

A Study on the Environmental Radioactive Strontium Analysis

Goung-jin Lee, Jung-Lae Hwang and Woon-Kwan Chung
Chosun University

환경중 방사성 스트론튬 분석 방법 연구

이경진 · 황정래 · 정운관

조선대학교

(1999년 8월 24일 접수, 1999년 10월 20일 채택)

Abstract - In the natural, there exist several kinds of radioactive isotopes. From atmospheric weapon tests and then some isotopes are naturally radioactivity above all things, nuclear power plant operation and man-made radioactive isotopes concern steadily growing in the environment. During the fission process of nuclear weapon tests and nuclear power plant operation, more than 200 radioactive isotopes are generated. Among them, ^{90}Sr and ^{137}Cs has been regarded as very important isotopes due to characteristics. In this paper, a quantitative analysis method of environment low level ^{90}Sr is studied. Radioactivity level of the environmental ^{90}Sr is very low, and it emits continuous beta spectrum, and ^{90}Sr exists together with ^{89}Sr , ^{90}Y and other radioactive isotopes. It very difficult to make the quantitative analysis of ^{90}Sr . For the analysis of low level radioactive strontium, enrich and chemical separation of strontium from the other radioactive isotopes are needed. For the estimation of strontium recovery ratio, so called SGAT(Strontium Gravimetric Analysis Technique) was generally used among the domestic research groups, and chemical procedures were developed appropriation for the SGAT. Recently, by using ICP(Inductively Coupled atomic Plasma emission spectrophotometer), amounts of stable atoms can be measured easily and accurately to the extend of ppm or ppb. In this paper, new chemical procedures are developed to exploits the ICP technique. New developed method has simpler chemical treatment procedures and then it gives more accurate results compared with the traditional SGAT.

Key words : Low level environmental radiation, Gravimetric analysis technique, ICP, Recovery rate, Chemical treatment

요약 - 환경 중에는 핵실험 및 원자력 발전소에서 방출되는 여러 가지 방사성 핵종들과 천연방사성 핵종들이 존재한다. 이 중에서 원자력발전소 운영과 관련하여, 환경 중의 인공방사성 핵종에 대한 관심이 높아지고 있다. 핵실험이나 원자력발전소와 관련된 인공방사성 핵종들은 주로 핵분열 생성물들로서, 그 수가 200여종에 이른다. 이 중에서도 ^{90}Sr 과 ^{137}Cs 은 선량특성상 특히 주목되어 왔다. 본 논문에서는 환경준위의 ^{90}Sr 정량 분석 방법에 대한 연구를 수행하였다. 환경 중의 ^{90}Sr 은 저준위이며, 특성 감마선과는 달리 연속 스펙트럼의 베타선원으로, ^{89}Sr , ^{90}Y 및 다른 방사성 핵종들과 혼합되어 있기 때문에 정량적인 분석이 매우 어렵다. 저준위 방사성 스트론튬 분석을 위해서는 농축 과정 및 분석에 영향을 주는 타 방사성 핵종과의 화학적 분리과정이 필요하다. 그 동안 국내 여러 기관에서 공통적으로 스트론튬 회수를 산정을 위해 중량법을 사용하였고, 화학분리결차도 중량법을 사용하기에 적합하도록 개발하여 사용하였다. 최근 분석기기의 발달로 인해서, ppm 이나 ppb 단위의 안정원소 분석을 쉽게 할 수 있다는 점에 근거하여, 원자분광분석기기(ICP : Inductively Coupled atomic Plasma emission spectrophotometer)를 사용한 회수율 산정 및 그에 적합한 결차를 개발하였다. 개발된 결차는 기존의 중량법에 비해서 화학적 처리결차가 훨씬 간편하면서도 정확도가 높아서, 환경방사성 스트론튬의 정량분석에 적절히 사용될 수 있다.

