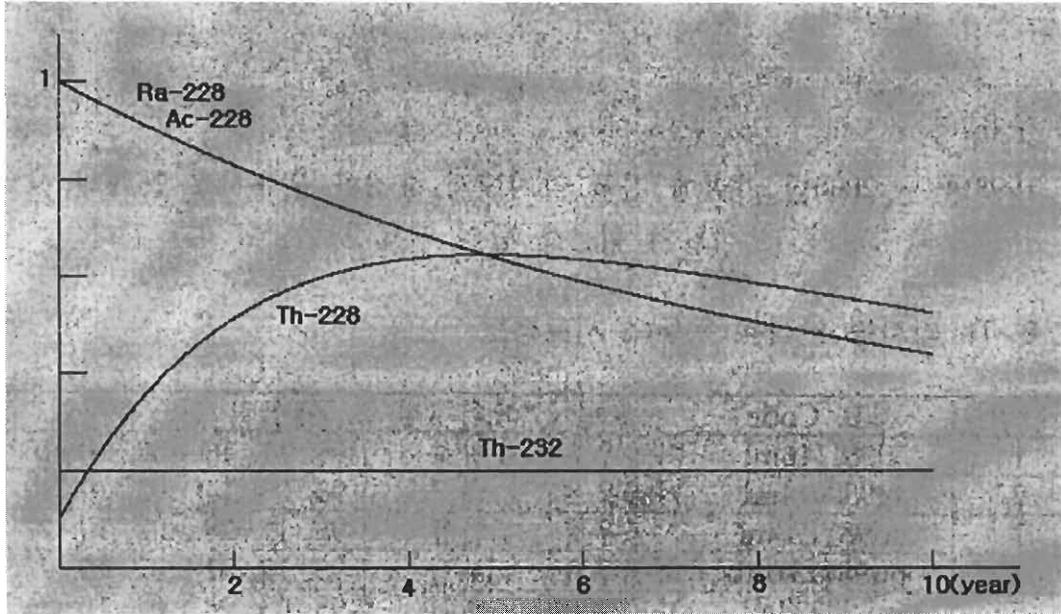


그림 14. 토륨계열의 방사성핵종이 공존하는 경우의 방사능의 변화.

한편, 식품 시료내에 동일한 방사능의 Th-228과 Th-230 및 Th-232가 포함되어있다고 가정하면, 방사능농도가 같더라도 실제 각 동위원소의 함유량은 매우 다르다. 즉, 방사능(A)은 $A = \lambda N$ (N은 원자수, λ 는 붕괴상수)로 표현되므로 방사능의 세기가 같더라도 반감기의 차이에 의해 포함된 원자수가 다르므로 시료에 포함된 Th 동위원소의 함유량은 매우 다르다.

예로서 생체 식품시료 1 kg에 각각 1 mBq의 Th-228과 Th-230 및 Th-232가 포함되었다고 가정하면, 시료에는 Th-228과 Th-230 및 Th-232가 각각 3.293×10^{-17} g, 1.30992×10^{-12} g, 2.46278×10^{-7} g이 포함되어 있다. 따라서 Th-228의 함량은 Th-232 함량의 $1/10^{10}$ 이 된다.

마찬가지로 생체 식품시료 1 kg에 1 mBq의 Th-228과 Ra-228 및 Ac-228이 포함되었다고 가정하면, 시료에는 Th-228과 Ra-228 및 Ac-228이 각각 3.293×10^{-17} g, 9.9052×10^{-17} g, 1.20546×10^{-20} g이 포함되어 있다.

제5절 시료채취

식품류중의 Th의 방사능농도분포를 조사하기 위하여 1998년 ~ 2000년 사이 전국 지방방사능 측정소에서 채취한 우유, 육류 및 곡류시료 100개에 대한 Th의 방사능 농도를 분석하였다.

① 우유

1998년 ~ 2000년 사이에 전국 각지에서 채취한 우유시료 26개의 시료 채취지점, 채취일자, 측정일자 및 시료의 회분율 등의 시료정보는 표 8과 같다.

표 8. Th 방사능 분석용 우유의 시료정보

| 일련번호 | 시료 Code | 시료명 | 채취지점 | 채취일 | 측정일 | 회분율(%) |
|------|------------|------|------|------------|------------|--------|
| 1 | kj981116ml | 가공우유 | 광주 | 98. 11. 16 | 02. 10. 10 | 0.78 |
| 2 | tg980914ml | 가공우유 | 대구 | 98. 09. 14 | 02. 10. 10 | 0.73 |
| 3 | ad981128ml | 가공우유 | 안동 | 98. 11. 28 | 02. 10. 27 | 0.76 |
| 4 | pu981231ml | 가공우유 | 부산 | 98. 12. 31 | 02. 10. 27 | 0.76 |
| 5 | cc980328ml | 가공우유 | 춘천 | 98. 03. 28 | 02. 10. 26 | 0.8 |
| 6 | jj980828ml | 가공우유 | 제주도 | 98. 08. 28 | 02. 10. 26 | 0.69 |
| 7 | tj980414ml | 가공우유 | 대전 | 98. 04. 14 | 02. 10. 26 | 0.7 |
| 8 | gr981001ml | 가공우유 | 강릉 | 98. 10. 01 | 02. 10. 26 | 0.68 |
| 9 | gs981023ml | 가공우유 | 군산 | 98. 10. 23 | 02. 10. 27 | 0.75 |
| 10 | bs990920ml | 가공우유 | 부산 | 99. 09. 20 | 02. 10. 06 | 0.72 |
| 11 | gr990819ml | 가공우유 | 강릉 | 99. 08. 19 | 02. 09. 22 | 0.81 |
| 12 | kj991009ml | 가공우유 | 광주 | 99. 10. 09 | 02. 10. 10 | 0.74 |
| 13 | se990907ml | 가공우유 | 서울 | 99. 09. 07 | 02. 10. 06 | 0.71 |
| 14 | se980831ml | 가공우유 | 서울 | 98. 08. 31 | 02. 10. 20 | 0.71 |
| 15 | gs990322ml | 가공우유 | 군산 | 99. 03. 22 | 02. 10. 10 | 0.72 |
| 16 | jj990616ml | 가공우유 | 제주도 | 99. 06. 16 | 02. 10. 06 | 0.68 |
| 17 | tj990316ml | 가공우유 | 대전 | 99. 03. 16 | 02. 10. 06 | 0.67 |
| 18 | ad990316ml | 가공우유 | 안동 | 99. 03. 16 | 02. 10. 20 | 0.83 |
| 19 | tg980129ml | 가공우유 | 대구 | 98. 01. 29 | 02. 10. 27 | 0.77 |
| 20 | cc990327ml | 가공우유 | 춘천 | 99. 03. 27 | 02. 10. 27 | 2 |
| 21 | ny2K1115ml | 가공우유 | 남양유업 | 02 .11. 15 | 02. 10. 26 | 0.75 |
| 22 | ny2K0414ml | 가공우유 | 남양유업 | 02 .04. 14 | 02. 10. 20 | 0.63 |
| 23 | ny2K0125ml | 가공우유 | 남양유업 | 02 .01. 25 | 02. 11. 10 | 0.71 |
| 24 | ny2K0216ml | 가공우유 | 남양유업 | 02. 02. 16 | 02. 11. 10 | 0.73 |
| 25 | ny2K0316ml | 가공우유 | 남양유업 | 02. 03. 16 | 02. 10. 26 | 0.7 |
| 26 | ny2K1213ml | 가공우유 | 남양유업 | 02. 12. 13 | 02. 10. 20 | 0.68 |

② 육류(돼지고기, 쇠고기, 닭고기)

1998년 ~ 1999년 사이에 전국 각지에서 채취한 돼지고기 12개, 쇠고기 12개, 닭고기 12개 등 육류 36개 시료의 시료 채취지점, 채취일자, 측정일자 및 시료의 회분율 등의 시료정보는 표 9 ~ 표 11과 같다.

표 9. Th 방사능 분석용 육류(돼지고기)의 시료정보

| 일련번호 | 시료 Code | 시료명 | 채취지점 | 채취일 | 측정일 | 회분율(%) |
|------|-----------|------|------|------------|------------|--------|
| 27 | gr980904p | 돼지고기 | 강릉 | 98. 09. 04 | 02. 11. 15 | 1.1 |
| 28 | gr990604p | 돼지고기 | 강릉 | 99. 06. 04 | 02. 11. 15 | 1.0 |
| 29 | se980911p | 돼지고기 | 서울 | 98. 09. 11 | 02. 11. 10 | 0.83 |
| 30 | se990708p | 돼지고기 | 서울 | 99. 07. 08 | 02. 11. 10 | 0.99 |
| 31 | kj980603p | 돼지고기 | 광주 | 98. 06. 03 | 02. 11. 10 | 1.06 |
| 32 | gs980407p | 돼지고기 | 군산 | 98. 04. 07 | 02. 11. 15 | 0.69 |
| 33 | tj981001p | 돼지고기 | 대전 | 98. 10. 01 | 03. 03. 02 | 1.3 |
| 34 | cc980328p | 돼지고기 | 춘천 | 98. 03. 28 | 02. 11. 15 | 0.9 |
| 35 | tg990914p | 돼지고기 | 대구 | 99. 09. 14 | 02. 11. 15 | 1.0 |
| 36 | ad990501p | 돼지고기 | 안동 | 99. 05. 01 | 02. 11. 15 | 0.78 |
| 37 | jj990622p | 돼지고기 | 제주도 | 99. 06. 22 | 02. 11. 15 | 0.94 |
| 38 | bs990419p | 돼지고기 | 부산 | 99. 04. 19 | 02. 11. 15 | 0.91 |

표 10. Th 방사능 분석용 육류(쇠고기)의 시료정보

| 일련번호 | 시료 Code | 시료명 | 채취지점 | 채취일 | 측정일 | 회분율(%) |
|------|---------------|-----|------|------------|------------|--------|
| 39 | gs980414meat | 쇠고기 | 군산 | 98. 04. 14 | 02. 12. 28 | 1.05 |
| 40 | tj981001pmeat | 쇠고기 | 대전 | 98. 10. 01 | 02. 12. 15 | 0.85 |
| 41 | kj980612meat | 쇠고기 | 광주 | 98. 06. 12 | 02. 12. 15 | 1.06 |
| 42 | se980722meat | 쇠고기 | 서울 | 98. 07. 22 | 02. 12. 15 | 0.8 |
| 43 | cc980411meat | 쇠고기 | 춘천 | 98. 04. 11 | 02. 12. 15 | 0.5 |
| 44 | jj981219meat | 쇠고기 | 제주도 | 98. 12. 19 | 03. 01. 22 | 1.69 |
| 45 | jj990720meat | 쇠고기 | 제주도 | 99. 07. 20 | 03. 02. 22 | 0.96 |
| 46 | tg991105meat | 쇠고기 | 대구 | 99. 11. 05 | 03. 02. 22 | 1.12 |
| 47 | bs990426meat | 쇠고기 | 부산 | 99. 04. 26 | 02. 12. 11 | 2.54 |
| 48 | se990817meat | 쇠고기 | 서울 | 99. 08. 17 | 03. 02. 22 | 0.83 |
| 49 | ad990517meat | 쇠고기 | 안동 | 99. 05. 17 | 02. 12. 28 | 1.1 |
| 50 | gr990604meat | 쇠고기 | 강릉 | 99. 06. 04 | 02. 12. 15 | 0.84 |

표 11. Th 방사능 분석용 육류(닭고기)의 시료정보

| 일련번호 | 시료 Code | 시료명 | 채취지점 | 채취일 | 측정일 | 회분율(%) |
|------|-----------|-----|------|------------|------------|--------|
| 51 | kj981202c | 닭고기 | 광주 | 98. 12. 02 | 03. 02. 22 | 0.81 |
| 52 | se981025c | 닭고기 | 서울 | 98. 10. 25 | 03. 02. 22 | 0.87 |
| 53 | bs981229c | 닭고기 | 부산 | 98. 12. 29 | 03. 02. 22 | 0.64 |
| 54 | tj981117c | 닭고기 | 대전 | 98. 11. 17 | 03. 02. 22 | 0.63 |
| 55 | gs981007c | 닭고기 | 군산 | 98. 10. 07 | 02. 12. 28 | 0.7 |
| 56 | cc980411c | 닭고기 | 춘천 | 98. 04. 11 | 03. 01. 22 | 2.1 |
| 57 | gr990616c | 닭고기 | 강릉 | 99. 06. 16 | 02. 12. 28 | 0.77 |
| 58 | bs990426c | 닭고기 | 부산 | 99. 04. 26 | 02. 12. 28 | 0.51 |
| 59 | ad991115c | 닭고기 | 안동 | 99. 11. 15 | 02. 12. 28 | 0.92 |
| 60 | se991019c | 닭고기 | 서울 | 99. 10. 19 | 03. 02. 22 | 0.68 |
| 61 | jj991223c | 닭고기 | 제주도 | 99. 12. 23 | 03. 02. 22 | 0.7 |
| 62 | tg991020c | 닭고기 | 대구 | 99. 10. 20 | 03. 02. 22 | 1.04 |

③ 곡류(밀, 콩, 쌀)

1998년 ~ 1999년 사이에 전국 각지에서 채취한 밀 12개, 콩 13개, 쌀 13개 등 곡류 38개 시료의 시료 채취지점, 채취일자, 측정일자 및 시료의 회분율 등의 시료정보는 표 12 ~ 표 14과 같다.

표 12. Th 방사능 분석용 곡류(밀)의 시료정보

| 일련번호 | 시료 Code | 시료명 | 채취지점 | 채취일 | 측정일 | 회분율(%) |
|------|-----------|-----|------|------------|------------|--------|
| 63 | gs981007m | 밀 | 군산 | 98. 10. 07 | 03. 01. 22 | 0.78 |
| 64 | tj980429m | 밀 | 대전 | 98. 04. 29 | 03. 01. 22 | 0.92 |
| 65 | cc980803m | 밀 | 춘천 | 98. 08. 03 | 03. 01. 22 | 0.93 |
| 66 | tg981113m | 밀 | 대구 | 98. 11. 13 | 03. 01. 22 | 0.69 |
| 67 | kj980623m | 밀 | 광주 | 98. 06. 23 | 03. 01. 22 | 1.24 |
| 68 | se980817m | 밀 | 서울 | 98. 08. 17 | 03. 01. 22 | 1.15 |
| 69 | gr991129m | 밀 | 강릉 | 99. 11. 29 | 03. 01. 22 | 1.27 |
| 70 | jj991124m | 밀 | 제주도 | 99. 11. 24 | 02. 12. 28 | 0.4 |
| 71 | se990907m | 밀 | 서울 | 99. 09. 07 | 02. 12. 28 | 0.98 |
| 72 | ad991018m | 밀 | 안동 | 99. 10. 18 | 02. 12. 28 | 1.22 |
| 73 | tg990821m | 밀 | 대구 | 98. 08. 21 | 02. 12. 28 | 0.6 |
| 74 | bs990920m | 밀 | 부산 | 99. 09. 20 | 03. 01. 22 | 0.88 |

표 13. Th 방사능 분석용 곡류(콩)의 시료정보

| 일련번호 | 시료 Code | 시료명 | 채취지점 | 채취일 | 측정일 | 회분율(%) |
|------|-----------|-----|------|------------|------------|--------|
| 75 | kj980525s | 콩 | 광주 | 98. 05. 25 | 02. 11. 24 | 6.01 |
| 76 | cc980521s | 콩 | 춘천 | 98. 05. 21 | 02. 11. 24 | 4.6 |
| 77 | se980727s | 콩 | 서울 | 98. 07. 27 | 03. 03. 02 | 4.67 |
| 78 | gs980325s | 콩 | 군산 | 98. 03. 25 | 02. 12. 11 | 5.42 |
| 79 | tj981129s | 콩 | 대전 | 98. 11. 29 | 02. 11. 24 | 5.74 |
| 80 | tg980520s | 콩 | 대구 | 98. 05. 20 | 02. 11. 24 | 5.39 |
| 81 | jj981212s | 콩 | 제주도 | 98. 12. 12 | 02. 12. 11 | 4.99 |
| 82 | se990629s | 콩 | 서울 | 99. 06. 29 | 02. 11. 24 | 4.93 |
| 83 | gr990429s | 콩 | 강릉 | 99. 04. 29 | 02. 12. 11 | 5.31 |
| 84 | tg990129s | 콩 | 대구 | 99. 01. 29 | 02. 11. 24 | 4.87 |
| 85 | jj991104s | 콩 | 제주도 | 99. 11. 04 | 02. 12. 11 | 5.34 |
| 86 | ad991102s | 콩 | 안동 | 99. 11. 02 | 02. 11. 24 | 6.19 |
| 87 | bs990719s | 콩 | 부산 | 99. 07. 19 | 02. 11. 24 | 5.47 |

표 14. Th 방사능 분석용 곡류(쌀)의 시료정보

| 일련번호 | 시료 Code | 시료명 | 채취지점 | 채취일 | 측정일 | 회분율(%) |
|------|--------------|-----|------|------------|------------|--------|
| 88 | kj981009rice | 쌀 | 광주 | 98. 10. 09 | 03. 03. 02 | 0.39 |
| 89 | se980924rice | 쌀 | 서울 | 98. 09. 24 | 03. 03. 02 | 0.41 |
| 90 | gs981109rice | 쌀 | 군산 | 98. 11. 09 | 03. 03. 08 | 0.35 |
| 91 | cc981113rice | 쌀 | 춘천 | 98. 11. 13 | 03. 03. 08 | 0.4 |
| 92 | tj981129rice | 쌀 | 대전 | 98. 11. 29 | 03. 03. 08 | 0.35 |
| 93 | tg981017rice | 쌀 | 대구 | 98. 10. 17 | 03. 03. 02 | 0.57 |
| 94 | bs981217rice | 쌀 | 부산 | 98. 12. 17 | 03. 03. 08 | 0.49 |
| 95 | ad991006rice | 쌀 | 안동 | 99. 10. 06 | 03. 03. 08 | 0.4 |
| 96 | gr991129rice | 쌀 | 강릉 | 99. 11. 29 | 03. 03. 08 | 0.44 |
| 97 | se991028rice | 쌀 | 서울 | 99. 10. 28 | 03. 03. 08 | 0.36 |
| 98 | bs990920rice | 쌀 | 부산 | 99. 09. 20 | 03. 03. 08 | 0.44 |
| 99 | jj991002rice | 쌀 | 제주도 | 99. 10. 02 | 03. 03. 02 | 0.26 |
| 100 | tg991115rice | 쌀 | 대구 | 99. 11. 15 | 03. 03. 08 | 0.49 |

제6절 식품류중의 Th 방사능농도의 분포특성

1. 우유의 Th 분포특성

가. 우유의 Th 방사능농도

1998년 ~ 2000년 전국 각지에서 채취한 우유 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과는 표 15와 같다. Th-228의 경우 0.51 ~ 8.52 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-228의 전국 평균 방사능 농도는 3.99 ± 2.35 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 4.70 ± 2.02 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 2.45 ± 2.71 mBq/kg-fresh, 2000년의 경우 4.98 ± 1.07 mBq/kg-fresh)였다. Th-230의 경우는 0.14 ~ 2.45 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-230의 전국 평균 방사능 농도는 0.74 ± 0.57 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 0.86 ± 0.54 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 0.58 ± 0.72 mBq/kg-fresh, 2000년의 경우 0.74 ± 0.37 mBq/kg-fresh)였다. 그리고 Th-232의 방사능농도는 0.01 ~ 2.46 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-232의 전국 평균 방사능 농도는 0.30 ± 0.52 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 0.31 ± 0.36 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 0.34 ± 0.80 mBq/kg-fresh, 2000년의 경우 0.21 ± 0.25 mBq/kg-fresh)였다.

그림 15는 우유의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분석결과를 시료채취 지역과 채취연도에 따라 나타낸 것이다. Th-228의 경우 1999년 시료가 전반적으로 방사능농도가 낮은 것으로 나타났으나, Th-230과 Th-232의 경우 지역적인 분포경향이나 채취연도에 따른 특별한 차이점은 나타나지 않았다. 그리고 전반적으로 Th-228의 방사능농도가 Th-230이나 Th-232의 방사능농도 보다 높게 나타났는데 이는 시료의 특성에 기인함과 아울러 본 연구에서와 같이 측정일자가 시료채취일자로부터 상당한 시간이 경과한 경우 앞서 고찰한 바와 같이 우유중에 직접적으로 축적된 Th-228이외에 Ra-228과 Ac-228의 연속붕괴로 내부생성(ingrowth)된 것에 부분적으로 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 식품류 시료의 경우 생산, 가공, 유통 및 섭취까지의 시간이 다르므로 섭취시점에서의 Th-228의 농도는 다소 다를 수 있을 것으로 판단된다.

표 15. 우유의 Th 방사능농도 분석결과

| 시료 Code | 채취지점 | 채취일자 | Th의 방사능 농도(mBq/kg-fresh) | | |
|------------|------|------------|--------------------------|------------|-----------|
| | | | Th-228 | Th-230 | Th-232 |
| kj981116ml | 광주 | 98. 11. 16 | 1.54±0.14 | 0.69±0.09 | 0.17±0.05 |
| tg980914ml | 대구 | 98. 09. 14 | 1.10±0.11 | 0.53±0.08 | 0.17±0.05 |
| ad981128ml | 안동 | 98. 11. 28 | 5.46±0.32 | 0.48±0.10 | 0.23±0.07 |
| pu981231ml | 부산 | 98. 12. 31 | 5.22±0.57 | 0.30±0.14 | 0.06±0.06 |
| cc980328ml | 춘천 | 98. 03. 28 | 6.91±1.13 | 1.87±0.59 | 1.2±0.49 |
| jj980828ml | 제주도 | 98. 08. 28 | 3.61±0.63 | 1.46±0.41 | 0.1±0.1 |
| tj980414ml | 대전 | 98. 04. 14 | 4.20±0.44 | 1.34±0.25 | 0.13±0.09 |
| gr981001ml | 강릉 | 98. 10. 01 | 4.51±0.80 | 0.14±0.20 | 0.13±0.13 |
| gs981023ml | 군산 | 98. 10. 23 | 5.90±0.93 | 0.56±0.31 | 0.13±0.13 |
| bs990920ml | 부산 | 99. 09. 20 | 0.85±0.13 | 0.46±0.09 | 0.02±0.03 |
| gr990819ml | 강릉 | 99. 08. 19 | 2.23±0.21 | 0.27±0.06 | 0.17±0.06 |
| kj991009ml | 광주 | 99. 10. 09 | 1.54±0.13 | 0.34±0.06 | 0.01±0.02 |
| se990907ml | 서울 | 99. 09. 07 | 0.89±0.11 | 0.33±0.07 | 0.08±0.04 |
| se980831ml | 서울 | 98. 08. 31 | 5.76±0.27 | 0.88±0.10 | 0.32±0.06 |
| gs990322ml | 군산 | 99. 03. 22 | 1.35±0.14 | 0.73±0.11 | 0.05±0.03 |
| jj990616ml | 제주도 | 99. 06. 16 | 0.84±0.21 | 0.14±0.10 | 0.05±0.07 |
| tj990316ml | 대전 | 99. 03. 16 | 0.51±0.13 | 0.14±0.07 | 0.06±0.05 |
| ad990316ml | 안동 | 99. 03. 16 | 5.34±0.30 | 0.35±0.08 | 0.2±0.06 |
| tg980129ml | 대구 | 98. 01. 29 | 7.52±0.63 | 1.20±0.25 | 0.82±0.2 |
| cc990327ml | 춘천 | 99. 03. 27 | 8.52±0.10 | 2.45±0.50 | 2.46±0.53 |
| ny2K1115ml | 남양유업 | 2K .11. 15 | 6.73±0.61 | 0.85±0.22 | 0.05±0.08 |
| ny2K0414ml | 남양유업 | 2K .04. 14 | 4.66±0.52 | 0.71±0.20 | 0.71±0.2 |
| ny2K0125ml | 남양유업 | 2K .01. 25 | 5.15±0.37 | 1.41±19.00 | 0.25±0.08 |
| ny2K0216ml | 남양유업 | 2K. 02. 16 | 5.43±0.45 | 0.69±0.14 | 0.08±0.05 |
| ny2K0316ml | 남양유업 | 2K. 03. 16 | 3.69±0.59 | 0.43±0.22 | 0.09±0.14 |
| ny2K1213ml | 남양유업 | 2K. 12. 13 | 4.20±0.29 | 0.37±0.08 | 0.09±0.05 |