중심어 : 저준위 환경방사능, 중량법, ICP, 회수율, 화학처리

서론

환경에는 다양한 생성원으로부터 발생된 방사성 핵종들이 존재하고 있다. 이들은 크게 생성원에 따라 천연방사성 핵종과 인공방사성 핵종으로 분류된다. 천연방사성 핵종은 인간의 의지와는 상관없이 자연적으로 생성되는 것이므로 환경 측면에서 그리 관심을 끄는 것은 아니다. 이와 달리 인공방사성 핵종의 경우에는 환경 문제에 대한 인식이 점차 높아짐에 따라, 배출이 엄격히 제한되어 있고, 이에 대한 감시 및 분석의 정확성이 요구된다. 인공방사성 핵종의 배출원으로는 크게, 대기중 핵폭발실험, 원자력발전소, 기타 방사성 물질 사용 기관으로 나눌 수 있다. 원자력발전소에 대한 환경 감시 측면에서 보면, 원자력발전소 주변 지역에서의 방사성 핵종은 주로 천연 방사성 핵종과 핵폭발 실험에 의해 대기권에서 침적된 방사성 핵종, 그리고 발전소에서 배출된 핵종으로 구성되어 있다. 천연방사성 물질은 그 핵종이 인공방사성 물질과는 다르기 때문에, 환경 측면에서 원자력발전소의 안전성을 평가하는데 문제가 되지 않는다. 핵폭발이나 원자력발전소에서 생성되는 인공방사성 핵종은 ^3H 나 ^{14}C 등 몇 가지 예외를 제외하고는 핵분열 생성물들이다. 핵분열에 의해 생기는 방사성 핵종은 200여종에 달하는데 그 중에서도 ^{90}Sr 과 ^{137}Cs 은 선량추정상 특히 주목받는 핵종이다. 통상 가압경수로에서 ^{89}Sr / ^{90}Sr 의 비는 6.0, ^{134}Cs / ^{137}Cs 의 비는 0.6 정도이다[1]. 최근 대기 중 핵폭발 실험이 중단되었기 때문에 단반감기인 ^{89}Sr 및 ^{134}Cs 의 붕괴로 인해, 일반 대기중의 ^{89}Sr / ^{90}Sr 및 ^{134}Cs / ^{137}Cs 의 비는 원자력발전소 방출물에 비해서 낮은 경향을 보인다. ^{134}Cs 나 ^{137}Cs 은 특성에너지를 갖는 감마선 방출 핵종이기 때문에 전처리 및 분석이 비교적 쉽다. 반면에 환경중의 ^{89}Sr 나 ^{90}Sr 은 준위가 매우 낮고, 연속에너지의 베타선을 방출하기 때문에 타 방사선방출 핵종으로부터 영향을 크게 받아서 분석이 매우 어렵다. 따라서, 방사성 스트론튬 분석을 위해서는 비방사능을 높이기 위한 농축과정과 타 방사성 물질을 제거하기 위한 화학적분리 과정이 요구된다[2]. 그러나, 이 과정은 매우 복잡하여 많은 시간 및 경비가 소요되고, 분석의 정확도도 떨어질 우려가 높다.

본 논문에서는 방사성 스트론튬 정량 분석을 위한 기존 절차를 분석하여, 장단점을 파악하고, 보다 간단하면서도 정확도를 높일 수 있는 새로운 분석 방법 및 절차를 제시하고자 한다.

기존 방사성 스트론튬 분석절차(중량법) 검증

환경 시료에 있는 방사성 스트론튬의 분석을 위해서는 농축 및 타 방사성물질의 분리를 위한 화학적처리가 필수적으로 요구된다[3,4]. 본 논문에서는 해수 시료를 대상으로 실험 및 연구를 수행하였는데, 토양 시료의 경우도 그 분석 과정이 거의 동일하기 때문에 적용하는데 무리가 없을 것으로 판단된다. 표 1에 해수의 방사성 스트론튬 분석을 위한 전처리 과정 및 주요 핵종 거동 특성을 제시하였다[5,6].