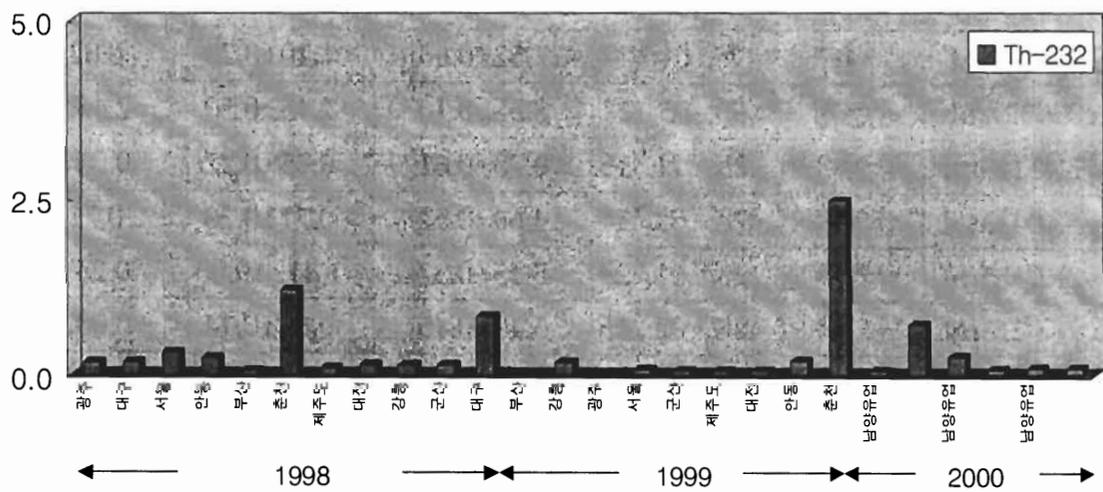
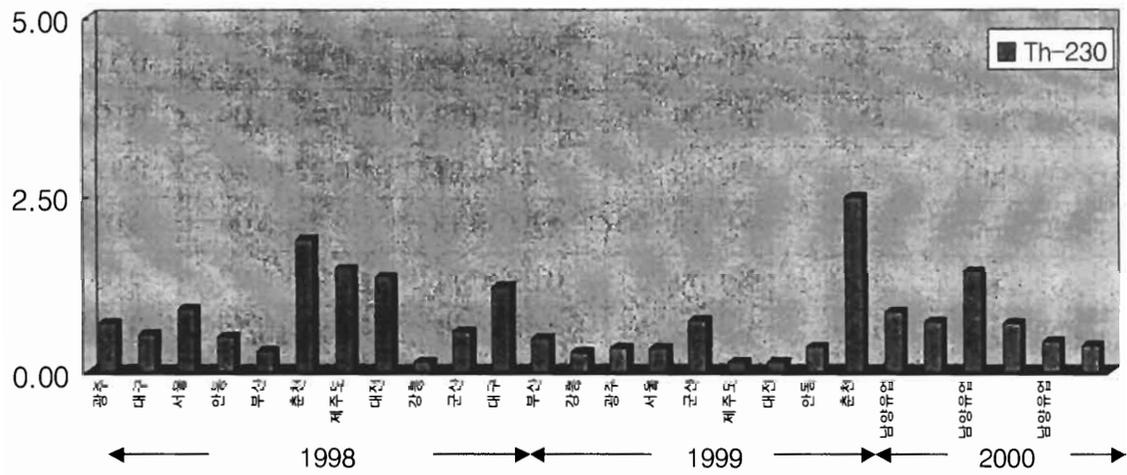
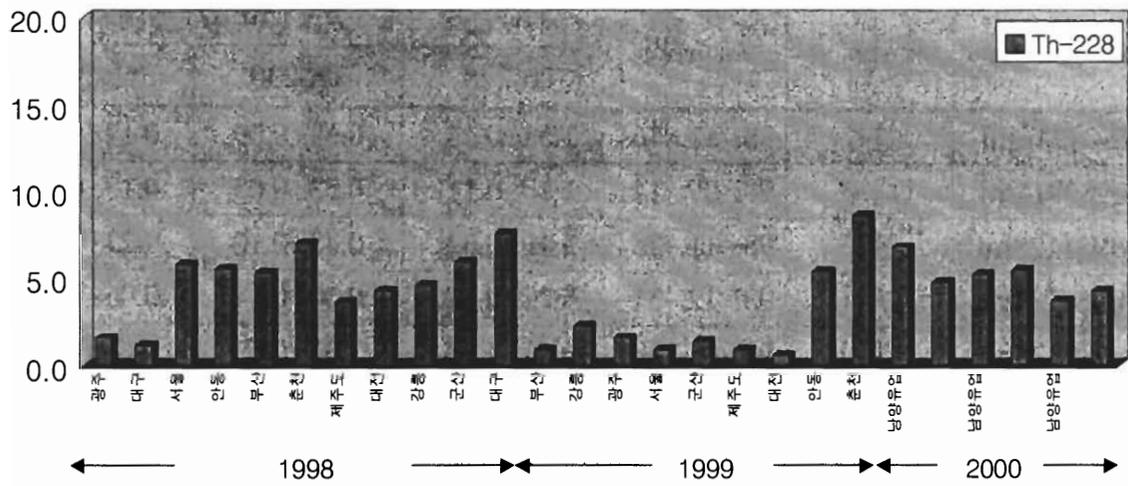


그림 15. 우유의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분포

한편, 표 16은 본 연구에서 측정한 우유중의 Th 방사능농도와 외국 여러 나라에서 측정한 결과를 함께 나타내어 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 본 연구에서 조사한 우리나라 우유중의 Th의 방사능농도는 외국에서 조사한 결과와 거의 동일한 준위임을 알 수 있었다. 그리고 폴란드에서의 측정결과를 보면 우유중의 Th-228의 방사능 농도가 Th-230이나 Th-232의 방사능농도보다 다소 높게 보고되고 있음을 알 수 있다.

표 16. 여러 나라 우유중의 Th 방사능농도 비교

| 국 가 | | 방사능농도(mBq/kg) | | | 인용문헌 |
|-----|----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | | ²²⁸ Th | ²³⁰ Th | ²³² Th | |
| 한 국 | 범위 | 0.51~8.52 | 0.14~2.45 | 0.01~2.46 | Present Work |
| | 평균 | 3.99±2.35 | 0.74±0.57 | 0.30±0.52 | |
| 미국 | | | 0.4 | 0.27 | (9) |
| 영국 | | 56 | | | (10) |
| 중국 | | | | 1.2 | (3) |
| 일본 | | | | 0.29 | (4) |
| 폴란드 | | 2.64 | 1.15 | 1.19 | (12) |

2. 육류의 Th 분포특성

가. 돼지고기의 Th 방사능 농도분포

1998년 ~ 1999년 전국 각지에서 채취한 돼지고기 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과는 표 17과 같다. Th-228의 경우 1.57 ~ 18.0 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-228의 전국 평균 방사능 농도는 5.44 ± 4.99 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 3.98 ± 0.99 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 6.16 ± 6.07 mBq/kg-fresh)였다. Th-230의 경우는 2.98 ~ 8.97 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-230의 전국 평균 방사능 농도는 5.00 ± 1.99 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 4.62 ± 0.04 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 5.19 ± 2.34 mBq/kg-fresh)였다. 그리고 Th-232의 방사능농도는 0.25 ~ 9.32 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-232의 전국 평균 방사능 농도는 1.90 ± 2.56 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 1.08 ± 0.17 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 2.31 ± 3.12 mBq/kg-fresh)였다.

표 17. 돼지고기의 Th 방사능농도 분석결과

| 시료 Code | 채취지점 | 채취일자 | Th의 방사능 농도(mBq/kg-fresh) | | |
|-----------|------|----------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | Th-228 | Th-230 | Th-232 |
| gr980904p | 강릉 | 98.09.04 | 4.35 ± 0.40 | 6.12 ± 0.48 | 1.1 ± 0.2 |
| gr990604p | 강릉 | 99.06.04 | 3.64 ± 1.26 | 5.10 ± 1.48 | 0.73 ± 0.68 |
| se980911p | 서울 | 98.09.11 | 3.50 ± 0.39 | 2.98 ± 0.36 | 0.84 ± 0.19 |
| se990708p | 서울 | 99.07.08 | 2.03 ± 0.37 | 3.60 ± 0.49 | 0.25 ± 0.14 |
| kj980603p | 광주 | 98.06.03 | 5.17 ± 0.94 | 4.72 ± 0.89 | 1.22 ± 0.47 |
| gs980407p | 군산 | 98.04.07 | 2.91 ± 1.52 | 4.66 ± 1.86 | 1.16 ± 1.1 |
| tj981001p | 대전 | 98.10.01 | 8.57 ± 1.21 | 3.11 ± 0.73 | 2.46 ± 0.65 |
| cc980328p | 춘천 | 98.03.28 | 11.73 ± 0.58 | 8.97 ± 0.50 | 9.32 ± 0.51 |
| tg990914p | 대구 | 99.09.14 | 17.99 ± 3.95 | 7.33 ± 2.45 | 4.0 ± 1.9 |
| ad990501p | 안동 | 99.05.01 | 2.15 ± 0.39 | 3.14 ± 0.48 | 0.81 ± 0.25 |
| jj990622p | 제주도 | 99.06.22 | 1.61 ± 0.41 | 7.11 ± 0.87 | 0.28 ± 0.2 |
| bs990419p | 부산 | 99.04.19 | 1.57 ± 0.35 | 3.14 ± 0.49 | 0.64 ± 0.23 |

그림 16은 돼지고기의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분석결과를 시료 채취지역과 채취연도에 따라 나타낸 것이다. Th-228의 1999년도 대구시료에서 채취

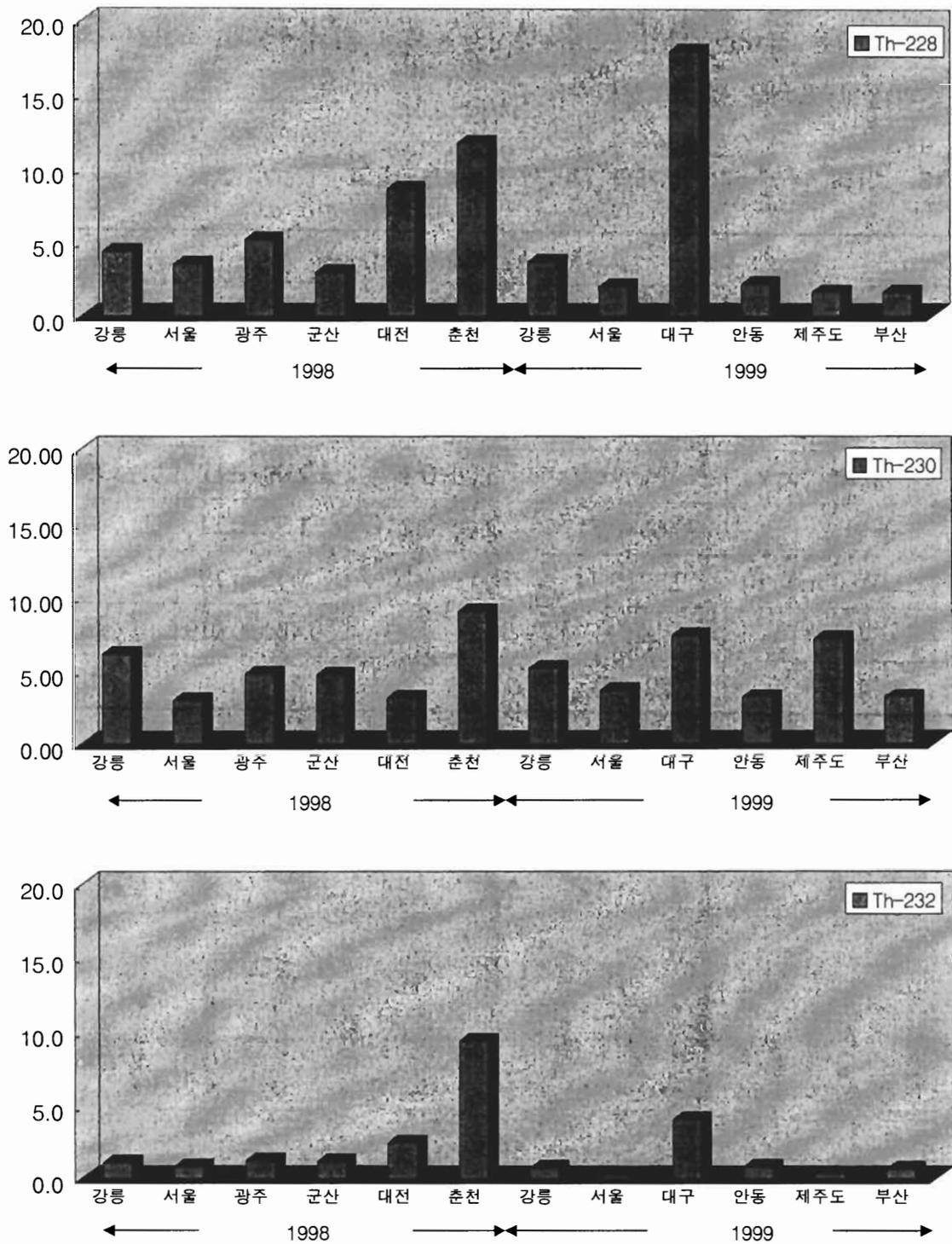


그림 16. 돼지고기의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분포

한 시료에서 다소 높게 나타났으나, 그 외에는 Th-228이나 Th-230과 Th-232 모두 지역적 분포특성이나 채취연도에 따른 분포경향은 나타나지 않았다.

한편, 표 18은 세계 여러 나라에서 조사된 우유 중의 Th의 방사능농도와 금번의 연구에서 조사된 결과를 함께 나타낸 것이다. Th-228, Th-230 및 Th-232 모두 본 연구에서 조사한 국내산 돼지고기의 방사능농도가 외국에서의 조사결과와 거의 동일한 준위내에 있음을 알 수 있었다.

표 18. 여러 나라 돼지고기의 Th 방사능농도 비교

| 국 가 | | 방사능농도(mBq/kg) | | | 인용문헌 |
|----------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | | ²²⁸ Th | ²³⁰ Th | ²³² Th | |
| 한 국 | 범위 | 1.57~18.0 | 2.98~8.97 | 0.25~9.32 | Present Work |
| | 평균 | 5.44±4.99 | 5.00±1.99 | 1.90±2.56 | |
| 미국 | | | 3.00±0.17 | 2.00±0.17 | (9)(meat) |
| 폴란드 | | 5.66±0.71 | 2.68±0.25 | 1.82±0.14 | (11) |
| 폴란드(Walbrzych) | | 2.39±0.44 | 0.73±0.26 | 0.52±0.19 | (12) |
| 일본 | | | | 0.404±0.019 | (6)(meat) |
| 영국 | | 22~93 | | | (10)(meat) |

나. 쇠고기의 Th 방사능 농도분포

1998년 ~ 1999년 전국 각지에서 채취한 쇠고기 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과는 표 19와 같다. Th-228의 경우 4.43 ~ 103 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-228의 전국 평균 방사능 농도는 29.8±36.6 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 36.7±36.1 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 23.0±39.1 mBq/kg-fresh)였다. Th-230의 경우는 1.94 ~ 9.80 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-230의 전국 평균 방사능 농도는 3.84±2.23 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 4.87±3.09 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 2.81±0.73 mBq/kg-fresh)였다. 그리고 Th-232의 방사능농도는 1.02 ~ 5.34 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-232의 전국 평균 방사능 농도는 2.43±1.48 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 2.92±1.54 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 1.95±1.38 mBq/kg-fresh)였다.

표 19. 쇠고기의 Th 방사능농도 분석결과

| 시료 Code | 채취지점 | 채취일자 | Th의 방사능 농도(mBq/kg-fresh) | | |
|---------------|------|----------|--------------------------|-----------|-----------|
| | | | Th-228 | Th-230 | Th-232 |
| gs980414meat | 군산 | 98.04.14 | 12.01±1.67 | 5.80±1.09 | 1.89±0.6 |
| tj981001pmeat | 대전 | 98.10.01 | 10.75±1.56 | 9.80±1.48 | 3.73±0.88 |
| kj980612meat | 광주 | 98.06.12 | 70.23±6.04 | 2.79±0.88 | 1.23±0.59 |
| se980722meat | 서울 | 98.07.22 | 16.55±3.00 | 2.28±1.00 | 1.88±0.91 |
| cc980411meat | 춘천 | 98.04.11 | 16.64±0.82 | 3.23±0.30 | 3.45±0.31 |
| jj981219meat | 제주도 | 98.12.19 | 94.15±9.11 | 5.34±1.39 | 5.34±1.39 |
| jj990720meat | 제주도 | 99.07.20 | 8.48±1.69 | 3.37±1.02 | 2.23±0.82 |
| tg991105meat | 대구 | 99.11.05 | 102.79±7.37 | 3.59±0.81 | 4.63±0.92 |
| bs990426meat | 부산 | 99.04.26 | 8.46±2.70 | 2.11±1.41 | 1.32±1.15 |
| se990817meat | 서울 | 99.08.17 | 5.81±2.17 | 2.46±1.40 | 1.12±0.98 |
| ad990517meat | 안동 | 99.05.17 | 7.81±0.56 | 1.94±0.27 | 1.35±0.07 |
| gr990604meat | 강릉 | 99.06.04 | 4.43±0.40 | 3.39±0.36 | 1.02±0.19 |

그림 17은 쇠고기의 Th-228, Th-230 및 Th-323의 방사능농도 분석결과를 시료채취지역과 채취연도에 따라 나타낸 것이다. 1998년 광주와 제주도에에서 채취한 시료와

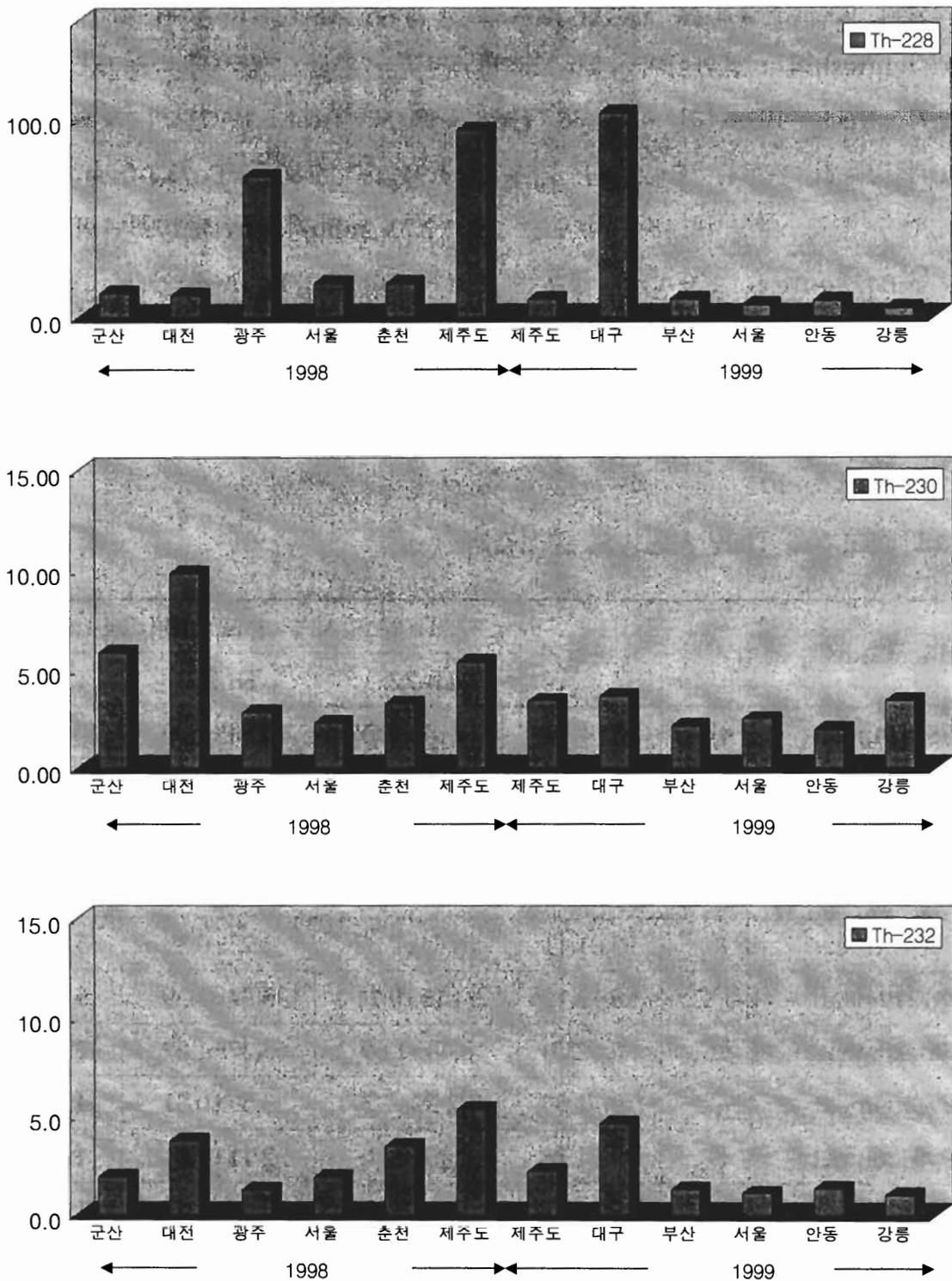


그림 17. 쇠고기의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분포

1999년 대구에서 채취한 시료의 Th-228의 방사능농도가 평균값보다 높게 났으며, 그 외에는 Th-230이나 Th-232의 방사능농도는 특별한 지역적 분포특성이나 채취연도에 따른 분포경향은 나타나지 않았다.

그러나 Th-228의 평균 방사능농도가 Th-230이나 Th-232보다 비교적 높게 나타났는데, 이는 앞서 살펴본 바와 같이 내부생성에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, 표 20은 세계 여러 나라에서 조사된 쇠고기 중의 Th의 방사능농도와 금번의 연구에서 조사된 결과를 함께 나타낸 것이다. Th-230 및 Th-232 모두 본 연구에서 조사한 국내산 쇠고기의 방사능농도가 외국에서의 조사결과와 거의 동일한 준위 내에 있음을 알 수 있었다. 그러나 Th-228의 경우는 국내산 쇠고기의 방사능농도가 외국(폴란드)의 측정값 보다 높게 나타났는데 이는 시료채취 후 측정시간까지의 긴 경과시간으로 인한 Th-228의 내부생성에 의한 것으로 판단된다.

표 20. 여러 나라에서의 쇠고기중 Th 방사능농도의 비교

| 국 가 | | 방사능농도(mBq/kg) | | | 인용문헌 |
|----------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | | ²²⁸ Th | ²³⁰ Th | ²³² Th | |
| 한 국 | 범위 | 4.43~103 | 1.94~9.80 | 1.02~5.34 | Present Work |
| | 평균 | 29.8±36.6 | 3.84±2.23 | 2.43±1.48 | |
| 미국 | | | 3.00±0.17 | 2.00±0.17 | (9)(meat) |
| 폴란드 | | 6.33±1.50 | 2.90±0.25 | 2.40±0.20 | (11) |
| 폴란드(Walbrzych) | | 4.90±0.48 | 3.04±0.36 | 3.61±0.40 | (12) |
| 일본 | | | | 0.404±0.019 | (6)(meat) |
| 영국 | | 22~93 | | | (10)(meat) |

다. 닭고기의 Th 방사능 농도분포

1998년 ~ 1999년 전국 각지에서 채취한 닭고기 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과는 표 21과 같다. Th-228의 경우 4.03 ~ 67.2 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-228의 전국 평균 방사능 농도는 19.1 ± 17.3 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 21.0 ± 23.0 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 17.3 ± 11.0 mBq/kg-fresh)였다. Th-230의 경우는 1.22 ~ 13.0 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-230의 전국 평균 방사능 농도는 4.12 ± 3.11 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 4.54 ± 4.77 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 3.71 ± 1.37 mBq/kg-fresh)였다. 그리고 Th-232의 방사능농도는 0.56 ~ 4.98 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-232의 전국 평균 방사능 농도는 2.43 ± 1.65 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 2.56 ± 1.69 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 2.31 ± 1.76 mBq/kg-fresh)였다.

표 21. 육류(닭고기)의 Th 방사능농도 분석결과

| 시료 Code | 채취지점 | 채취일자 | Th의 방사능 농도(mBq/kg-fresh) | | |
|-----------|------|----------|--------------------------|------------------|-----------------|
| | | | Th-228 | Th-230 | Th-232 |
| kj981202c | 광주 | 98.12.02 | 8.63 ± 0.84 | 2.70 ± 0.46 | 2.55 ± 0.45 |
| se981025c | 서울 | 98.10.25 | 17.50 ± 3.04 | 4.90 ± 1.61 | 0.86 ± 0.72 |
| bs981229c | 부산 | 98.12.29 | 13.00 ± 1.81 | 1.74 ± 0.64 | 4.24 ± 0.99 |
| tj981117c | 대전 | 98.11.17 | 13.03 ± 1.58 | 1.22 ± 0.47 | 0.56 ± 0.34 |
| gs981007c | 군산 | 98.10.07 | 6.57 ± 1.00 | 3.64 ± 0.72 | 2.44 ± 0.6 |
| cc980411c | 춘천 | 98.04.11 | 67.22 ± 5.84 | 13.02 ± 2.32 | 4.68 ± 1.39 |
| gr990616c | 강릉 | 99.06.16 | 4.03 ± 0.68 | 2.77 ± 0.56 | 0.56 ± 0.26 |
| bs990426c | 부산 | 99.04.26 | 19.24 ± 2.60 | 2.51 ± 0.86 | 1.42 ± 0.67 |
| ad991115c | 안동 | 99.11.15 | 10.56 ± 1.30 | 5.43 ± 0.90 | 1.62 ± 0.49 |
| se991019c | 서울 | 99.10.19 | 19.65 ± 5.31 | 3.85 ± 2.35 | 4.98 ± 2.63 |
| jj991223c | 제주도 | 99.12.23 | 13.73 ± 1.64 | 2.43 ± 0.67 | 1.25 ± 0.49 |
| tg991020c | 대구 | 99.10.20 | 36.32 ± 5.59 | 5.28 ± 1.97 | 4.01 ± 1.73 |

그림 8은 닭고기의 Th-228, Th-230 및 Th-323의 방사능농도 분석결과를 시료채취 지역과 채취연도에 따라 나타낸 것이다. 1998년 춘천과 1999년 대구에서 채취한 시

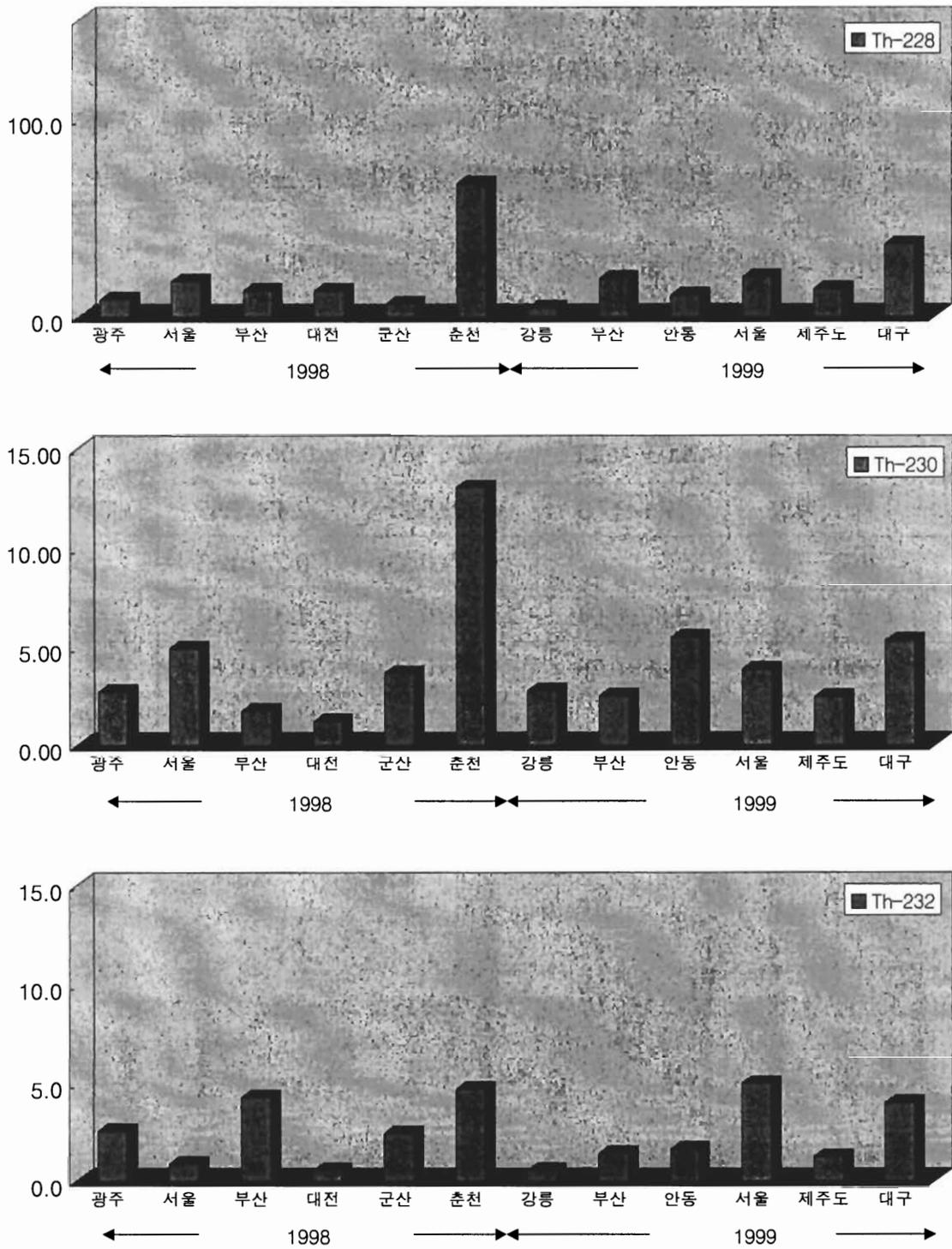


그림 18. 닭고기중의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분포

료의 Th-228과 1998년 춘천에서 채취한 시료의 Th-230이 다소 높게 나타났으나 그 밖의 다른 지역적 분포특성이나 채취연도에 따른 분포경향은 나타나지 않았다.