Table 1. The characteristics of strontium separation preprocess.

| Step | Reagent | Solu-tion | Precipitate | Remark |
|-------------------------------------|---|---|---|--|
| Hydroxides Precipitation Procedure. | NaOH (OH^-) | Mg^{2+} Ca^{2+} Sr^{2+} Ba^{2+} Ra^{2+} Cs^+ | $\text{Y}(\text{OH})_3$ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ $\text{Ce}(\text{OH})_3$ $\text{Al}(\text{OH})_3$ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | · Solution · IA, IIA Element Separation |
| Carbonate Ppt. Procedure. | Na_2CO_3 (CO_3^{2-}) | Na^+ K^+ Cs^+ | MgCO_3 CaCO_3 SrCO_3 BaCO_3 | · Ppt. · Volume Reduction |
| Oxalate Ppt. Procedure. | $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$) | Mg^{2+} Fe | $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4)$ $\text{Sr}(\text{C}_2\text{O}_4)$ $\text{Ba}(\text{C}_2\text{O}_4)$ | · Ppt. · Mg^{2+} Removal |
| Nitrate Ppt. Procedure. | HNO_3 fuming (NO_3^-) | Ca^{2+} Mg^{2+} Fe | $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ | · Ppt. · Ca^{2+} , Mg^{2+} removal |
| Ba, Ra Removal Procedure. | Ba - Carrier K_2CrO_4 | Sr^{2+} | BaCrO_4 RaCrO_4 | · Solution · Radioactive Isotopes removal |
| SrCO_3 Ppt. Procedure. | $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ | Cr | $\text{Sr}(\text{CO})_3$ | · Precipitation |
| Milking (Y^{90} Sep.) | Y^{3+} - carrier $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | Sr^{2+} | $\text{Y}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ | · Ppt. |
| Counting | Low-gas Proportional α , β counter | | | |

중량법의 경우는 원시료에 포함된 스트론튬의 중량과 전처리가 끝난 상황에서의 스트론튬의 중량을 전자저울을 사용하여 측정하여 회수율을 산정한다[7]. 따라서 중량 측정에 영향을 주는 모든 핵종과, 방사선 분석에 영향을 주는 미량 방사성 핵종을 모두 분리 제거하여야 한다. 본 연구에서

는 회수를 검증을 위해 ppb 단위까지 측정이 가능한 ICP를 사용하였다.

수산화염 침전 단계

수산화염 침전 단계에서는 각 핵종의 용해도 상수 차이를 이용하여, 해수로부터 스트론튬을 분리하기 위한 절차이다. 이 단계에서 상등액에는 1가 원소 및 스트론튬을 포함한 2가 원소들이 용해된다. 그림 1에는 수산화나트륨(NaOH) 첨가량에 따른 스트론튬 회수율 및 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg) 제거율을 ICP를 이용하여 측정된 결과를 도시하였다.

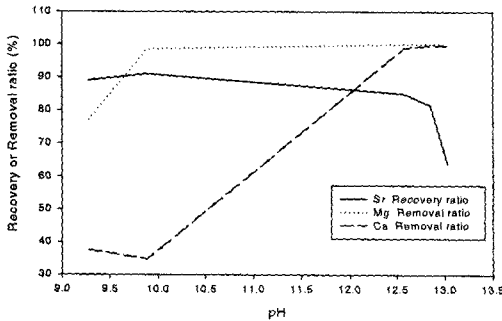


Fig. 1. Strontium recovery, calcium and magnesium removal percent versus solution pH.

수산화나트륨 첨가량이 늘어날수록 pH가 높아지면서 칼슘 및 마그네슘의 제거율은 높아지는 반면에, 스트론튬의 회수율이 낮아지는 결과를 볼 수 있다. pH가 12.5인 경우, 스트론튬의 회수율은 85%이고, 마그네슘의 제거율은 100%, 칼슘의 제거율은 98.9% 였다. 따라서 pH를 12.5정도로 유지하는 것이 합리적이라고 판단된다.