한편, 표 22는 세계 여러 나라에서 조사된 닭고기 중의 Th의 방사능농도와 금번의 연구에서 조사된 결과 함께 나타낸 것이다. Th-230과 Th-232의 경우에는 금번의 연구에서 조사한 국내산 닭고기의 방사능농도가 외국에서의 조사결과와 거의 동일한 범위내에 있음을 알 수 있었다. 그러나 Th-228의 경우는 앞서 살펴본 바와 같은 Th-228의 내부생성에 의해 외국(폴란드)의 측정값보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

표 22. 여러 나라에서의 닭고기중 Th 방사능농도의 비교

| 국 가 | | 방사능농도(mBq/kg) | | | 인용문헌 |
|----------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | | ²²⁸ Th | ²³⁰ Th | ²³² Th | |
| 한 국 | 범위 | 4.03~67.2 | 1.22~13.0 | 0.56~4.98 | Present Work |
| | 평균 | 19.1±17.3 | 4.12±3.11 | 2.43±1.65 | |
| 미국 | | | 0.47±0.33 | 0.27±0.63 | (9) |
| 폴란드 | | 3.80±0.04 | 1.95±0.70 | 1.31±0.33 | (11) |
| 폴란드(Walbrzych) | | 2.48±0.76 | 2.06±0.68 | 1.65±0.60 | (12) |
| 일본 | | | | 0.404±0.019 | (6)(meat) |
| 영국 | | 22~93 | | | (10)(meat) |

3. 곡류의 Th 분포특성

가. 밀의 Th 방사능 농도분포

1998년 ~ 1999년 전국 각지에서 채취한 밀 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과는 표 23과 같다. Th-228의 경우 54.1 ~ 235 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-228의 전국 평균 방사능 농도는 135 ± 57.4 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 168 ± 50.0 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 103 ± 47.4 mBq/kg-fresh)였다. Th-230의 경우는 0.53 ~ 14.4 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-230의 전국 평균 방사능 농도는 4.91 ± 4.09 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 7.76 ± 2.76 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 2.05 ± 0.83 mBq/kg-fresh)였다. 그리고 Th-232의 방사능농도는 0.53 ~ 20.0 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-232의 전국 평균 방사능 농도는 6.21 ± 6.03 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 10.1 ± 6.39 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 2.30 ± 1.59 mBq/kg-fresh)였다.

표 23. 곡류(밀)의 Th 방사능농도 분석결과

| 시료 Code | 채취지점 | 채취일자 | Th의 방사능 농도(mBq/kg-fresh) | | |
|-----------|------|----------|--------------------------|------------------|------------------|
| | | | Th-228 | Th-230 | Th-232 |
| gs98107m | 군산 | 98.10.07 | 176.73 ± 12.77 | 14.39 ± 2.20 | 19.99 ± 2.67 |
| tj980429m | 대전 | 98.04.29 | 152.13 ± 4.49 | 5.99 ± 0.61 | 6.34 ± 0.62 |
| cc980803m | 춘천 | 98.08.03 | 119.71 ± 4.10 | 7.36 ± 0.77 | 8.95 ± 0.85 |
| tg981113m | 대구 | 98.11.13 | 109.81 ± 8.64 | 1.87 ± 0.74 | 1.87 ± 0.74 |
| kj980623m | 광주 | 98.06.23 | 235.29 ± 23.54 | 8.15 ± 3.19 | 14.74 ± 4.27 |
| se980817m | 서울 | 98.08.17 | 211.99 ± 7.82 | 8.81 ± 1.10 | 8.81 ± 1.1 |
| gr991129m | 강릉 | 99.11.29 | 107.02 ± 5.56 | 2.16 ± 0.62 | 1.83 ± 0.57 |
| jj991124m | 제주도 | 99.11.24 | 54.06 ± 2.75 | 2.34 ± 0.35 | 1.73 ± 0.3 |
| se990907m | 서울 | 99.09.07 | 81.23 ± 5.17 | 3.00 ± 0.69 | 5.19 ± 0.91 |
| ad91018m | 안동 | 99.10.18 | 192.90 ± 7.62 | 1.91 ± 0.52 | 2.83 ± 0.63 |
| tg990821m | 대구 | 99.08.21 | 93.22 ± 10.77 | 0.53 ± 0.59 | 0.53 ± 0.59 |
| bs990920m | 부산 | 99.09.20 | 90.13 ± 12.04 | 2.38 ± 1.49 | 1.67 ± 1.29 |

그림 19 밀의 Th-228, Th-230 및 Th-323의 방사능농도 분석결과를 시료채취지역과 채취연도에 따라 나타낸 것이다. 전반적으로 1998년의 시료에서 Th-228, Th-230

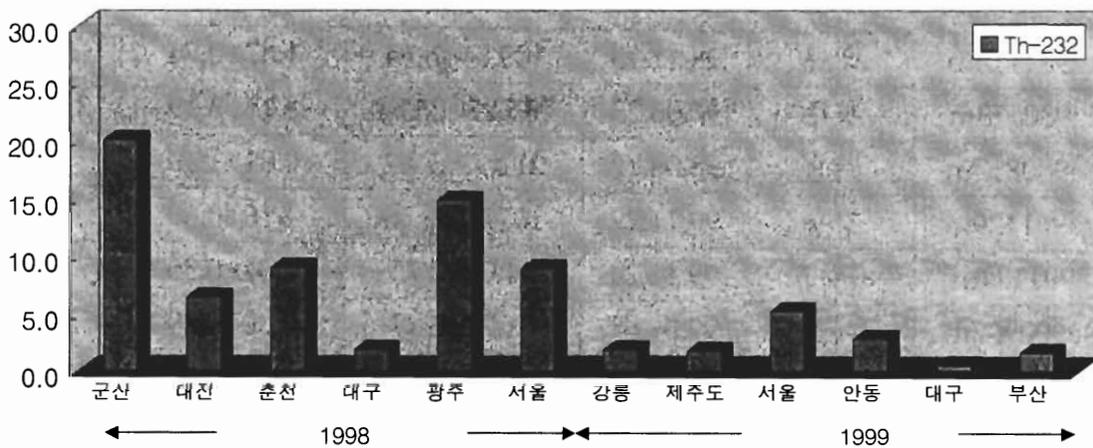
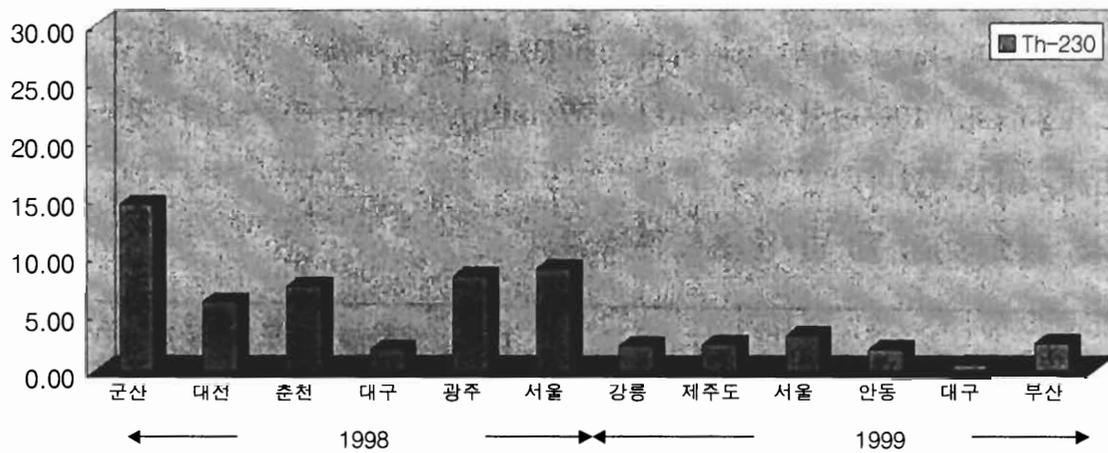
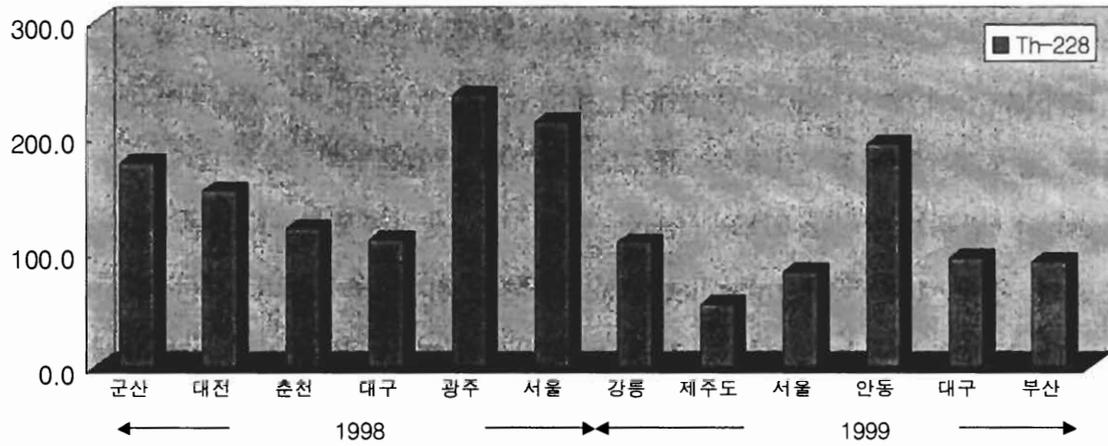


그림 19. 밀의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분포

및 Th-232 모두 1999년 시료보다 다소 높게 나타났으며, 지역적 분포특성은 나타나지 않았다. Th-228의 방사능 농도가 Th-230이나 Th-232보다 매우 높게 나타났는데, 이는 시료의 특성과 함께 시료채취시간과 측정시간과의 시간차가 많음으로 인하여 시료내의 Ra-228과 Ac-228로부터의 내부생성(ingrowth)의 영향이 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 시료의 채취와 유통, 보관 및 측정시간까지의 경과시간이 비교적 길기 때문에 내부생성의 영향이 매우 큰 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 경향은 지역적 분포특성이나 채취연도에 따른 분포경향은 나타나지 않았다.

한편, 표 24는 세계 여러 나라에서 조사된 밀의 Th의 방사능농도와 금번의 연구에서 조사된 결과 함께 나타낸 것이다. Th-230과 Th-232의 경우에는 금번의 연구에서 조사된 국내산 밀의 방사능농도가 외국에서의 조사결과와 거의 동일한 범위내에 있음을 알 수 있었다.

표 24. 여러 나라 밀종의 Th 방사능농도의 비교

| 국 가 | | 방사능농도(mBq/kg) | | | 인용문헌 |
|----------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | ²²⁸ Th | ²³⁰ Th | ²³² Th | |
| 한 국 | 범위 | 54.1~235 | 0.53~14.4 | 0.53~20.0 | Present Work |
| | 평균 | 135±47.4 | 4.91±4.09 | 6.21±6.03 | |
| 미국 | | | 0.9~10 | 0.1~2.8 | (9)(grain) |
| 폴란드 | | 19.2±0.54 | 1.53±0.16 | 2.13±0.23 | (11)(wheat flour) |
| 폴란드(Walbrzych) | | 50.5±4.69 | 16.00±0.05 | 21.14±6.63 | (12) |
| 브라질 | | | | 0.51~-4.3 | (14)(wheat flour) |
| 영국 | | 180~2300 | | 12 | (10)(grain) |

나. 콩의 Th 방사능 농도분포

1998년 ~ 1999년 전국 각지에서 채취한 콩 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과는 표 25와 같다. Th-228의 경우 133 ~ 980 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-228의 전국 평균 방사능 농도는 483 ± 213 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 571 ± 259 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 380 ± 129 mBq/kg-fresh)였다. Th-230의 경우는 8.44 ~ 91.6 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-230의 전국 평균 방사능 농도는 30.5 ± 21.9 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 33.2 ± 32.0 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 27.4 ± 9.96 mBq/kg-fresh)였다. 그리고 Th-232의 방사능농도는 2.30 ~ 42.2 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-232의 전국 평균 방사능 농도는 16.4 ± 12.2 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 22.2 ± 14.3 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 9.63 ± 3.32 mBq/kg-fresh)였다.

표 25. 곡류(콩)의 Th 방사능농도 분석결과

| 시료 Code | 채취지점 | 채취일자 | Th의 방사능 농도(mBq/kg-fresh) | | |
|-----------|------|----------|--------------------------|-------------------|------------------|
| | | | Th-228 | Th-230 | Th-232 |
| kj980525s | 광주 | 98.05.25 | 477.52 ± 15.20 | 35.02 ± 3.31 | 42.18 ± 3.64 |
| cc980521s | 춘천 | 98.05.21 | 608.82 ± 18.06 | 43.80 ± 3.54 | 39.04 ± 3.33 |
| se980727s | 서울 | 98.7.27 | 980.17 ± 33.65 | 13.35 ± 3.53 | 21.52 ± 4.47 |
| gs980325s | 군산 | 98.3.25 | 793.29 ± 23.41 | 31.27 ± 3.80 | 14.62 ± 2.6 |
| tj981129s | 대전 | 98.11.29 | 338.78 ± 14.80 | 8.44 ± 1.99 | 2.3 ± 1.1 |
| tg980520s | 대구 | 98.5.20 | 447.38 ± 31.40 | 91.56 ± 10.89 | 22.89 ± 5.18 |
| jj981212s | 제주도 | 98.12.12 | 350.25 ± 43.63 | 8.85 ± 6.84 | 12.64 ± 7.84 |
| se990629s | 서울 | 99.6.29 | 444.97 ± 15.65 | 34.74 ± 3.43 | 14.07 ± 2.16 |
| gr990429s | 강릉 | 99.4.29 | 361.13 ± 16.43 | 37.20 ± 4.79 | 11.59 ± 2.68 |
| tg990129s | 대구 | 99.1.29 | 407.60 ± 17.33 | 27.49 ± 3.22 | 5.5 ± 1.45 |
| jj991104s | 제주도 | 99.11.4 | 132.91 ± 4.50 | 8.86 ± 0.97 | 9.17 ± 0.99 |
| ad991102s | 안동 | 99.11.2 | 493.35 ± 20.94 | 29.01 ± 4.12 | 11.24 ± 2.58 |
| bs990719s | 부산 | 99.7.19 | 442.88 ± 18.50 | 27.31 ± 3.68 | 6.21 ± 1.78 |

그림 20은 콩의 Th-228, Th-230 및 Th-323의 방사능농도 분석결과를 시료채취지역과 채취연도에 따라 나타낸 것이다. Th-228과 Th-232의 경우에는 특별한 분포경향

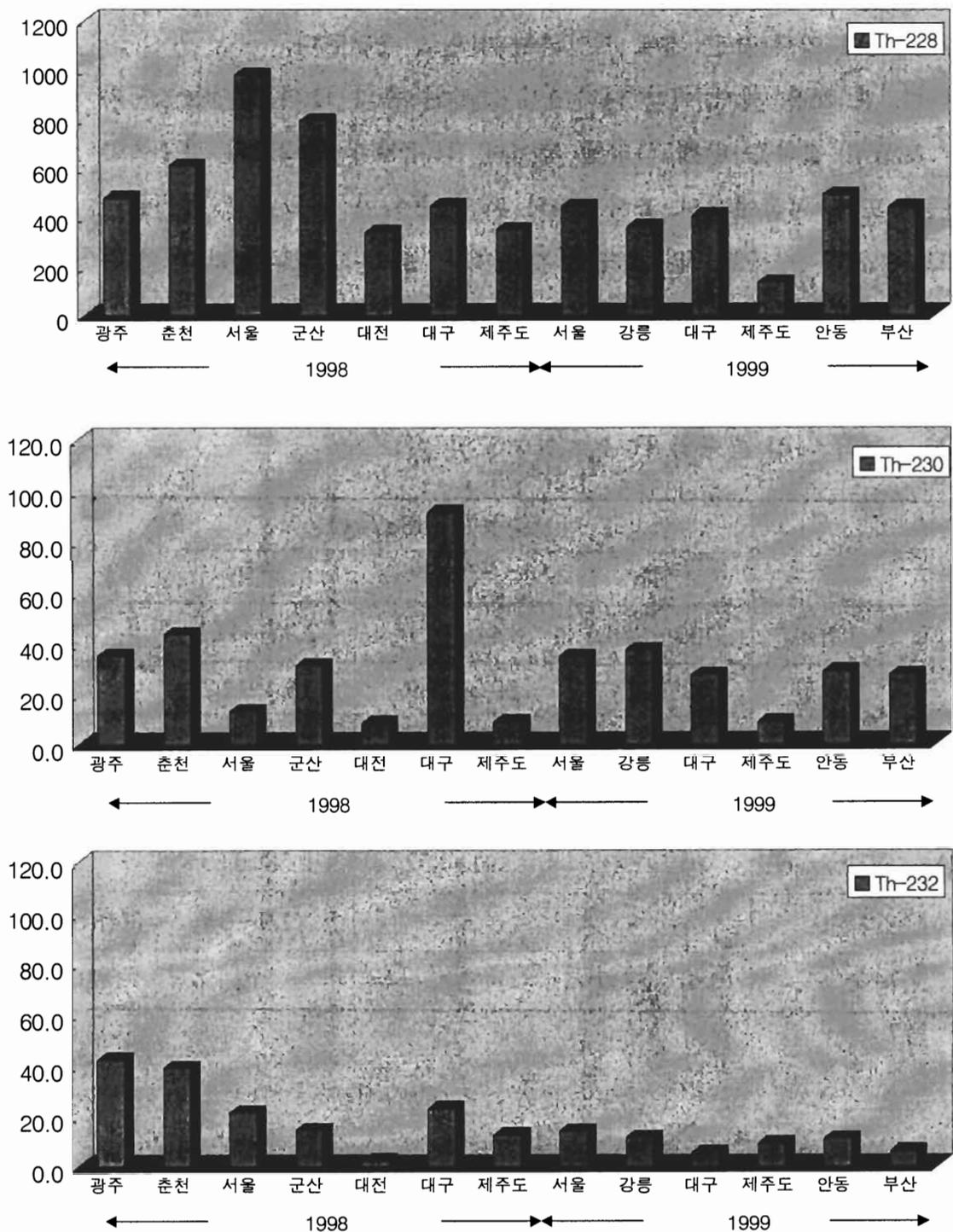


그림 20. 콩의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분포

을 나타내지 않았으나, 1998년에 대구에서 채취한 콩에서 Th-230의 방사능 농도가 비교적 높게 나타났다. Th-228의 방사능 농도가 Th-230이나 Th-232보다 매우 높게 나타났으나 앞서 살펴본 바와 같이 시료의 특성과 함께 시료채취시간과 측정시간과의 시간차가 많음으로 인하여 시료내의 Ra-228과 Ac-228로부터의 내부생성(ingrowth)의 영향이 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, 표 26은 세계 여러 나라에서 조사된 콩의 Th의 방사능농도와 금번의 연구에서 조사된 결과를 함께 나타낸 것이다. Th-230과 Th-232의 경우에는 국내산 콩의 방사능농도가 외국에서의 조사결과와 거의 동일한 범위내에 있음을 알 수 있었다. Th-228의 경우는 폴란드의 측정값보다 매우 높으나, 영국(grain)에서의 측정값 범위와 동일한 준위임을 알 수 있다.

표 26. 여러 나라 콩종의 Th 방사능농도의 비교

| 국 가 | | 방사능농도(mBq/kg) | | | 인용문헌 |
|----------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | | ²²⁸ Th | ²³⁰ Th | ²³² Th | |
| 한 국 | 범위 | 133~980 | 8.44~91.6 | 2.30~42.2 | Present Work |
| | 평균 | 483±213 | 30.5±21.9 | 16.4±12.2 | |
| 미국 | | | 31.7±2.5 | 27.0±2.2 | (9) |
| 폴란드 | | 3.44±0.07 | 4.14±0.74 | 2.16±0.78 | (11) |
| 폴란드(Walbrzych) | | 10.2±1.4 | 3.41±0.52 | 2.58±0.55 | (12) |
| 브라질 | | | | 1.9~54 | (14)(black bean) |
| 영국 | | 180~2300 | | 12 | (10)(grain) |

다. 쌀의 Th 방사능 농도분포

1998년 ~ 1999년 전국 각지에서 채취한 쌀 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과는 표 27과 같다. Th-228의 경우 2.91 ~ 68.7 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-228의 전국 평균 방사능 농도는 18.1±17.0 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 21.5±22.3 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 14.1±10.9 mBq/kg-fresh)였다. Th-230의 경우는 0.43 ~ 2.35 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-230의 전국 평균 방사능 농도는 1.20±0.58 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 1.19±0.52 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 1.21±0.72 mBq/kg-fresh)였다. 그리고 Th-232의 방사능농도는 0.32 ~ 2.54 mBq/kg-fresh의 범위이며 Th-232의 전국 평균 방사능 농도는 1.26±0.87 mBq/kg-fresh(1998년의 경우 1.44±0.96 mBq/kg-fresh, 1999년의 경우는 1.05±0.77 mBq/kg-fresh)였다.

표 27. 곡류(쌀)의 Th 방사능농도 분석결과

| 시료 Code | 채취지점 | 채취일자 | Th의 방사능 농도(mBq/kg-fresh) | | |
|--------------|------|----------|--------------------------|-----------|-----------|
| | | | Th-228 | Th-230 | Th-232 |
| kj981009rice | 광주 | 98.10.9 | 8.16±0.55 | 0.92±0.18 | 0.96±0.19 |
| se980924rice | 서울 | 98.9.24 | 7.81±0.43 | 0.53±0.11 | 0.45±0.1 |
| gs981109rice | 군산 | 98.11.9 | 16.78±2.13 | 1.43±0.62 | 0.93±0.51 |
| cc981113rice | 춘천 | 98.11.13 | 16.96±2.16 | 0.95±0.52 | 0.44±0.37 |
| tj981129rice | 대전 | 98.11.29 | 14.45±1.06 | 1.01±0.28 | 2.42±0.43 |
| tg981017rice | 대구 | 98.10.17 | 68.70±3.09 | 2.04±0.38 | 2.43±0.41 |
| bs981217rice | 부산 | 98.12.17 | 17.93±2.00 | 1.42±0.56 | 2.48±0.74 |
| ad991006rice | 안동 | 99.10.6 | 9.34±0.81 | 1.35±0.31 | 1.07±0.27 |
| gr991129rice | 강릉 | 99.11.29 | 26.16±3.56 | 1.65±0.90 | 0.75±0.64 |
| se991028rice | 서울 | 99.10.28 | 8.93±0.56 | 0.43±0.12 | 0.73±0.16 |
| bs990920rice | 부산 | 99.9.20 | 7.95±1.04 | 0.61±0.29 | 0.88±0.35 |
| jj991002rice | 제주도 | 99.10.2 | 2.91±0.75 | 0.87±0.42 | 0.32±0.27 |
| tg991115rice | 대구 | 99.11.15 | 29.39±1.23 | 2.35±0.34 | 2.54±0.35 |

그림 21은 쌀의 Th-228, Th-230 및 Th-323의 방사능농도 분석결과를 시료채취지역과 채취연도에 따라 나타낸 것이다. Th-228의 경우 1998년에 대구에서 채취한 쌀