탄산염 침전 단계

탄산염 침전 단계에서는 해수에 포함된 염분의 주 성분인 소듐(Na)과 포타슘(K)이 제거되고, 아울러 방사성 동위원소를 포함하는 칼슘이 제거된다. 따라서 이 단계에서는 시료의 부피가 크게 줄어들게 되고, 스트론튬의 농도는 높아지게 된다. 그림 2는 탄산나트륨(Na_2CO_3) 첨가량에 따른 스트론튬 회

수율 및 포타슘, 칼슘 제거율을 ICP로 측정하여 결과를 도시한 것이다.

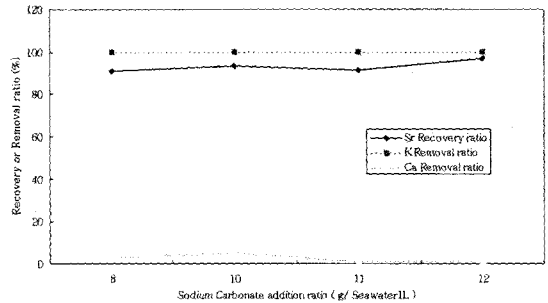


Fig. 2. Strontium recovery, potassium and calcium removal percent versus sodium carbonate addition ratio.

실험 결과에 의하면, 해수 원시료 1L를 기준으로 하여 8~12g의 탄산나트륨을 첨가한 경우, 스트론튬의 회수율은 91% 이상이었으며, 포타슘의 제거율은 99.7% 이상이었다. 그러나 칼슘의 제거율은 6% 이하를 보였다.

옥살산염 침전 단계

옥살산염 침전 단계는 탄산염 침전물에 포함되어 있는 잔량의 마그네슘을 제거하기 위한 단계이다. 그림 3은 옥살산 첨가량에 따른 스트론튬 회수율을 ICP로 측정하여 그 결과를 도시한 것이다. 마그네슘의 경우, 수산화염 침전 단계에서 100% 제거되었기 때문에 ICP 측정 한계 이하의 값을 보였다. 따라서 기존 절차서의 마그네슘을 제거하기 위한 옥살산염 침전 단계는 마그네슘의 제거에는 기여하지 못하고, 스트론튬의 회수율만 떨어뜨리기 때문에 불필요한 것으로 판단된다.

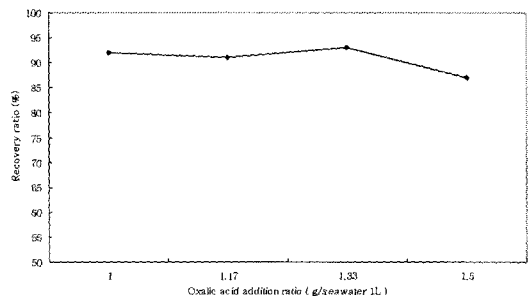


Fig. 3. Strontium recovery percent versus oxalate addition ratio.

질산염 침전 단계

중량법에 의해 스트론튬 회수율을 구하기 위해서는 중량에 영향을 주는 원소를 제거하여야 한다. 질산염 침전 단계는 스트론튬에 섞여 있는 잔량의 칼슘을 제거하기 위한 것이다. 통상 질산염 침전은 수 차례에 걸쳐서 시행한다. 그림 4는 네차례의 발연 질산 처리 후의 스트론튬 회수율과 칼슘 제거율을 도시한 것이다. 실험에 의하면, 스트론튬의 회수율은 70% 이하이고, 칼슘은 거의 100% 제거되는 것으로 나타났다. ICP를 사용하는 경우에는 칼슘의 존재에 관계없이 정확하게 스트론튬 양을 측정할 수 있기 때문에 질산염 침전 단계를 생략할 수 있고, 이에 따라 스트론튬 회수율의 저하를 방지할 수 있다.

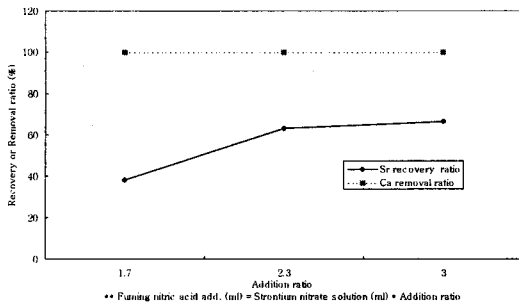


Fig. 4. Strontium recovery and calcium removal percent versus fuming nitric acid addition ratio.