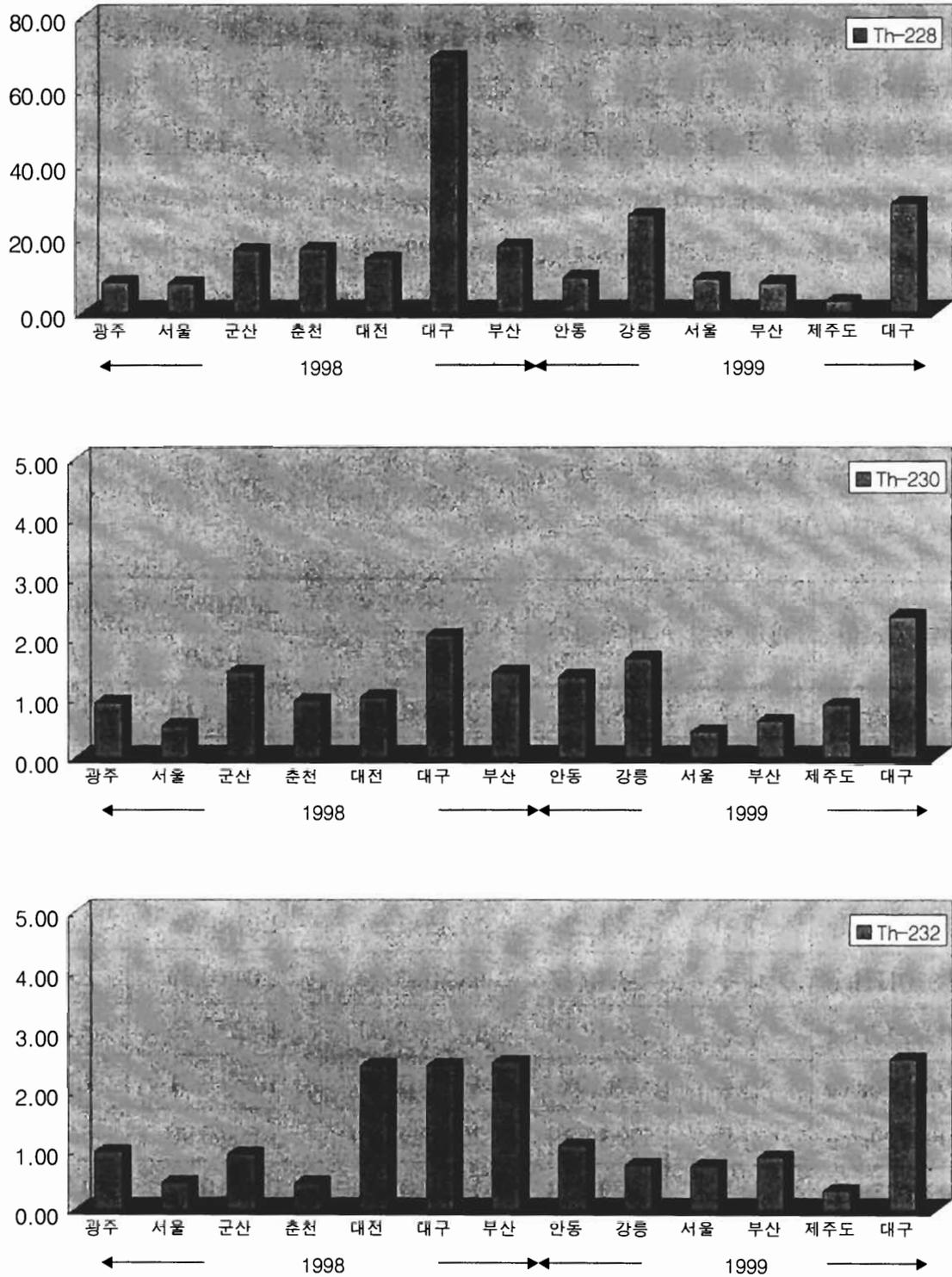


그림 21. 쌀의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도 분포

에서 다소 높게 나타났으나, Th-230과 Th-232는 지역적 분포특성이나 채취연도에 따른 분포경향은 나타나지 않았다.

한편, 표 28은 세계 여러 나라에서 조사된 쌀 중의 Th의 방사능농도와 금번의 연구에서 조사된 결과 함께 나타낸 것이다. Th-230과 Th-232의 경우에는 국내산 쌀의 방사능농도가 외국에서의 조사결과와 거의 동일한 범위내에 있음을 알 수 있었다.

표 28. 여러 나라 쌀의 Th 방사능농도의 비교

| 국 가 | | 방사능농도(mBq/kg) | | | 인용문헌 |
|-----|----|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| | | ²²⁸ Th | ²³⁰ Th | ²³² Th | |
| 한 국 | 범위 | 2.91 ~ 68.70 | 0.43 ~ 2.35 | 0.32 ~ 2.54 | Present Work |
| | 평균 | 18.1±17.0 | 1.20±0.58 | 1.26±0.87 | |
| 미국 | | | 0.93±0.17 | 0.10±0.13 | (9) |
| 브라질 | | | | 0.7~7.9 | (14) |
| 일본 | | | | 0.460±0.066 | (6) |
| 영국 | | 180 ~ 2300 | | 12 | (10)(grain) |

제7절 식품중 Th에 의한 내부피폭선량

1. 내부피폭선량의 계산

음식물 섭취에 의해 음식물에 포함된 방사성핵종이 인체내로 유입되고, 이 방사성핵종은 내부피폭의 원인이 된다. 따라서 음식물의 섭취에 의한 내부피폭은 동일한 방사성핵종에 대해서도 음식물의 섭취량에 따라 달라지며, 동일한 양의 음식물을 섭취하더라도 방사성핵종의 종류에 따라 달라진다. 또한 국가마다 음식물의 섭취량이 다르므로 동일한 식품에 대해서도 국가마다 내부피폭선량이 다르게 평가될 수 있다.

음식물섭취에 의한 토륨의 내부피폭선량은 아래와 같이 계산한다.

$$D_{Th} = (DRF)_{Th} \cdot C_i \cdot U_i \quad (8)$$

단, D_{Th} =내부피폭선량,

$(DRF)_{Th}$ =선량환산인자, Sv/Bq,

C_i =음식물중의 토륨농도, Bq/kg

U_i =음식물의 섭취량, kg/yr

를 나타낸다. 그리고 ICRP 26(1996)에서 제시한 Th의 선량환산인자[25]는 표 29와 같다.

표 29. Th의 선량환산인자

| Radionuclide | Dose coefficient (μ Sv/Bq) |
|-------------------|------------------------------------|
| ^{232}Th | 0.23 |
| ^{230}Th | 0.21 |
| ^{228}Th | 0.072 |

그리고 2001년도 보건복지부의 조사에 의하면 한국인의 우유, 육류(돼지고기, 쇠고기, 닭고기) 및 곡류(밀, 콩, 쌀) 등의 식품류 섭취량은 표 30과 같다.

표 30. 한국인의 식품류 섭취량

| 종류 | 1인1일 섭취량(g) | 연간 섭취량(kg) |
|------|-------------|------------|
| 우유 | 70.6 | 25.8 |
| 돼지고기 | 13.2 | 4.8 |
| 쇠고기 | 20.4 | 7.4 |
| 닭고기 | 22.1 | 8.1 |
| 밀 | 5.1 | 1.9 |
| 콩 | 2.7 | 1.0 |
| 쌀 | 215.9 | 78.9 |

※ 2001년도 국민건강-영양조사(보건복지부)

2. 식품중 Th에 의한 내부피폭선량

표 29의 선량환산인자와 표 30의 식품류 섭취량 및 본 연구에서 조사한 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능농도로부터 Th에 의한 내부피폭선량을 평가한 결과는 표 31과 같다.

표 31. 식품중 Th 섭취에 의한 내부피폭선량

| 종류 | 연간 섭취량 (kg) | Th의 평균농도 (mBq/kg-fresh) | | | 내부피폭선량 (μ Sv/y) | | | |
|------|-------------------|----------------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|-------|
| | | Th-228 | Th-230 | Th-232 | Th-228 | Th-230 | Th-232 | 계 |
| 우유 | 25.8 | 3.99 | 0.74 | 0.30 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.013 |
| 돼지고기 | 4.8 | 5.44 | 5.00 | 1.90 | 0.002 | 0.005 | 0.002 | 0.009 |
| 쇠고기 | 7.4 | 29.8 | 3.84 | 2.43 | 0.016 | 0.006 | 0.004 | 0.026 |
| 닭고기 | 8.1 | 19.1 | 4.12 | 2.43 | 0.011 | 0.007 | 0.005 | 0.023 |
| 밀 | 1.9 | 135 | 4.91 | 6.21 | 0.018 | 0.002 | 0.003 | 0.023 |
| 콩 | 1.0 | 483 | 30.5 | 16.4 | 0.035 | 0.006 | 0.004 | 0.045 |
| 쌀 | 78.9 | 18.1 | 1.20 | 1.26 | 0.103 | 0.020 | 0.023 | 0.146 |

그림 22는 본 연구에서 조사한 식품류의 Th에 의한 내부피폭선량을 동위원소별로 나타낸 것이다. Th에 의한 내부피폭선량 평가결과를 보면 Th-228의 선량환산인자 값이 낮으므로 Th-228의 방사능농도가 비교적 높지만 Th-228에 의한 내부피폭선량은 크지 않다. 그리고 우리나라의 경우 주식인 쌀이므로 쌀의 섭취량이 많고 따라서 쌀의 Th에 의한 내부피폭선량이 다른 식품류 보다 높은 것으로 나타났다.

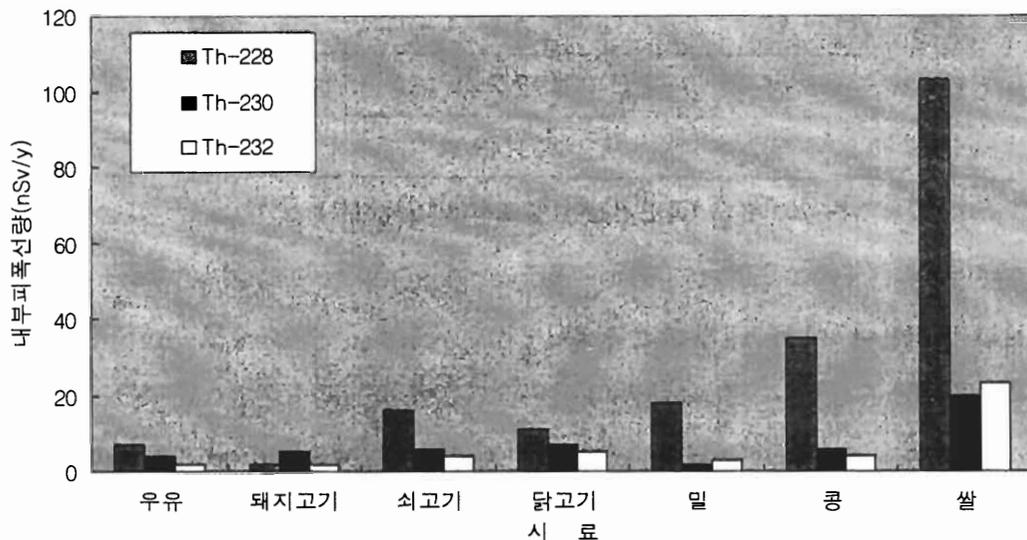


그림 22. 식품류의 Th에 의한 내부피폭선량

한편, 한국인이 섭취하는 전체 식품류에 대한 Th의 방사능 결과가 없기 때문에 1일 음식물 섭취에 의한 Th의 내부피폭선량은 아직까지 계산할 수 없는 단계이며, 본 연구가 완료되는 3차 년도에는 대부분의 식품류에 대한 Th의 방사능농도가 분석되므로 이 시점에서 한국인의 음식물 섭취에 따른 Th에 의한 내부피폭선량의 평가가 가능할 것이다.

표 33은 금번의 연구결과 중 우유의 Th에 의한 내부피폭선량평가 결과를 외국에서의 측정결과와 비교한 것이다. 우리나라 우유중 Th에 의한 내부피폭선량이 외국의 측정결과보다 훨씬 낮게 나타났으며, 이는 외국에 비해 우리나라 사람들의 우유 섭취량이 적기 때문이라고 판단된다.

표 32. 우유중 Th에 의한 내부피폭선량

| 국가 | 내부피폭선량($\mu\text{Sv}/\text{yr}$) | | | 참고문헌 |
|----------------|------------------------------------|--------|--------|--------------|
| | Th-228 | Th-230 | Th-232 | |
| 한국 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | Present work |
| 폴란드 | 0.020 | 0.031 | 0.027 | (11) |
| 폴란드(Werbrzych) | 0.041 | 0.053 | 0.059 | (12) |

제8절 종합평가

본 실험에서는 식품류중의 Th의 화학전처리 방법을 개선하기 위하여 기존의 음이온교환법에 옥살산 공침을 추가하여 Th의 resin흡착을 방해하는 P성분을 제거하여 토륨의 화학적 회수율을 70% 이상으로 증가시키고, α 분광분석법에 의한 식품류중의 Th 측정법을 확립하였다.

그리고 우유 26개, 육류 36개, 곡류 38개 등의 Th 방사능농도 측정결과는 다음과 같다. 우유 시료의 Th-228, Th-230 및 Th-232의 방사능 농도를 분석한 결과, Th-228은 0.51 ~ 8.52 mBq/kg-fresh(평균 3.99 ± 2.35 mBq/kg-fresh), Th-230은 0.14 ~ 2.45 mBq/kg-fresh(평균 0.74 ± 0.57 mBq/kg-fresh), Th-232는 0.01 ~ 2.46 mBq/kg-fresh(평균 0.30 ± 0.52 mBq/kg-fresh) 이었다.

돼지고기의 경우 Th-228은 1.57 ~ 18.0 mBq/kg-fresh(평균 5.44 ± 4.99 mBq/kg-fresh), Th-230은 2.98 ~ 8.97 mBq/kg-fresh(평균 5.00 ± 1.99 mBq/kg-fresh), Th-232는 0.25 ~ 9.32 mBq/kg-fresh(평균 1.90 ± 2.56 mBq/kg-fresh)였다. 쇠고기의 경우 Th-228는 4.43 ~ 103 mBq/kg-fresh의 범위(평균 방사능 농도는 29.8 ± 36.6 mBq/kg-fresh), Th-230은 1.94 ~ 9.80 mBq/kg-fresh의 범위(평균 방사능 농도는 3.84 ± 2.23 mBq/kg-fresh), Th-232는 1.02 ~ 5.34 mBq/kg-fresh의 범위(평균 방사능 농도는 2.43 ± 1.48 mBq/kg-fresh)였다. 닭고기의 경우 Th-228는 4.03 ~ 67.2 mBq/kg-fresh(평균 19.1 ± 17.3 mBq/kg-fresh), Th-230은 1.22 ~ 13.0 mBq/kg-fresh(평균 4.12 ± 3.11 mBq/kg-fresh), Th-232는 0.56 ~ 4.98 mBq/kg-fresh(평균 2.43 ± 1.65 mBq/kg-fresh)였다.