방사성 바륨(Ba), 라듐(Ra) 제거 및 탄산스트론튬(SrCO₃) 침전 단계

발연질산 처리가 끝난 후 얻어진 질산스트론튬(Sr(NO₃)₂) 침전 속에 포함된 바륨과 라듐을 초산-초산 암모늄 완충용액으로 pH를 5.0-5.5 로 유지하면서 크롬산 칼륨을 첨가하여 바륨 크로메이트 침전형태로 바륨과 라듐을 분리하는 단계이다. 이렇게 방사성 동위원소를 제거한 용액에 과잉으로 첨가된 크롬을 제거하고 회수율을 측정하기 위해 탄산 스트론튬 형태의 침전을 구한다. ICP를 이용하여 이 단계에 대한 회수율을 측정할 결과, 스트론튬 회수율은 86.4% 이었고, 바륨 제거율은 98.9% 이었다.

중량법을 이용한 회수율 측정 단계

위 단계에서 만들어진 침전이 모두 탄산스트론튬

침전이라고 가정을 하고 전자저울을 이용하여 침전의 질량을 측정한다. 다음 식은 중량법을 이용한 회수율 계산식이다[7].

$$Recovery\ ratio\ (\%) = \frac{W_1\ Sr\%}{W_0} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, W₀는 원시료 중의 스트론튬 질량이고 W₁은 중량법으로 측정된 탄산스트론튬의 질량이며 Sr%는 탄산스트론튬중의 스트론튬의 함유율(%)로 59.35 %이다.

식(1)에서 W₀를 측정하는 방법으로는 적정법, Saltmeter법 및 원자분광 분석법이 있다. 기존의 적정법에서는 염소이온(Cl⁻)양을 측정하고, 이것이 해수 중 스트론튬과의 함유비가 일정하다고 가정하여 다음 식(2)를 이용하여 해수 중의 스트론튬 양을 계산하였다.

$$W_0 = \frac{8.1 \times \text{염소질량}}{19.38} L \dots\dots\dots (2)$$

여기서, 8.1/19.38은 해수 중 스트론튬 농도와 해수 중 염소이온 농도 간의 평균 질량비이다.

이처럼 중량법에서는 해수 중 염소이온과 스트론튬의 조성비가 일정하다는 가정과 최종 침전물이 모두 탄산스트론튬이라는 가정을 사용하고 있다. 이 방법의 단점은 실제 해수 중 염소이온과 스트론튬의 조성비가 변할 수 있다는 것과 최종 침전물에 탄산스트론튬 이외의 다른 불순물들이 포함되어 있을 가능성이 있어 측정 오차가 크게 발생할 수 있다는 점이다.

기존의 전처리 절차에 따르면 중량법으로 산정한 회수율은 65%인 반면에 정확도가 높은 ICP를 사용하여 측정된 회수율은 45% 이었다. 따라서 중량법을 사용한 경우의 회수율 오차는 20% 정도가 됨을 알 수 있다.

⁹⁰Y 분리 단계

최종 침전물인 탄산스트론튬에는 ⁸⁹Sr와 ⁹⁰Sr 및 ⁹⁰Sr의 자핵종인 ⁹⁰Y이 포함되어 있다. ⁹⁰Sr은 ⁹⁰Y과 방사평형 관계에 있기 때문에 ⁹⁰Y의 방사능을 측정함으로써 ⁹⁰Sr의 방사능을 구할 수 있다. ⁹⁰Y을 밀킹(milking)에 의해서 스트론튬으로부터 분리한 후, 계측기를 사용하여 방사능을 측정하는 것이 그 방법이다. 한편 액체섬광계수기를 사용하여 동시에 계측된 스트론튬과 이트륨의 스펙트럼으로

부터 각각의 방사능량을 소프트웨어적으로 분석하는 통계적 방법도 있다. 이러한 경우에는 ⁹⁰Y의 분리 과정이 불필요하게 된다.

새로운 방사성 스트론튬 분석 절차 제안

정확도가 높은 ICP 방식을 사용하여 기존 절차에 대한 분석을 수행한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 중량법의 복잡한 전처리 절차에 의해서 전 절차에 대한 스트론튬의 회수율이 45%까지 떨어졌다. 특히 4차례의 질산염 침전 단계에서의 스트론튬 회수율은 70% 정도로 매우 낮은 값을 보여주었다.
- 중량법에 의해 산정된 회수율은 오차가 20%에 이르고 있어 분석결과와 정확도가 매우 떨어지게 된다.

이러한 분석 결과에 비추어, 절차를 간소화하고 회수율을 높이면서 정확도를 높일 수 있는 ICP를 사용한 스트론튬 분석 절차를 표 2에 제시하였다.

전처리 목적은 농축도를 높이는 것과 원시료에 포함된 불순 방사성 원소를 제거하는 것이다. 중량법의 경우는 순수한 탄산스트론튬을 얻기 위해 전처리 절차가 매우 복잡하다. ICP를 사용하는 경우에는, 불순 방사성 원소를 제외한 기타 원소들이 어느 정도 포함되어도 분석에 영향을 주지 않기 때문에 절차를 간소화 할 수 있으며, 이에 따라 스트론튬에 대한 회수율도 높아지게 된다.

그림 1과 그림 2의 실험 결과를 볼 때, 수산화염 및 탄산염 침전 단계에서 이미 대부분의 불순물이 제거되기 때문에, 농축도 관점에서는 이 두 가지 단계만으로도 충분한 것으로 판단된다. 다만 칼슘의 경우는 수산화염 침전 단계에서 pH를 12.5 정도로 유지하여 충분히 제거하도록 한다.

중량법에서 필요한 옥살산 침전 단계 및 질산염 침전 단계는 ICP를 사용하는 경우 불필요하게 된다.

불순 방사성 원소를 제거하기 위한 라듐, 바륨 제거 단계는 기존의 방법에서는 pH 5.0~5.5를 유지하면서 불순 방사성 원소를 제거한다. 이때의 스트론튬 회수율은 86% 정도이다. 그러나 pH 변화에 따라 스트론튬 회수율이 변한다는 것을 실험을 통해 관찰할 수 있었으며 최적 pH를 선정할 수 있었다. 실험결과 pH가 4정도에서 스트론튬 회수율은 95% 이상이 된다는 것을 확인할 수 있었다. 그림5는 pH 변화에 따른 스트론튬 회수율 및 바륨 제거율 변화를 나타낸 것이다.

Table 2. A newly developed strontium preprocessing procedures.

| Step | add reagent | Solu-tion | Precipitate | Remark |
|-------------------------------------|--|---|---|--|
| Hydroxides Precipitation procedure. | NaOH (OH ⁻) | Ca ²⁺ Ba ²⁺ Ra ²⁺ Mg ²⁺ Cs ⁺ Sr ²⁺ | Y(OH) ₃ Fe(OH) ₃ Ce(OH) ₃ Al(OH) ₃ Mg(OH) ₂ Ca(OH) ₂ | · Solution · IA, IIA element separation · pH 12.3~12.6 |
| Carbonate Ppt. procedure. | Na ₂ CO ₃ (CO ₃ ²⁻) | Na ⁺ K ⁺ Cs ⁺ | MgCO ₃ CaCO ₃ SrCO ₃ BaCO ₃ | · Ppt. · Volume · Reduction |
| Ba removal procedure. | Ba - Carrier K ₂ CrO ₄ | Sr ²⁺ | BaCrO ₄ RaCrO ₄ | · Solution · Radioactive Isotopes removal |
| SrCO ₃ Ppt. procedure. | (NH ₄) ₂ CO ₃ | Cr | Sr(CO) ₃ | · Treatment recovery ratio |
| Counting | Counting used for LSC after two weeks[8][9] | | | |

액체섬광계수기를 사용하여 측정한 스펙트럼에 통계적 방법을 이용한 ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr 및 ⁹⁰Y의 방사능량을 분리 분석하는 프로그램을 개발 적용함으로써, ⁹⁰Y 분리 단계를 제거하였다.