밀의 경우 Th-228는 54.1 ~ 235 mBq/kg-fresh(평균 135 ± 57.4 mBq/kg-fresh), Th-230은 0.53 ~ 14.4 mBq/kg-fresh(평균 4.91 ± 4.09 mBq/kg-fresh), Th-232는 0.53 ~ 20.0 mBq/kg-fresh(평균 6.21 ± 6.03 mBq/kg-fresh)였다. 콩의 경우 Th-228는 133 ~ 980 mBq/kg-fresh(평균 483 ± 213 mBq/kg-fresh), Th-230은 8.44 ~ 91.6 mBq/kg-fresh(평균 30.5 ± 21.9 mBq/kg-fresh), Th-232는 2.30 ~ 42.2 mBq/kg-fresh(평균 16.4 ± 12.2 mBq/kg-fresh)였다. 쌀의 경우 Th-228은 2.91 ~ 68.7 mBq/kg-fresh(평균 18.1 ± 17.0 mBq/kg-fresh), Th-230은 0.43 ~ 2.35 mBq/kg-fresh

(평균 1.20 ± 0.58 mBq/kg-fresh), Th-232는 0.32 ~ 2.54 mBq/kg-fresh(평균 1.26 ± 0.87 mBq/kg-fresh)였다.

대부분의 시료에서 Th-228의 방사능 농도가 Th-230이나 Th-232보다 매우 높게 나타났는데, 이는 시료의 특성과 함께 시료채취시간과 측정시간과의 시간차가 많음으로 인하여 시료내의 Ra-228과 Ac-228로부터의 내부생성(ingrowth)의 영향이 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 조사한 식품류의 Th에 의한 총 내부피폭선량은 우유, 돼지고기, 쇠고기, 닭고기, 밀, 콩, 쌀에 대해 각각 0.013, 0.009, 0.026, 0.023, 0.023, 0.045, 0.146 μ Sv/y로서, 주식인 쌀에 의한 내부피폭선량이 가장 높게 나타났다.

본 실험의 연구결과는 우리나라 국민들이 일상의 환경으로부터 받는 자연방사선택종의 내부피폭선량 평가에 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 향후 여러 식품류에 대한 조사와 아울러 토륨 이외의 자연방사선택종에 대한 조사도 이루어져야 할 것이다.

제4장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

당해 년도의 주요 연구개발 목표는 ① 식품시료중 Th의 추출, 분리 및 측정법을 확립하고, ② 우유, 육류, 곡물류 등 100개 시료중의 Th-230과 Th-228의 방사능 농도 분포를 조사하며, ③ 우유, 육류, 곡물류 시료의 Th에 의한 내부피폭선량을 평가하는 것이다. 본 연구의 목표와 그 달성도와 자체평가결과를 요약하면 표 31과 같다. 연구개발 목표인 식품류에 맞도록 옥살산 공침을 추가한 Th의 화학전처리법과 측정분석법을 확립하였으며, 우유시료 26개 육류 36개(돼지고기 12개, 쇠고기 12개, 닭고기 12개), 곡류 38개(밀 12개, 콩 13개, 쌀 13개)에 대한 Th-230과 Th-228의 방사능을 분석하였을 뿐만 아니라 Th-232의 방사능농도도 함께 분석하여 원래의 목표를 초과하여 달성하였다. 또한 본 연구에서 조사한 우유, 육류 및 곡류의 섭취에 의해 Th으로부터 받게되는 내부피폭선량을 평가하였다.

또한 본 연구의 결과는 2003년도 춘계 한국물리학회와 방사선방어학회등에 발표할 예정이며, 일부 내용은 2003년 7월 24-25일, 일본 센다이 동북대학교에서 개최되는 ISORD-2((the Second iTRS International Symposium On Radiation Safety and Detection Technology)에서 발표할 예정이다.

표 42. 연구목표와 연구결과 및 달성도

| 연구개발목표 | 연구결과 | 달성도 | 자체평가 결과(점수) |
|--|---|------|----------------|
| 식품중 Th의 추출, 분리법 과 분석법의 확립 | - 식품류중 Th 분리 화학전처리법 확립 | 100% | 95 |
| 우유, 고기, 곡물류의 Th-230, Th-228 및 Th-232 방사능농도 분포 조사 | - 우유, 고기, 곡물류 시료 100개의 Th-230 과 Th-228 및 Th-232의 방사능농도 - 식품 섭취로 Th에의해 받게되는 내부피폭 선량평가 분석결과 - 연구결과의 학술대회 발표 | 100% | 95 |

본 연구의 결과는

- ① 방사능 분석 평가기술 확립을 통한 방사선물리학 분야,
- ② 환경방사능 분석 및 평가를 통한 환경분야,
- ③ 자연방사성핵종에 대한 식품류의 안정성과 내부피폭선량평가를 통한 보건 분야
등 관련분야의 발전에 기여할 것이다.

제5장 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 ① 식품류 시료중의 Th-230, Th-228 및 Th-232의 방사능 농도 측정법을 확립하였으며, ② 식품류중의 Th-230과 Th-228 및 Th-232의 방사능 농도분포 특성을 조사하였으며, ③ 식품류중의 자연방사성핵종에 의한 내부피폭선량을 분석, 평가하였다.

따라서 금번의 연구를 통해 얻어진 연구결과는 ① 기술적으로는 식품류중의 자연방사성핵종의 분석기술을 확립할 수 있으며, 자연방사성핵종에 의한 환경방사능 분석 및 평가의 기초자료로 활용될 수 있으며, ② 경제적인 측면에서는 국내에서 생산되는 식품류의 방사능안정성을 확인하는데 활용될 것이다. 또한 ③ 사회적 측면에서 음식물 섭취에 의해 우리나라 국민이 받게 되는 내부피폭선량을 평가하여 우리나라 국민의 방사선 위해도를 평가에 활용될 것이다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보

1. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: SOURCES, Annex B: Exposures from natural radiation sources(2000)
2. H.S.Dang, V.R.Pullat and D.D.Jaiswal et al., Daily Intake of uranium by the urban Indian population, J. Radiation. Nucl. Chem., 138(1), 67-72(1990).
3. Zhu et al., Determination ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po contents in Chinese diet and estimations of internal doses to these radionuclides. Radiat., 13, 85-92 (1993).
4. Kunio Shiraishi et al., Dietary ^{232}Th and ^{238}U intake for Japanese as obtained in a market basket study and contribution of imported foods to internal doses. J. Radiation. Nucl. Chem., 196(1), 89-96(1995).
5. K.Shiraishi et al., Internal dose from ingestion for Japanese adult males. Health Phys. 71, 700-704(1996).
6. K.Shiraishi et al., Contributions of 18 food categories to intakes of ^{232}Th and ^{238}U in Japan. Health Physics, 78, 28-36(2000).
7. K.Shiraishi et al., (1989). Daily intakes of alkaline earth metals in Japanese Males Health Phys. 66, 1, 30-35(1994).
8. K.Shiraishi et al., Daily Intakes OF ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th , AND ^{238}U in Ukrainian Adult Males, Health Phys., 73, 5, 814-819(1997)
9. I.M.Fisenne et al., The daily intake of ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th and ^{226}Ra , ^{228}Ra by New York City Residents, Health Phys., 53(4), 357-363(1987).
10. E.J.Bradley, Contract Report Natural radionuclides in environmental media. NRPB-M439 (1993)(UK)

11. Z. Pietrzak-Flis et al., Daily intake of ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th and ^{226}Ra in the adult population of central Poland. *The Science of the Total Environment*, Vol. 273, 163-169(2001).
12. Z. Pietrzak-Flis et al., The dietary intake of ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{228}Th and ^{226}Ra from food and drinking water by inhabitants of the Walbrzych region. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 222, 189-193(1997).
13. Z. Pietrzak-Flis, E.Chrzanowski and S.DEmbinska, Intake of ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po with food in Poland, *S. Tot. Env.*, 203, 157-165(1997).
- 1.14. E.E. Santos et al., Daily ingestion of ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{210}Pb in vegetables by inhabitants of Rio de Janeiro City, *J. of Environmental Radioactivity*, Vol. 62, No. 1, 75-86 (2001)
15. F.V.Clulow et al., Radionuclides(lead-210), polonium-210, thorium-230, and 232) and thorium and uranium in water, sediments adn fish from lakes near the city og Elliot Lake, Ontario, Canada, *Env. Poll.* 99, 199-213(1998)
16. M.N.Alam et at., Radionuclides concentrations in mussels collected from the southern coast of Bangladesh, *J. Env. Radio.*, 47, 210-212(1999)
17. M.J.Vargas et al., Distribution of uranium and thorium in sediments and plants from a granitic fluvial area, *Appl. Radiat. Isot.*, 48, 8, 1137-1143(1997).
18. S.A.Cotton, *Lanthanides and Actinides*, Macmillan, London(1991).
19. J.M.Stone et. al., Spatial variations in natural background radiation : absorbed dose rates in air in Colorado. *Health Phys.*, 76(5), 516-523(1999).
20. Koh Harada et al., A Practical Method for the Simultaneous Determination of ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po in Seawater. 41, 98-104(1985).
21. Hollenbach, Mark et al., Determination of ^{230}Th , ^{234}U , ^{239}Pu , and ^{240}Pu in soils by ICP-MS using flow-injection preconcentration. *ASTM Special Technical Publication* (1995).
22. Donivan, Stephen et al., Rapid determination of thorium-230 in mill tailings by a spectrometry. *Anal. Chem.*, 59(21), 2556-8(1987).

23. Myung-Ho Lee et al., A studies of Uranium Isotopes Determination in Environmental Samples Using TBP Extraction Reprint from the Journal of the Korean Association for Radition Protection 24, 1, (1999)
24. 한국원자력안전기술원. 방사성핵종 표준분석법. KINS/G-009, 40-45
25. International Commission on Radiological Protection. Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides : part 5. Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. Ann ICRP 1996; 26(1).

| 서 지 정 보 양 식 | | | | | |
|--|--|---------|----------------|------------|---------|
| 수행기관보고서번호 | 위탁기관보고서번호 | 표준보고서번호 | 주 제 코 드 | | |
| | KINS/HR-504 | | | | |
| 제목/부제 | 식품중 Th-230, Th-228 농도분포 특성연구(1) | | | | |
| 연구책임자 및 부서명 | 강희동, 경북대학교 | | | | |
| 연구자 및 부서명 | 강희동, 김완, 임수경, 최민석, 김찬중, 정용철(경북대), 김도성(대구대) | | | | |
| 발 행 지 | 대구 | 발행기관 | 한국원자력안전기술원 | 발행일 | 2003. 3 |
| 페 이 지 | 73p. | 도 표 | 유 (o), 무 () | 크 기 | A4 |
| 참고사항 | | | | | |
| 비밀여부 | 공개(o), 대외비(), 급비밀 | | 보고서 종류 | | |
| 연구위탁기관 | 한국원자력안전기술원 | | 계약 번호 | RS02-17-PL | |
| 초록(200단어내외) | <p>본 연구에서는 식품중의 토륨을 분리 추출하기 위한 화학전처리법과 알파분광 분석에 의한 토륨의 정량분석법을 확립하며, 이를 토대로 전국 각지에서 채취한 우유(26개 시료), 고기(돼지고기 12개, 쇠고기 12개, 닭고기 12개), 곡물류(밀 12개, 콩 13개, 쌀 13개) 등 100 개 식품류 시료의 Th-230 과 Th-228 농도 분포를 조사 하였다. 또한 시료중 Th 방사능농도의 지역적 분포특성을 조사함과 아울러 이들 식품류의 섭취에 의한 내부피폭선량을 평가하였다.</p> | | | | |
| 주제명 키워드(10단어 내외) | | | | | |
| 식품, 토륨, Th-230, Th-228, 내부피폭선량, 우유, 육류, 곡류 | | | | | |

| BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET | | | | | | |
|--|------------------------------|-------------------------------|--|-----------------|------------|--------------|
| Performing Org. Report No. | | Sponsoring Org. Report No. | | Standard Report | | Subject Code |
| | | KINS/HR-504 | | | | |
| Title/Subtitle | | | | | | |
| Distribution of Th-230 and Th-228 in Foods(1) | | | | | | |
| Project Manager and Dep't. | | | Hee-Dong Kang, Kyungpook National University | | | |
| Researcher and Dep't. | | | Hee-Dong Kang, Wan Kim, X.J.Lin, M.S.Choi C.J.Kim, Y.Z.Zheng(KNU), Do-Sung Kim(Daegu Univ.) | | | |
| Pub. Place | Daegu | Pub. Org. | KINS | Pub. Date | March 2003 | |
| Page | 73 p. | Il. and Tab. | Yes (o), No () | Size | A4 | |
| Note | | | | | | |
| Classified | Open(o), Outside(), Class | | | Report Type | | |
| Sponsoring Org. | KINS | | | Contract No. | RS02-17-PL | |
| Abstract (About 200 Words) | | | | | | |
| <p>Natural radioisotopes contained in foods can enter the human body by ingestion and contribute to internal doses to the population. It is necessary to measure the concentration of natural radioisotopes especially thorium in Korean foods and estimate the internal doses.</p> <p>In this study, we have established the thorium measuring process based on the thorium extraction chemical process and alpha spectroscopic method. The concentration of Th-228, Th-230 and Th-232 in Korean milk, meats(pork, beef and chicken) and grain(wheat, bean and rice) are measured and internal doses are estimated.</p> | | | | | | |
| Subject Keywords (About 10 Words) | | | | | | |
| Food, Thorium, Th-230, Th-223, Internal Dose, Milk, Meat, Grain | | | | | | |