새로이 개발된 절차를 사용한 경우의 스트론튬 회수율은 73% 정도로, 기존 중량법 절차에 의한 스트론튬 회수율 45%에 비해 매우 높은 값을 보여주었다.

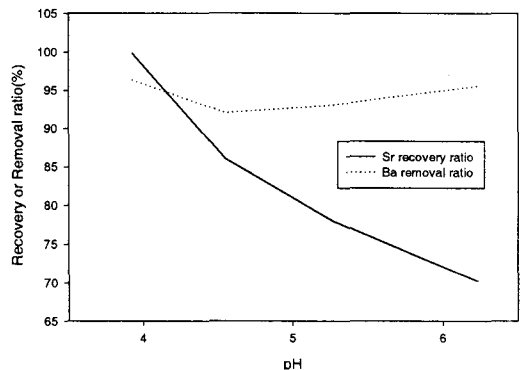


Fig. 5. Strontium recovery percent versus solution pH.

표준 선원을 사용하여 정확도를 측정 한 결과 중량법에서는 20%의 상대오차를 보였고, 새로운 방식에서는 3%의 상대오차를 보여 정확도가 크게 개선되었다.

결과 및 결론

본 연구에서는 중량법을 사용하는 기존의 ^{90}Sr 전처리 절차에 대한 실험 분석을 수행하였다. 기존의 중량법에 의한 회수율 산정 오차는 20%로서 상당히 높은 오차를 보여 주었다. 또한 기존 절차에 의한 스트론튬 회수율은 45% 정도의 낮은 값을 보였는데, 이는 여러 단계의 복잡한 전처리 절차에 기인한다.

새로이 제안된 절차에서는 회수율 산정을 위해서 ICP를 사용하는데, 회수율 산정 오차는 2~3% 정도로 매우 낮고, 스트론튬 회수율은 73%로서 기존 절차에 비해 매우 높은 값을 보였다.

전처리 시간의 경우, 기존 절차에서는 밀킹 전 단계까지 8일이 소요되는 반면에 새로운 절차에서는 4일이 소요되었다.

결론적으로 ICP를 사용한 새로운 절차를 사용하는 경우 스트론튬에 대한 회수율 및 분석의 정확도를 높일 수 있었으며 전처리 절차가 간소화될 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. 환경방사능 모니터링, KINS(1985).
2. R.J. Budnitz, A.V. Nero, D.J. Murphy and R. Graven, *Instrumentation for Environmental Monitoring*, Vol. 1 Radiation, 2nd ed., Lawrence Berkeley Laboratory(1983).
3. Sr-90 분리법. KINS(1998).
4. 환경방사능 분석법 연구, KRC-90C-JO2, 한국 전력공사 기술연구원(1992).
5. D.A. Skoog, D.M. West and F.J. Holler, *Fundamentals of Analytical Chemistry*, Saunders College Publishing, Philadelphia (1995).

6. 이원근, 환경 중의 방사능 측정 및 허용농도 설정에 관한 연구, 97-15호, 한국전력공사(1999).
7. 방사성핵종 표준분석법, KINS/ G-009(1996).
8. K. Vogl and P. Gesewsky, "A rapid method for determining ^{89}Sr and ^{90}Sr from Nuclear Accident," in : *Liquid Scintillation Spectrometry 1992*, pp 435-438, Radiocarbon, Arizona(1992).
9. M.G. Buzinny, A.V. Zelensky and I.P. Los, "Beta-spectrometric determination of Sr^{90} in water, milk and other samples with an ultra low level liquid scintillation counter," in : *Liquid Scintillation Spectrometry 1992*, pp 439-446, Radiocarbon, Arizona(1992).